

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 987 268**

51 Int. Cl.:

F03D 7/04

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.05.2020** **E 20176671 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.06.2024** **EP 3916219**

54 Título: **Procedimiento para controlar una instalación de energía eólica**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
14.11.2024

73 Titular/es:

WOBEN PROPERTIES GMBH (100.0%)
Borsigstraße 26
26607 Aurich, DE

72 Inventor/es:

BROMBACH, JOHANNES

74 Agente/Representante:

ROEB DÍAZ-ÁLVAREZ, María

ES 2 987 268 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento para controlar una instalación de energía eólica

- 5 La presente invención se refiere a un procedimiento para controlar una instalación de energía eólica. La presente invención también se refiere a una instalación de energía eólica.

10 Para operar una instalación de energía eólica se suele operar a carga parcial, es decir, cuando la velocidad del viento es inferior a una velocidad nominal del viento, con un punto de operación lo más óptimo posible. En el caso de una instalación de energía eólica con velocidad rotacional variable y un rotor con palas de rotor cuyo ángulo de pala se puede ajustar, un punto de operación de este tipo se caracteriza por la velocidad rotacional, el ángulo de pala y la potencia de salida resultante. Si se establece el punto de operación óptimo, la potencia de salida para la velocidad del viento predominante en ese momento es la potencia máxima que la instalación de energía eólica puede generar permanentemente a la velocidad del viento.

15 Para representar este y otros puntos de operación, a menudo se utiliza un diagrama de ángulo de pala-relación de velocidad punta, denominado en el presente documento diagrama $\lambda\theta$. En este diagrama $\lambda\theta$, la relación de velocidad punta λ del punto de operación correspondiente se ingresa por tanto para el valor correspondiente del ángulo de pala θ del mismo punto de operación.

20 La relación de velocidad punta λ se define generalmente como la relación entre la velocidad punta de la pala de rotor y la velocidad del viento. Por tanto, la relación de velocidad punta resultante λ no tiene unidades. Al considerar la relación entre velocidad y velocidad del viento, el diagrama $\lambda\theta$ se puede utilizar para diferentes velocidades del viento. De este modo se pueden introducir en el mismo diagrama puntos de operación con diferentes velocidades del viento. Idealmente, incluso los puntos de operación con diferentes velocidades del viento pueden ser idénticos en este diagrama.

25 Estos puntos de operación idénticos pueden surgir en la operación con carga parcial, si el ángulo de pala se mantiene constante con diferentes velocidades del viento, es decir, no se modifica, y la velocidad rotacional es proporcional a la velocidad del viento. Es exactamente este tipo de estado el que se busca en el diseño ideal de una instalación de energía eólica. Si la velocidad rotacional y la velocidad del viento cambian proporcionalmente entre sí, el ángulo de ataque con el que el aire fluye realmente hacia la pala de rotor sigue siendo el mismo. Por lo tanto, también tiene sentido no modificar el ángulo de pala.

30 Por supuesto, la potencia de salida no sigue siendo la misma, porque a medida que aumentan la velocidad del viento y la velocidad rotacional, se puede generar más potencia.

35 Además, es común y útil dibujar coeficientes de potencia, también conocidos como valores C_p , en el diagrama $\lambda\theta$. Por lo tanto, un coeficiente de potencia de este tipo indica la eficiencia con la que el punto de operación correspondiente puede convertir la potencia eólica en potencia rotacional. Para una mejor visualización, los puntos de operación con el mismo valor de C_p se dibujan en una línea común, cada una de las cuales es una línea cerrada. Por ejemplo, dichas curvas características de C_p se pueden dibujar en pasos de 0,05. Estas características también se denominan aquí curvas isocaracterísticas. Si la instalación de energía eólica está diseñada de forma óptima, su punto de operación en operación a carga parcial se sitúa en el valor C_p más alto posible, que es ligeramente superior a 0,45.

40 Por lo tanto, la determinación de un punto de operación es comparativamente clara, es decir, de manera que la potencia entregada sea lo más alta posible, lo que a menudo conduce a un punto de operación que se encuentra dentro de la curva isocaracterística y que tiene el valor C_p más alto. Sin embargo, dependiendo de las condiciones límite, es posible que los puntos de operación no puedan alcanzar este valor ideal. Especialmente, por ejemplo, con velocidades de viento muy bajas, las condiciones de fricción pueden ser tan dominantes que se debe seleccionar un punto de operación con una velocidad rotacional comparativamente alta, es decir, una relación de velocidad punta más alta, que entonces también puede presentar un ángulo de pala mayor. La velocidad rotacional máxima de una instalación de energía eólica también está limitada. A partir de una determinada velocidad del viento, la velocidad rotacional de la instalación no puede aumentar más y esto da lugar a puntos de operación alejados del óptimo.

45 Pero estos estados operativos también pueden determinarse mediante simulaciones o, en caso necesario, ajustes in situ.

50 Ahora se tiene en cuenta que deben cumplirse requisitos adicionales que exigen una potencia de salida reducida. Por ejemplo, puede ser necesaria una potencia de salida reducida durante un periodo de tiempo, que puede ser de 15 minutos, pero también de varias horas, para adaptarse a una situación en la red de suministro eléctrico. Esta situación puede ocurrir cuando existe un requerimiento de potencia correspondientemente bajo, pero también puede ser necesario proporcionar potencia de reserva. Durante la provisión de potencia de reserva, la instalación de energía

eólica funciona con una potencia de salida menor que la posible en base al viento predominante, de modo que en caso de un aumento repentino de la demanda de potencia pueda aumentar su producción de potencia, es decir, aumentarla permanentemente a la máxima potencia que se puede generar a partir del viento predominante. Sin embargo, también entran en consideración otras especificaciones, como el requisito de que la instalación de energía eólica funcione a un nivel reducido para minimizar el ruido. La reducción puede afectar a la potencia de salida, pero también a la velocidad rotacional.

Si ahora se presenta una solicitud para reducir la potencia, existen muchas opciones para seleccionar un punto de operación adecuado. En cualquier caso, ya no se selecciona el punto de operación óptimo, es decir, el punto de operación con el valor C_p máximo, porque esto conduciría a una potencia máxima, lo que no es deseado. El punto de operación con potencia reducida se puede elegir, por ejemplo, de modo que la potencia de salida reducida se genere con el menor desgaste posible. El punto de operación también puede elegirse de modo que sea especialmente estable, de modo que pequeños cambios en la velocidad del viento no conduzcan a un efecto de pérdida, es decir, a un colapso aerodinámico.

Pero el deseo de elegir un punto de operación con el menor desgaste posible también puede dar lugar a diferentes variantes. El desgaste puede ser mínimo si la velocidad rotacional de la instalación de energía eólica es lo más baja posible. Sin embargo, esto puede llevar a una situación en la que, cuando se producen cambios en la velocidad del viento, las palas del rotor tengan que reajustarse con frecuencia en cuanto a su ángulo de ataque para garantizar que este punto de operación no tenga entonces un bajo desgaste con respecto a los accionamientos de ajuste de las palas del rotor. Un criterio de calidad que incorpore estos diferentes requisitos puede definirse aquí.

Ahora pueden surgir otras situaciones en las que la instalación de energía eólica deba pasar lo más rápidamente posible de un punto de operación reducido a un punto de operación menos reducido. Un requisito de este tipo también puede surgir de condiciones en la red de suministro eléctrico; en particular, un cambio rápido en la frecuencia de la red de suministro eléctrico puede desencadenar tal necesidad. En particular, si la frecuencia de la red de suministro eléctrico cae por debajo de un valor límite, que puede ser, por ejemplo, un 0,3 % por debajo de la frecuencia nominal de la red, puede ser necesario que la instalación de energía eólica en operación reducida aumente rápidamente su potencia de salida, es decir, particularmente porque la frecuencia de la red continúe cayendo.

Esto crea entonces el problema de encontrar un punto de operación para esta nueva situación. También puede ser importante encontrar la transición desde el punto de operación reducido al punto de operación menos reducido, o posiblemente ya no reducido.

En Van der Hoek Daan et al., "Comparison of Down-Regulation Strategies for Wind Farm Control and their Effects on Fatigue Loads", Annual American Control Conference, 27 de junio de 2018, páginas 3116-3121, se presentan tres estrategias de reducción para instalaciones de energía eólica. En una de las tres estrategias, la relación de velocidad punta aumenta para estrangular.

Por lo tanto, la presente invención se basa en el objetivo de abordar al menos uno de los problemas antes mencionados. En particular, debería encontrarse una solución en la que se proporcione un punto de operación reducido. En particular, este punto de operación reducido debería elegirse también de la manera más ventajosa posible con vistas a un cambio adicional a un punto de operación menos reducido. En particular, también se debería sugerir la elección de un punto de operación menos reducido. Se debería proponer al menos una alternativa a las soluciones conocidas hasta ahora.

Según la invención, se propone un procedimiento para controlar una instalación de energía eólica según la reivindicación 1. Por lo tanto, se parte de una instalación de energía eólica, que tiene un rotor con palas de rotor cuyo ángulo de pala se puede ajustar y el rotor puede funcionar con una velocidad rotacional variable. En este sentido se puede suponer que se trata de una instalación de energía eólica normal.

El procedimiento se refiere al caso en el que la instalación de energía eólica se opera en un rango de carga parcial. El rango de carga parcial se caracteriza por el hecho de que no hay suficiente viento para operar la instalación de energía eólica a su potencia nominal. Esto significa que la velocidad del viento también está por debajo de la velocidad del viento nominal. La velocidad rotacional de la instalación de energía eólica suele estar por tanto por debajo de la velocidad rotacional nominal.

La instalación de energía eólica puede funcionar en un punto de operación que puede especificarse de forma variable y este punto de operación se caracteriza por el ángulo de pala, es decir, el valor del ángulo de pala, y una relación de velocidad punta. Este punto de operación se puede representar en un diagrama $\lambda\theta$. Un diagrama $\lambda\theta$ de este tipo, que también puede denominarse como sinónimo diagrama de relación de velocidad punta-ángulos de pala, ya se ha descrito anteriormente en la introducción. En dicho diagrama $\lambda\theta$, la relación de velocidad punta se traza frente al ángulo

de pala y el punto de operación se puede representar en el diagrama $\lambda\theta$ como un par de valores de su ángulo de pala y su relación de velocidad punta.

Por tanto, el punto de operación puede representarse mediante un par de valores (θ, λ) , en los que θ indica el ángulo de pala o el valor del ángulo de pala y λ indica la relación de velocidad punta. Además, como ya se describió al principio, a cada punto de operación se le asigna un coeficiente de potencia, también denominado valor C_p . Varios puntos de operación con el mismo valor de C_p se pueden representar como una curva isocaracterística en el diagrama $\lambda\theta$. Por lo tanto, una curva isocaracterística de este tipo se compone de muchos puntos de operación con el mismo valor C_p , pudiendo ser puntos de operación ficticios, por lo que no tienen por qué ser puntos de operación que también están previstos en el control específico de la instalación de energía eólica en cuestión. Estas curvas isocaracterísticas se utilizan para caracterizar la aerodinámica de la instalación de energía eólica. Las curvas isocaracterísticas también pueden denominarse sinónimamente características con el mismo valor C_p o características con el mismo coeficiente de potencia.

Según un paso, la instalación de energía eólica se opera en un punto de operación normal cuando no hay ninguna solicitud de estrangulación. Un punto de operación normal de este tipo se caracteriza porque la instalación de energía eólica no opera con estrangulación. Por lo tanto, lo normal es que la instalación de energía eólica funcione en un punto de operación normal. Por supuesto, dependiendo de la instalación de energía eólica también puede darse el caso de que exista una demanda o solicitud constante de estrangulación. Pero también en este caso está previsto básicamente un punto de operación normal, en el que la instalación de energía eólica también estaría en operación si no fuera necesaria una estrangulación.

Además, la instalación de energía eólica se hace funcionar en un punto de operación estrangulado, en el que la instalación de energía eólica se opera, en respuesta a una solicitud de estrangulación, con la potencia de salida estrangulada en comparación con la del punto de operación normal. En el punto de operación estrangulado se estrangula la instalación de energía eólica con respecto al punto de operación normal, es decir, a su potencia de salida. Por lo tanto, el sistema entrega menos potencia o genera menos potencia a partir del viento que en el punto de operación normal. No obstante, la instalación de energía eólica debe funcionar; por lo tanto, si se detiene, también se estrangula, pero ya no existe una operación de la instalación de energía eólica este sentido.

Además, se prevé cambiar la operación de la instalación de energía eólica desde el punto de operación estrangulado a un punto de operación de reserva. En el punto de operación de reserva, la instalación de energía eólica funciona con una potencia de salida mayor que en el punto de operación estrangulado. El cambio del punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva ocurre en respuesta a una solicitud de incremento de potencia. Por lo tanto, la instalación eólica suministra más potencia en el punto de operación de reserva, es decir, funciona con una potencia de salida mayor que en el punto de operación estrangulado. Por tanto, el punto de operación de reserva está situado a modo de ejemplo entre el punto de operación estrangulado y el punto de operación normal. Pero en principio también es posible que en el punto de operación de reserva se entregue la misma cantidad de potencia que en el punto de operación normal. En este caso, el punto de operación normal y el punto de operación de reserva pueden seguir siendo diferentes, por ejemplo, tener una relación de velocidad punta diferente. Preferiblemente, sin embargo, se suministra menos potencia en el punto de operación de reserva que en el punto de operación normal.

Ahora se propone seleccionar el punto de operación estrangulado de modo que tenga una relación de velocidad punta mayor en comparación con el punto de operación de reserva. Básicamente se supone que los puntos de operación que se comparan, es decir, el punto de operación normal, el punto de operación estrangulado y el punto de operación de reserva, operan con la misma velocidad del viento. Por supuesto, la velocidad del viento puede cambiar y, especialmente en una situación de estrangulamiento persistente, en la que la instalación de energía eólica funciona durante un período de tiempo más largo en el punto de operación de estrangulamiento, también se puede suponer que la velocidad del viento cambiará al menos ligeramente. Para la descripción comparativa se debe partir de todos modos de la base de que la velocidad del viento subyacente es la misma, porque si la velocidad del viento aumenta y por ello cambia el punto de operación estrangulado, a esta mayor velocidad del viento también se le debe asignar un punto de operación normal modificado y también un punto de operación de reserva modificado, ya sea que se pueda controlar en el momento o no. Por lo tanto, las comparaciones se refieren siempre a una situación en la que los tres puntos de operación mencionados se basan en la misma velocidad del viento.

Además, un cambio, en particular del punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva, se realizará tan rápidamente que en realidad se puede suponer durante este proceso de cambio una velocidad del viento aproximadamente invariable.

Por lo tanto, al elegir el punto de operación estrangulado, se sugiere que tenga una relación de velocidad punta mayor en comparación con el punto de operación de reserva. Además, para la elección del punto de operación estrangulado, se sugiere que éste se encuentre en una curva isocaracterística asociada en el diagrama $\lambda\theta$ y que la curva isocaracterística asociada tenga una pendiente característica negativa en el punto de operación estrangulado, en el

que la relación de velocidad punta disminuye al aumentar el ángulo de pala. La curva isocaracterística asociada es, por tanto, la que incluye también el punto de operación estrangulado. Como ya se ha explicado, estas curvas isocaracterísticas son curvas características cerradas, lo cual es natural siempre que no abandonen el área de visualización del diagrama. Estas características o la curva isocaracterística considerada tiene por tanto tramos que

5 tienen pendiente negativa y aquellos que tienen pendiente positiva. En dos lugares el gradiente es cero. En particular, cada curva característica ISO tiene básicamente dos zonas con pendiente negativa. En principio, una zona de esta debería tener una relación de velocidad punta menor que el punto de operación normal y esta zona no se considera para el punto de operación estrangulado propuesto. La otra zona que se propone aquí está esencialmente "arriba a la derecha" en el diagrama $\lambda\theta$ con respecto al punto de operación óptimo, que corresponde al punto de operación normal.

10 En el rango propuesto en el que se va a seleccionar el punto de operación estrangulado, la relación de velocidad punta y el ángulo de pala son predominantemente mayores que la relación de velocidad punta y el ángulo de pala del punto de operación normal.

Sin embargo, el rango propuesto se refiere al punto de operación de reserva y, en comparación con este, se debe elegir que la relación de velocidad punta sea mayor y la curva isocaracterística debe tener una pendiente o gradiente de curva característica negativa.

15

En particular se reconoció aquí que la elección propuesta del punto de operación estrangulado tiene una velocidad rotacional mayor en comparación con el punto de operación de reserva. Si ahora se desea aumentar la potencia de salida en respuesta a la solicitud de incremento de potencia, en particular de forma rápida, entonces la elección propuesta del punto de operación estrangulado es ventajosa. Para cambiar, se debe reducir la velocidad rotacional del punto de operación estrangulado para poder alcanzar el punto de operación de reserva. Esto significa que se debe entregar más potencia y, por lo tanto, estará inmediatamente disponible tan pronto como se lleve a cabo esta reducción de velocidad rotacional. En particular, la reducción de la velocidad rotacional puede activarse incluso aumentando la potencia de salida.

20

25

También se reconoció que cuando se opera la instalación de energía eólica en el rango de carga parcial, a menudo todavía existe la posibilidad de aumentar la velocidad rotacional sin alcanzar los límites técnicos. En particular, se reconoció que aún no se ha alcanzado la velocidad rotacional nominal y que es posible aumentar la velocidad rotacional sin poner en peligro la instalación de energía eólica. Sin embargo, también se reconoció que, dependiendo de la velocidad del viento predominante, la velocidad rotacional sólo puede ser ligeramente inferior a la velocidad nominal, aunque todavía hay poco potencial para aumentar la velocidad rotacional. Cambiando el punto de operación en la zona en la que las curvas isocaracterísticas tienen un gradiente de curva característica negativo, especialmente si esta pendiente tiene al menos $1/1^\circ$ de magnitud, se puede conseguir una reducción significativa del coeficiente de potencia. Esto permite alcanzar un punto de operación con menor potencia de salida mientras aumenta la velocidad rotacional y se absorbe potencia, aunque el aumento de velocidad rotacional realizado puede ser comparativamente pequeño, mientras que al mismo tiempo el cambio en el ángulo de pala también es comparativamente pequeño. De este modo se puede alcanzar fácilmente el punto de operación estrangulado y, en particular, se puede volver a cambiar rápidamente al punto de operación de reserva.

30

35

40

Al mismo tiempo, sin embargo, se reconoció que simplemente elegir una velocidad más alta no conduce necesariamente a un cambio ventajoso, o al menos no tiene por qué conducir a un cambio óptimo. En particular, se reconoció que el punto de operación estrangulado también debe tener un coeficiente de potencia más pobre, es decir, un valor C_p más bajo, en comparación con el punto de operación de reserva, porque este es un requisito previo para que se entregue menos potencia de salida. Esto se puede lograr ajustando las palas del rotor. Para volver después durante el cambio mencionado del punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva, también es necesario volver a girar las palas del rotor. Se ha reconocido que el ajuste de las palas del rotor requiere un tiempo mínimo determinado, en particular debido a la dinámica de los accionamientos de ajuste. Se reconoció además que en las zonas en las que las curvas isocaracterísticas tienen una pendiente negativa, las curvas isocaracterísticas también están comparativamente cerca unas de otras. Esto significa que con un ajuste relativamente pequeño de las palas del rotor se puede conseguir una modificación comparativamente grande del valor C_p .

45

50

Por lo tanto, se propone que el punto de operación estrangulado se elija en relación con el punto de operación de reserva de modo que pueda pasar al punto de operación de reserva con el menor ajuste de las palas posible, mientras que al mismo tiempo se reduce la velocidad rotacional del rotor durante este cambio y, por lo tanto, la energía cinética se pueda convertir en potencia. Por lo tanto, el cambio se realiza lo más rápido posible y al mismo tiempo permite entregar y alimentar la potencia de salida aumentada, es decir, según el punto de operación de reserva deseado, al inicio del cambio.

55

Según la invención se propone que el gradiente de curva característica en el punto de operación estrangulado disminuya en un valor de al menos $0,5/1^\circ$. Se ha reconocido que un gradiente o pendiente claramente negativo pertenece a curvas isocaracterísticas especialmente cercanas entre sí y que, por tanto, allí el valor C_p puede modificarse de forma especialmente rápida, es decir, una variación elevada del valor C_p con una variación lo más

60

pequeña posible del ángulo de pala. Este efecto se produce particularmente a relaciones de velocidad punta que son mayores que la relación de velocidad punta del punto de operación normal. Por lo tanto, también se propone como condición adicional que el punto de operación estrangulado tenga una relación de velocidad punta que sea mayor que la relación de velocidad punta del punto de operación normal.

Según una forma de realización se propone que el punto de operación de reserva se opere con una potencia de salida menor que el punto de operación normal. En el punto de operación de reserva, la instalación de energía eólica entrega menos potencia que en el punto de operación normal. Sin embargo, la potencia de salida en el punto de operación estrangulado sigue siendo menor que en el punto de operación de reserva. Por lo tanto, el punto de operación de reserva se encuentra entre el punto de operación estrangulado y el punto de operación normal en términos del nivel de potencia de salida. Cuando el funcionamiento de la instalación de energía eólica cambia del punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva, la potencia de salida aumenta, pero no hasta el valor del punto de operación normal.

Adicional o alternatively, se propone que el punto de operación de reserva tenga una relación de velocidad punta reducida en comparación con el punto de operación estrangulado. En el punto de operación de reserva, la instalación de energía eólica gira más lentamente que en el punto de operación estrangulado. De este modo se puede conseguir que, para aumentar la potencia de salida desde el punto de operación estrangulado hasta el punto de operación de reserva, inicialmente se pueda ganar potencia frenando la instalación de energía eólica.

Opcionalmente, está previsto que el punto de operación de reserva tenga una relación de velocidad punta aumentada en comparación con el punto de operación normal. En este caso, la relación de velocidad punta del punto de operación de reserva está por debajo de la del punto de operación estrangulado, pero por encima de la del punto de operación normal. En consecuencia, su velocidad rotacional está por debajo de la del punto de operación estrangulado y por encima de la del punto de operación normal.

También en este caso se reconoció que el retorno desde el punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva puede facilitarse mediante el aumento de la velocidad rotacional inicial. Además, se reconoció que en este sentido sería posible un cambio adicional del punto de operación de reserva al punto de operación normal con ayuda de energía cinética.

Según otra forma de realización se propone seleccionar el punto de operación estrangulado y/o el punto de operación de reserva en función de la distancia entre dos curvas isocaracterísticas en el punto de operación estrangulado o en el punto de operación de reserva o en función de un gradiente del coeficiente de potencia del punto de operación estrangulado o del punto de operación de reserva.

Cada curva isocaracterística representa un coeficiente de potencia. Cuanto más cerca están dos curvas isocaracterísticas, más cambia el coeficiente de potencia para el mismo cambio en un punto de operación en el diagrama $\lambda\theta$. Un pequeño cambio en el valor del ángulo de pala y/o el valor de la relación de velocidad punta de un punto de operación en el diagrama $\lambda\theta$ conduce así a un cambio rápido en el coeficiente de potencia cuando hay una pequeña distancia entre dos curvas isocaracterísticas en esta zona. Por lo tanto, se reconoció que el punto de operación estrangulado y el punto de operación de reserva pueden estar próximos entre sí, en particular cuando la distancia entre dos curvas isocaracterísticas es pequeña.

Por consiguiente, se propone seleccionar el punto de operación estrangulado y el punto de operación de reserva en función de una distancia entre dos curvas isocaracterísticas. Sin embargo, también puede ser suficiente que, en función de la distancia entre dos curvas isocaracterísticas, se seleccione sólo uno de estos dos puntos de operación.

Alternativamente, se puede seleccionar uno de los dos puntos de operación o ambos puntos de operación dependiendo de un gradiente del coeficiente de potencia del punto de operación estrangulado o del punto de operación de reserva. Cuanto mayor sea el gradiente del coeficiente de potencia en términos de magnitud, es decir, cuanto mayor sea la pendiente del coeficiente de potencia del punto de operación en cuestión, más cerca pueden estar entre sí el punto de operación estrangulado y el punto de operación de reserva. A este respecto, se puede considerar el gradiente del coeficiente de potencia del punto de operación estrangulado para seleccionar el punto de operación estrangulado o se puede considerar el gradiente del coeficiente de potencia del punto de operación de reserva para seleccionar el punto de operación de reserva. En particular, se propone seleccionar el punto de operación estrangulado y/o el punto de operación de reserva en el lugar en el que el gradiente del coeficiente de potencia sea de magnitud particularmente grande.

Como gradiente del coeficiente de potencia se puede elegir preferentemente una derivada del coeficiente de potencia exclusivamente en función del ángulo de pala. Aquí se reconoció particularmente que una derivada de gran magnitud del coeficiente de potencia basada en el ángulo de pala caracteriza una zona en la que se pueden lograr grandes

cambios en el coeficiente de potencia con pequeños cambios en el ángulo de pala, lo que resulta en grandes diferencias en la potencia de salida correspondiente de los puntos de operación relevantes.

Sin embargo, también se puede elegir una pendiente que se derive del ángulo de pala y también de la relación de velocidad punta. Para una dimensión comparable entre el ángulo de pala y la relación de velocidad punta, puede tener sentido normalizar el ángulo de pala a un grado angular completo. En la representación del diagrama $\lambda\theta$, la longitud de un grado de ajuste del ángulo de pala correspondería entonces a la longitud de un cambio en la relación de velocidad punta en el valor 1.

Según una realización, se propone seleccionar el punto de operación estrangulado y/o el punto de operación de reserva de tal manera que una derivada del coeficiente de potencia del punto de operación estrangulado o del punto de operación de reserva en función del ángulo de pala supere un valor derivado mínimo predeterminado. Por lo tanto, aquí se considera la derivación del coeficiente de potencia en función del ángulo de pala. Cuanto mayor sea la magnitud de esta derivada, más cambia el coeficiente de potencia con un cambio en el ángulo de pala. Como resultado, se puede lograr un gran cambio en el coeficiente de potencia con un pequeño cambio en el ángulo de pala si se elige que esta derivada sea correspondientemente grande. Por lo tanto, se utiliza un valor derivado mínimo predeterminado como base para la magnitud de la derivada. Esto también se puede utilizar para especificar una medida cuantitativa.

En particular, es de esperar que el coeficiente de potencia disminuya al aumentar el ángulo de pala. Esto se debe en particular al hecho de que a menudo se utiliza un ángulo de pala de 0° o unos pocos grados como base para un punto de operación de rendimiento óptimo. Sin embargo, para el punto de operación estrangulado y eventualmente también para el punto de operación de reserva está prevista una producción de potencia reducida. Por lo tanto, la potencia de salida es menor mientras que el ángulo de pala aumenta. Por lo tanto, se considera la magnitud de la derivada porque su valor absoluto podría ser negativo.

Aquí también la idea subyacente es que, con una derivada grande del coeficiente de potencia, se puede lograr un gran cambio en la potencia cambiando sólo ligeramente el ángulo de ataque. Esto puede ser ventajoso tanto para el punto de operación estrangulado como para el punto de operación de reserva. En particular, según una forma de realización se propone para ambos puntos de operación, lo que garantiza que el cambio del punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva pueda realizarse con relativa rapidez. La duración del cambio entre estos dos puntos de operación, es decir, en particular la duración del cambio del punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva, puede determinarse en particular mediante el tiempo necesario para el ajuste necesario del ángulo de pala.

Preferiblemente, el valor derivado mínimo para el punto de operación del estrangulador es de al menos $0,05/1^\circ$. Aquí se reconoció especialmente que el coeficiente de potencia lógicamente puede reducirse desde un máximo físico de poco más de 0,45 a cero como máximo. La variación del coeficiente de potencia en un valor de 0,3 es, por tanto, una reducción significativa de la potencia o una reducción significativa del coeficiente de potencia. Se sugiere que la pala del rotor se ajuste en un máximo de 6° para lograr dicho cambio en el coeficiente de potencia. Esto da como resultado el valor derivado mínimo sugerido, concretamente mediante el cálculo: $0,3/6^\circ = 0,05/1^\circ$. Esto significa que la pala del rotor debe ajustarse como máximo 6° para lograr un cambio en el coeficiente de potencia de 0,3.

Adicional o alternativamente, se sugiere que el valor derivado mínimo para el punto de operación de la reserva sea de al menos $0,1/6^\circ$. Se reconoció aquí que, si bien para el punto de operación de reserva también puede tener sentido una derivada grande del coeficiente de potencia en función del ángulo de pala, sin embargo, en el punto de operación de reserva puede tener una magnitud algo menor que en el punto de operación estrangulado. Esto se basa particularmente en el conocimiento de que el punto de operación de reserva tiene un coeficiente de potencia mayor que el punto de operación estrangulado. El punto de operación de reserva está por tanto más cerca del punto de operación óptimo o del punto de operación normal en relación al coeficiente de potencia. También se reconoció que puede ser particularmente importante cambiar rápidamente la potencia a partir del punto de operación estrangulado en respuesta a una solicitud de incremento de potencia. Por lo tanto, la modificación del punto de operación estrangulado debe ser preferentemente más dinámica que en el punto de operación de reserva.

Según una realización, el procedimiento se caracteriza porque la instalación de energía eólica puede caracterizarse por un campo de curvas características compuesto por curvas isocaracterísticas en el diagrama $\lambda\theta$. Por lo tanto, existen muchas curvas isocaracterísticas, a cada una de las cuales se le asigna un coeficiente de potencia, es decir, un valor C_p . En este caso, la instalación eólica se describe de forma habitual mediante un campo de curvas características de este tipo en el diagrama $\lambda\theta$, al menos de la manera ya explicada anteriormente.

Se propone además que el campo de curvas características pueda definirse como un campo de curvas características normalizado en el que el ángulo de pala está normalizado a grados enteros ($^\circ$). Esto permite definir un gradiente en el campo de curvas características que no depende de la elección de la unidad física. Así, por ejemplo, una variación de

la relación de velocidad punta de un valor 1 equivale a una variación del ángulo de pala de 1° en términos de tamaño, lo que se consideró apropiado.

En el campo de curvas características normalizado, se forma una primera subregión en la que los ángulos de pala son mayores que el ángulo de pala del punto de operación normal, y las curvas isocaracterísticas tienen un gradiente de curva característica negativo, en la que la relación de velocidad punta disminuye a medida que el ángulo de pala aumenta. Por lo tanto, solo se considera esta zona, que se encuentra claramente en el campo de curvas características en la parte superior derecha cuando los ángulos de pala se representan con valores crecientes en las abscisas y las relaciones de velocidad punta se representan con valores crecientes en las ordenadas.

Se aplica que en el campo de curvas características normalizado, cada punto de operación se caracteriza por un valor de gradiente que cuantifica la pendiente máxima del coeficiente de potencia del punto de operación en el campo de curvas características normalizado. A este respecto, se utiliza aquí una definición habitual de gradiente. Por lo tanto, el gradiente describe en qué dirección cambia más el coeficiente de rendimiento. Esto puede ser en la dirección del ángulo de pala, en la dirección de la relación de velocidad punta número, pero especialmente en una dirección compuesta por estas dos direcciones. Por tanto, la dirección está definida por la pendiente máxima. El valor asociado de la pendiente es el valor de gradiente. Por lo demás, la dirección del gradiente no se utiliza aquí y solo es necesaria para definir claramente el valor máximo del gradiente.

En esta primera subregión del campo de curvas características normalizado se encuentra para cada curva isocaracterística un punto de operación con un gradiente máximo. Todos estos puntos de operación, de los cuales se puede encontrar uno para cada curva isocaracterística, se pueden unir en una curva característica y a esta curva característica se la denomina curva característica de gradiente. De este modo se puede representar una curva característica de gradiente que une todos estos puntos de operación con el valor de gradiente máximo en la subregión positiva considerada.

Se propone ahora seleccionar el punto de operación estrangulado y/o el punto de operación de reserva de modo que se encuentren respectivamente en esta curva característica de gradiente. También en este caso se parte de la idea de que el punto de operación estrangulado y/o el punto de operación de reserva se encuentren en el rango de la mayor derivada posible del coeficiente de potencia, para poder conseguir una variación rápida y fuerte de la potencia con el mínimo cambio necesario en el ángulo de pala. Además, también se reconoció que esta pendiente máxima en relación con el ángulo de pala y la relación de velocidad punta en la primera subregión considerada caracteriza particularmente la zona en la que un pequeño cambio en el ángulo de pala conduce a un gran cambio en el coeficiente de potencia. Por lo tanto, el cambio en la potencia se puede lograr mediante un ligero ajuste de la pala y, por lo tanto, se puede lograr rápidamente.

Por ello se propone definir esta curva característica de gradiente, ya que allí la derivada del coeficiente de potencia en función del ángulo de pala es mayor. A través de la definición o representación de esta curva característica de gradiente se puede ilustrar claramente esta zona. Si tanto el punto de operación estrangulado como el punto de operación de reserva se eligen de modo que se encuentren en esta curva característica de gradiente, el cambio del punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva se puede realizar preferiblemente a lo largo de esta curva característica de gradiente. Al menos en términos de ajuste de las palas, se trata de una solución optimizada para un cambio lo más rápido posible entre el punto de operación estrangulado y el punto de operación de reserva.

Si no se elige exactamente la curva característica de gradiente para la selección del punto de operación estrangulado y/o del punto de operación de reserva, la solución encontrada puede que ya no sea óptima, pero no obstante puede ser una buena solución y por ello se propone, al menos según una realización, utilizar el punto de operación estrangulado y/o el punto de operación de reserva a seleccionar al menos en una banda de gradiente que incluye la curva característica de gradiente. Esto también permite tener en cuenta condiciones límite adicionales, ya que la elección de un punto de operación en la banda en lugar de en una curva característica crea cierta libertad para realizar modificaciones.

Por ejemplo, las consideraciones relativas al desgaste de la instalación de energía eólica pueden verse como una condición límite. De esta manera también se pueden implementar adaptaciones. En particular, sucede que el campo de curvas características está sujeto a ligeras modificaciones, ya que, por ejemplo, puede variar ligeramente debido a suciedad en las palas de rotor. Mediante una elección adecuada en la banda de gradiente, se puede tener en cuenta de manera sencilla tal condición límite y/o tal variación, manteniendo al mismo tiempo la idea de elegir el punto de operación estrangulado y/o el punto de operación de reserva al menos en las proximidades de la curva característica de gradiente para poder hacerlo. Un pequeño cambio en el ángulo de pala puede lograr un gran cambio en el coeficiente de potencia.

Una banda de gradiente de este tipo tiene un límite de banda superior, que se encuentra por encima de la curva característica de gradiente en una diferencia de relación de velocidad punta. Además, la banda de gradiente tiene un

límite de banda inferior, que se encuentra por debajo de la curva característica de gradiente en una diferencia de relación de velocidad punta inferior. Por lo tanto, se propone formar la banda de gradiente desplazando la curva característica de gradiente hacia arriba en un valor en la dirección de la relación de velocidad punta para formar el límite superior de la banda, y desplazándola hacia abajo en un valor igual o diferente en relación con la relación de velocidad punta, para formar el límite de la banda inferior.

Preferiblemente, la diferencia de relación de velocidad punta superior e inferior tienen cada una un valor máximo de 2. Entonces, si la curva característica de gradiente tiene en un punto el valor 9 para la relación de velocidad punta, la banda de gradiente puede estar en el rango entre los valores 7 y 11 para la relación de velocidad punta. Sin embargo, la diferencia de relación de velocidad superior e inferior también puede tener valores diferentes.

Con respecto a la sugerencia de elegir un máximo de valor 2, en particular un máximo de 1, se reconoció que un cambio en la relación de velocidad punta alrededor del rango del valor 2 en la zona de la curva característica de gradiente solo conduce a moderados cambios en la derivada del coeficiente de potencia según el ángulo de pala. Por lo tanto, un cambio de un máximo de +2 o -2 en la relación de velocidad punta aún puede preservar el carácter del campo de curvas características de modo que la derivada del coeficiente de potencia según el ángulo de pala aún puede considerarse alta. Con valores incluso mayores que el valor 2, los cambios en el respectivo punto de operación en el campo de curvas características pueden conducir a cambios significativos en el carácter del campo de curvas características, de modo que con valores correspondientemente mayores del cambio en la relación de velocidad punta, se considera una zona fuera de la banda de gradiente.

Alternativamente, se propone que la diferencia de relación de velocidad punta superior tenga un valor máximo de 1 y la diferencia de relación de velocidad punta inferior tenga un valor máximo de 4. Aquí los límites de la banda se eligen de forma diferente. Se reconoció que, en particular, debería evitarse una velocidad rotacional que fuera demasiado alta y, por lo tanto, una relación de velocidad punta alta para evitar un punto de operación inestable, de modo que la distancia para el límite de banda superior se elija para que sea estrecha. Este problema no existe para velocidades de rotación más bajas, al menos sólo para desviaciones de velocidad rotacional mucho mayores, por lo que aquí se consideró sensato un ancho de banda de 4.

Según una realización, se propone que la instalación de energía eólica tenga una primera potencia de salida, una primera energía de rotación y un primer ángulo de pala en el punto de operación estrangulado, y que tenga una segunda potencia de salida, una segunda energía de rotación y una segunda pala. ángulo en el punto de operación de reserva. La primera potencia de salida es menor que la segunda potencia de salida y una diferencia entre la segunda potencia de salida y la primera potencia de salida forma un diferencial de potencia de salida de los puntos de operación. Además, la primera energía rotacional es mayor que la segunda energía rotacional y una diferencia entre la primera y la segunda energía rotacional forma un diferencial de energía rotacional. Estas propiedades de los puntos de operación o las propiedades de la instalación eólica en estos puntos de operación son la base para un examen posterior, en particular para la elección de al menos uno de los puntos de operación.

Además, se tiene en cuenta que se requiere un tiempo de ajuste de palas para ajustar las palas de rotor desde el primer ángulo de pala hasta el segundo ángulo de pala. Este tiempo de ajuste de las palas depende de la velocidad de ajuste de las palas de rotor de la instalación de energía eólica y también depende del valor en el que se diferencian los ángulos de pala entre el punto de operación estrangulado y el punto de operación de reserva, es decir, en qué valor deben girar las palas.

Un producto del diferencial de potencia de salida y el tiempo de ajuste de palas multiplicado por 50% forma un diferencial de energía característico. La mitad del producto del diferencial de potencia de salida por el tiempo de ajuste de la pala es este diferencial de energía característico. Este diferencial de energía característico, al que aquí también podemos denominar simplemente diferencial de energía, es inicialmente una definición del término. Pero también tiene el siguiente significado físico.

Si la instalación de energía eólica se ajusta desde el punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva, donde se cumplen los supuestos o definiciones nombrados anteriormente, la potencia de salida aumenta. Idealmente, aumenta linealmente con el tiempo, especialmente cuando las palas del rotor se ajustan uniformemente y la potencia de salida también aumenta en proporción al ajuste de las palas de rotor. Partiendo del valor inicial, es decir, la potencia de salida del punto de operación estrangulado, la potencia de salida en la zona de transición está un valor diferencial por encima de la potencia de salida del punto de operación estrangulado y, en el caso ideal mencionado, este valor diferencial aumenta linealmente con tiempo hasta alcanzar la potencia de salida del punto de operación de reserva. Si durante este tiempo se integra este valor diferencial de la potencia de salida, se obtiene el diferencial de energía característico. Si se supone un aumento lineal, el diferencial de energía es la integración de la diferencia en la potencia de salida durante el tiempo en que ocurre el cambio del punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva.

Basándose en este hallazgo, ahora se propone seleccionar el punto de operación del estrangulador y/o el punto de operación de reserva de modo que el diferencial de energía rotacional corresponda al diferencial de energía característico.

5 Por lo tanto, el punto de operación estrangulado y/o el punto de operación de reserva se seleccionan de tal manera que presenten velocidades de rotación diferentes y se seleccionan entre sí de tal manera que se establezca un diferencial de energía rotacional. Este diferencial de energía rotacional se basa en el diferencial de energía característico, es decir, la energía que caracteriza la transición desde el punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva.

10 La idea detrás de esta elección es que, idealmente, en respuesta a la solicitud de incremento de potencia, este aumento de potencia se proporcionará inmediatamente. Idealmente, el rendimiento totalmente aumentado no debería estar disponible solo cuando se alcance el punto de operación de reserva. Por consiguiente, se propone seleccionar estos puntos de operación de modo que la potencia aumentada pueda proporcionarse inmediatamente a partir del diferencial de energía rotacional para este punto de transición en el tiempo. En particular, toda la diferencia de potencia puede obtenerse de la energía de rotación al inicio del cambio. Durante la transición desde el punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva, la potencia generada por el viento también aumenta gradualmente y, por tanto, la proporción de energía rotacional necesaria para proporcionar el diferencial de potencia se acerca gradualmente a cero hasta que se alcanza el punto de operación de reserva.

20 Para lograr esto, el punto de operación estrangulado se puede configurar de manera que el diferencial de energía rotacional se establezca en relación con un punto de operación de reserva dado, o el punto de operación de reserva se pueda configurar de manera que el diferencial de energía rotacional se establezca en relación con el punto de operación estrangulado dado. Sin embargo, ambos puntos de operación también se pueden ajustar juntos o seleccionarse de modo que se establezca el diferencial de energía rotacional.

25 También se tiene en cuenta que los dos puntos de operación, o aquel de los dos que se ajusta, se encuentran en un proceso iterativo. En particular, se reconoció que no sólo los puntos de operación deben seleccionarse de modo que el diferencial de energía rotacional alcance un cierto valor, sino también que el diferencial de energía característico relevante para esto depende del tiempo de ajuste de la pala y, por lo tanto, también depende de los puntos de operación seleccionados.

30 Sin embargo, también se reconoció que la transición desde el punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva puede no ser idealmente lineal. En consecuencia, se propone que el punto de operación estrangulado y/o el punto de operación de reserva se seleccionen de manera que el diferencial de energía rotacional esté como máximo un valor de desviación porcentual predeterminado por encima o por debajo del diferencial de energía característico. Preferiblemente se sugiere que el valor de desviación porcentual sea como máximo del 60 %, preferiblemente como máximo el 40 %, en particular como máximo el 20 %. Esto nos permite tener en cuenta que la transición no es idealmente lineal. Además, en el caso de un proceso iterativo, éste también puede finalizar antes si, por ejemplo, se permite una desviación del 20 %.

35 Sin embargo, se sugiere que el valor de desviación porcentual sea como máximo del 60%. De esta manera se garantiza que la elección de los puntos de operación o de al menos uno de los puntos de operación se base en el diferencial de energía rotacional y también el diferencial de energía característico, de modo que se pueda aprovechar el efecto descrito sin que una desviación demasiado grande conduzca a un punto de operación, que tenga en particular una velocidad rotacional innecesariamente alta o innecesariamente baja.

40 Para ello puede ser suficiente preferentemente una desviación del 40%. Esto se recomienda especialmente cuando las condiciones límite son comparativamente bien conocidas, en particular los cambios de potencia en la zona de transición desde el punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva. Si se conocen especialmente bien estas transiciones y, por tanto, se conoce especialmente bien el campo de curvas características y también si se puede suponer un comportamiento lineal o casi lineal en la zona de transición, una desviación máxima del 20 % es ventajosa.

45 Según una realización, se propone que, para ajustar el punto de operación estrangulado, en particular a partir del punto de operación normal, en primer lugar, se establezca en un primer paso de ajuste un punto de operación intermedio, teniendo el punto de operación intermedio el mismo valor C_p que el punto de operación estrangulado, al menos un valor de C_p que varía menos del 20%. Así, partiendo del punto de operación normal u otro punto de partida desde el que se debe implementar la solicitud de estrangulación, el punto de operación estrangulado no se controla directamente, es decir, de la manera más directa. En lugar de ello, se selecciona inicialmente un punto de operación intermedio que ya tenga el mismo valor C_p que el punto de operación estrangulado que finalmente debe controlarse. A partir de ahí, manteniendo el valor de C_p , se cambia el punto de operación del punto de operación intermedio al punto de operación estrangulado.

En particular, se reconoció aquí que la reducción de potencia se puede implementar cambiando el punto de operación al punto de operación intermedio. Aquí, por ejemplo, se puede encontrar un punto de trabajo con baja velocidad rotacional sin necesidad de ajustar el ángulo de pala. Un punto de operación de este tipo también puede conducir a un menor desgaste debido a la menor velocidad rotacional. Un punto de operación de este tipo puede establecerse, por ejemplo, aumentando inicialmente ligeramente la potencia de salida desde el punto de operación normal, por ejemplo, en un pequeño porcentaje, o solo en un uno por ciento. Esta potencia es entonces mínimamente superior a la potencia máxima que puede generar el viento en ese momento. Esto hace que la velocidad rotacional baje. Esto cambia el punto de operación y deja el rango óptimo. Esto significa que el coeficiente de potencia se deteriora y el punto de operación pasa al punto de operación intermedio.

Sin embargo, el punto de operación intermedio no es muy adecuado para volver a aumentar rápidamente la potencia en respuesta a una solicitud de incremento de potencia. Particularmente si la velocidad rotacional del punto de operación intermedio es baja, hay poca o ninguna energía de impulso disponible para aumentar la potencia a corto plazo y temporalmente.

Sin embargo, se reconoció que no se puede esperar tal solicitud de incremento de potencia inmediatamente después de un cambio al punto de operación intermedio. En particular, se propone que el punto de operación intermedio sólo se active si se sabe o se espera que no se produzca una solicitud de incremento de potencia. Esto es particularmente conocido o esperable cuando el operador de la red opera la red de suministro eléctrico en un modo en el que no está prevista una solicitud de incremento de potencia. En particular, la solicitud de incremento de potencia puede configurarse de tal manera que la instalación de energía eólica deba reaccionar ante una caída de frecuencia. Esto también puede denominarse modo de control de frecuencia o modo con control P(f). Sin embargo, el operador de red puede excluir o desactivar temporalmente dicho modo.

La instalación de energía eólica puede entonces cambiar al punto de operación intermedio y, en caso necesario, funcionar en este punto de operación intermedio durante un periodo de tiempo más largo, es decir, mientras el modo de control de frecuencia no esté activo.

Al mismo tiempo está previsto, sin embargo, que el punto de operación intermedio tenga el mismo valor C_p que el punto de operación estrangulado. Se reconoció que, frente a otras condiciones, en particular condiciones límite, el punto de operación inicialmente controlado con potencia de salida reducida no tiene por qué ser óptimo. Especialmente si el punto de operación debe poder reaccionar a una solicitud de incremento de potencia, porque, por ejemplo, el modo de control de frecuencia está activo o se va a activar próximamente, puede ser mejor seleccionar el punto de operación estrangulado.

Se propone por tanto que se controle en primer lugar el punto de operación intermedio y desde él, manteniendo el valor de C_p , se controle el punto de operación estrangulado o se realice un cambio hacia el punto de operación estrangulado. El punto de operación intermedio puede mantenerse inicialmente durante un periodo de tiempo más largo.

En particular, se propone que en un segundo paso o etapa de ajuste haya un cambio desde el punto de operación intermedio al punto de operación estrangulado y el cambio pueda representarse en el diagrama $\lambda\theta$ esencialmente como un cambio a lo largo de una curva isocaracterística. Al pasar del punto de operación intermedio al punto de operación estrangulado, el valor C_p se deja sin cambios, al menos con una desviación máxima del 20% del valor C_p de la curva isocaracterística del punto de operación estrangulado. En este sentido, pueden ser aceptables pequeñas variaciones del valor C_p , que en este caso están limitadas al 20%, y sirven especialmente para compensar pequeñas desviaciones que podrían surgir, por ejemplo, de una modificación de la aerodinámica de las palas del rotor debido a la contaminación.

Según una realización, se propone que la solicitud de estrangulación para solicitar el funcionamiento de la instalación de energía eólica en el punto de operación estrangulado esté configurada como una especificación externa que se recibe a través de una interfaz de datos, y/o que la solicitud de incremento de potencia para solicitar la operación de la instalación de energía eólica en el punto de operación de reserva se configure como una prescripción de reacción a un estado de la red de suministro eléctrico detectado por la instalación de energía eólica. En particular, la solicitud de incremento de potencia está configurada como prescripción para realizar un aumento de potencia a partir del punto de operación estrangulado en función de una frecuencia de red detectada de la red de suministro eléctrico.

En particular, se reconoció que pueden existir dos solicitudes completamente diferentes y los dos puntos de operación están adaptados a ello.

Por tanto, el punto de operación estrangulado se selecciona si existe una especificación externa que también puede recibirse a través de una interfaz de datos. Esto ya implica que el requisito de estrangulación es comparativamente a

largo plazo. Por ejemplo, dicha solicitud de estrangulación puede ser aquella en la que el operador de red solicita una reducción en la potencia de salida durante un período de 15 minutos o más. A continuación, se controla el punto de operación estrangulado y la instalación de energía eólica funciona allí durante este período de tiempo más largo.

En este sentido, la solicitud de incremento de potencia es más bien una solicitud rápida. Aquí existe una prescripción para reaccionar ante una condición o estado de la red de suministro eléctrico. Especialmente una caída de la frecuencia puede provocar un aumento de potencia. Por ejemplo, la caída de la frecuencia de la red por debajo de un primer límite de frecuencia inferior puede provocar que la instalación de energía eólica tenga que aumentar su potencia en menos de 40 ms. Una solicitud de corta duración de este tipo a menudo no permite la transmisión y el procesamiento correspondiente de una señal de solicitud correspondiente. Cabe señalar que, si se quisiera transmitir una señal de este tipo externamente, este evento de frecuencia tendría que detectarse primero en la ubicación externa correspondiente.

En cambio, la instalación de energía eólica está preparada para reaccionar ante tal evento de frecuencia lo más rápido posible. Aquí puede haber una separación en la red de suministro eléctrico a través de la cual se desconectó un suministro de potencia. Esto también puede significar desconectar una central eléctrica de alimentación. Se produce entonces un déficit de potencia espontáneo en la red de suministro eléctrico y la red reacciona inmediatamente con una caída de frecuencia y la instalación de energía eólica puede a su vez detectar esta caída de frecuencia y también debe reaccionar inmediatamente y aumentar la potencia.

En este caso se reconoció especialmente que el punto de operación estrangulado y el punto de operación de reserva deberían adaptarse de manera ventajosa a estos dos tipos diferentes de solicitudes. En particular, el punto de operación estrangulado está diseñado como punto de operación a largo plazo. El punto de operación de reserva puede estar diseñado como punto de operación de corta duración y, en particular, el punto de operación estrangulado y/o el punto de operación de reserva debe elegirse de modo que pueda tener lugar rápidamente un cambio del punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva, en particular que la potencia se aumente hasta esta solicitud de aumento de potencia lo más rápido posible.

Además, también se deben establecer criterios de monitorización adecuados, a saber, la evaluación de las señales externas correspondientes para el punto de operación estrangulado y el correspondiente seguimiento permanente de la frecuencia de la red o, si es necesario, de otras variables de estado de la red de suministro eléctrico para el punto de operación de reserva. Una magnitud de estado de este tipo de la red de suministro eléctrico puede ser, además de la variante mencionada del cambio de frecuencia, en particular también un salto de fase y/o una variación de la tensión de la red en su amplitud de tensión. Según una forma de realización se propone que la instalación eólica opere durante un período de tiempo más largo en el punto de operación estrangulado que en el punto de operación de reserva. En particular está previsto que opere en el punto de operación estrangulado durante al menos 20 veces más tiempo que en el punto de operación de reserva.

Aquí se reconoció que el punto de operación estrangulado está destinado a una reducción de potencia más prolongada. Está especialmente adaptado a un caso en el que una solicitud de estrangulación exige una reducción de potencia durante al menos un cuarto de hora, pero sobre todo durante un período de tiempo mucho más largo. Por lo tanto, el punto de operación estrangulado debe ajustarse y diseñarse a largo plazo. Esto no descarta la posibilidad de que, por ejemplo, se produzca repentinamente una solicitud de incremento de potencia después de apenas un minuto; Sin embargo, esto conduce a un aumento de potencia a muy corto plazo. El punto de operación puede entonces volver al punto de operación estrangulado.

El punto de operación de reserva, por el contrario, está destinado a respaldar el rendimiento a corto plazo y por un tiempo corto. Especialmente en respuesta a una caída de frecuencia, esto debería conducir a un aumento de potencia lo más rápido posible. Por lo tanto, es preferible la reacción a una incidencia en la red eléctrica, que también puede denominarse fallo. Estos errores a menudo se pueden corregir en unos pocos segundos y el punto de operación de reserva debería proporcionar soporte en este momento. Sin embargo, si este error persiste durante un poco más de tiempo, naturalmente el punto de operación de reserva se puede mantener durante un tiempo correspondientemente mayor.

Según la invención se propone también una instalación eólica según la reivindicación 10. Esto tiene

- un rotor con palas de rotor cuyo ángulo de pala (Θ) es ajustable, donde el rotor se puede operar con una velocidad rotacional variable, y donde

- la instalación de energía eólica se puede operar en un rango de carga parcial en el que no hay suficiente viento para operar la instalación de energía eólica con potencia nominal,

- la instalación de energía eólica se puede operar en un punto de operación que puede especificarse de forma variable, y

- el punto de operación se caracteriza por el ángulo de pala (θ) y una relación de velocidad punta (λ), y donde

- el punto de operación se puede representar en un diagrama $\lambda\theta$, donde

- en el diagrama $\lambda\theta$, la relación de velocidad punta (λ) se representa frente al ángulo de pala (θ), y

- el punto de operación se puede representar en el diagrama $\lambda\theta$ como un par de valores compuesto por su ángulo de pala (θ) y su relación de velocidad punta (λ), donde

- a cada punto de operación se le asigna un coeficiente de potencia (valor C_p), y

- una pluralidad de puntos de operación con el mismo valor de C_p se pueden representar como una curva isocaracterística en el diagrama $\lambda\theta$,

y la instalación de energía eólica tiene un dispositivo de control, preparado para operar la instalación de energía eólica en el rango de carga parcial, y para ello preparado

- para operar la instalación de energía eólica en un punto de operación normal en el que la instalación de energía eólica no se opera de forma estrangulada si no hay una solicitud de estrangulación,

- para operar la instalación de energía eólica en un punto de operación estrangulado, en el que, en respuesta a una solicitud de estrangulación, la instalación de energía eólica se opera con potencia de salida estrangulada en comparación con la del punto de operación normal, y

- para cambiar la operación de la instalación de energía eólica desde el punto de operación estrangulado a un punto de operación de reserva, en el que, como reacción a una solicitud de incremento de potencia, la instalación de energía eólica se opera con una mayor potencia de salida en comparación con el punto de operación estrangulado, donde

la operación de la instalación de energía eólica está implementada de tal manera que

- el punto de operación estrangulado tiene una relación de velocidad punta aumentada en comparación con el punto de operación de reserva, y

- el punto de operación estrangulado se encuentra en una curva isocaracterística asociada en el diagrama $\lambda\theta$, y la curva isocaracterística asociada tiene, en el punto de operación estrangulado, un gradiente de curva característica negativo en el que la relación de velocidad punta disminuye a medida que aumenta el ángulo de pala, donde el gradiente de curva característica en el punto de operación estrangulado disminuye con un valor que es al menos $0,5/1^\circ$ en términos de valor absoluto.

Por lo tanto, la instalación de energía eólica tiene un dispositivo de control y está preparada para operar la instalación de energía eólica en el rango de carga parcial y para operarla de tal manera que la instalación de energía eólica opere en un punto de operación normal, opere en un punto de operación estrangulado u opere en un punto de operación de reserva, dependiendo de la solicitud o requerimiento. Esto también incluye cambiar la operación de la instalación de energía eólica desde el punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva, si existe una solicitud de incremento de potencia correspondiente. Todo esto se implementa en el dispositivo de control. En particular, para ello se puede almacenar e implementar un programa correspondiente. Las especificaciones concretas para los respectivos puntos de operación también pueden respaldarse mediante relaciones funcionales correspondientes. De forma adicional o alternativa, se pueden almacenar diferentes puntos de operación para diferentes velocidades del viento y seleccionarse en función de la velocidad del viento y de las solicitudes. Los puntos intermedios, es decir, los puntos de operación para velocidades del viento para los que no está memorizado ningún punto de operación, se pueden determinar mediante interpolación a partir de puntos de operación vecinos.

En particular, la operación de la instalación de energía eólica se implementa de tal manera que el punto de operación estrangulado tiene una relación de velocidad punta mayor en comparación con el punto de operación de reserva y el punto de operación estrangulado en el diagrama $\lambda\theta$ se encuentra en una curva isocaracterística asociada y la curva isocaracterística asociada en el punto de operación estrangulado tiene una pendiente de curva característica negativa, en la que la relación de velocidad punta disminuye al aumentar el ángulo de pala. Todas estas relaciones se pueden implementar funcionalmente y/o almacenando puntos de operación que cumplan estos criterios en función de la velocidad del viento.

En particular, se propone que la instalación de energía eólica, en particular el dispositivo de control, esté preparado para llevar a cabo un procedimiento según una de las realizaciones descritas anteriormente. En particular, en el dispositivo de control está implementado el correspondiente procedimiento de control.

5 Según una forma de realización se propone proporcionar una interfaz de datos para recibir y evaluar una señal externa como especificación externa de la solicitud de estrangulación. Por lo tanto, la solicitud de estrangulación se puede transmitir como señal externa y, por lo tanto, como especificación externa desde el exterior, por ejemplo, de un operador de red. Una señal de este tipo se recibe y evalúa a través de la interfaz de datos. Al menos la evaluación se realiza de tal manera que la señal recibida se reconozca como una solicitud de estrangulación y luego pueda procesarse posteriormente en el dispositivo de control.

También se propone proporcionar un dispositivo de detección para detectar y evaluar un estado de la red de suministro eléctrico. Un dispositivo de detección de este tipo puede estar previsto en particular como dispositivo de detección rápida de tensión, con el que se detecta, por ejemplo, la tensión de red y, con ello, en particular su frecuencia, en los correspondientes bornes de conexión de la instalación eólica. Un estado registrado de esta manera también se evalúa para comprobar si existe una solicitud de incremento de potencia como prescripción para reaccionar ante el estado detectado. Por ejemplo, se evalúa la tensión detectada en relación con su frecuencia y se comprueba si esta frecuencia tiene un valor tal, en particular una desviación tal del estado normal, que se pueda evaluar de tal manera que exista una solicitud de incremento de potencia. A continuación, se responde en consecuencia a dicha solicitud de incremento de potencia.

Según una realización, se propone que esté prevista una memoria de control y en la memoria de control se almacenen prescripciones de control para la operación de la instalación de energía eólica según al menos un procedimiento según una realización descrita anteriormente. De este modo se pueden almacenar las correspondientes prescripciones de control en la memoria de control.

Adicional o alternativamente, se propone que los puntos de operación que dependen de la velocidad del viento se almacenen en la memoria de control, es decir, estén guardados. En particular, esto se propone para varias velocidades del viento y para cada una de estas diferentes velocidades del viento están memorizados un punto de operación normal, un punto de operación estrangulado y un punto de operación de reserva. Estos tres puntos de operación se seleccionan en consecuencia de modo que cumplan las relaciones entre estos tres puntos de operación descritas anteriormente. Por consiguiente, estos puntos de operación para diferentes velocidades del viento se pueden determinar e implementar antes la puesta en funcionamiento de una instalación de energía eólica. Estos puntos de operación se pueden comprobar, por ejemplo, en simulaciones, para comprobar si se cumplen los criterios. También es posible comprobar los puntos de operación durante la operación actual de la instalación de energía eólica en un proceso offline, para tener en cuenta, por ejemplo, las propiedades modificadas detectadas de la instalación de energía eólica. Estos puntos de operación predeterminados se pueden implementar entonces en la instalación de energía eólica.

La invención se explica a continuación con más detalle utilizando ejemplos de realización con referencia a las figuras adjuntas.

Figura 1 Muestra una instalación de energía eólica en una vista en perspectiva.

Figura 2 Muestra un diagrama potencia-velocidad rotacional para diferentes velocidades del viento.

Figura 3 Muestra un diagrama $\lambda\theta$.

Figura 4 Muestra un diagrama de tiempos para ilustrar una transición desde un punto de operación estrangulado a un punto de operación de reserva.

La figura 1 muestra una representación esquemática de una instalación de energía eólica según la invención. La instalación de energía eólica 100 tiene una torre 102 y una góndola 104 en la torre 102. En la góndola 104 está previsto un rotor aerodinámico 106 con tres palas de rotor 108 y un spinner 110. Durante la operación de la instalación de energía eólica, el viento hace que el rotor aerodinámico 106 gire y, por lo tanto, también hace girar un rotor electrodinámico o un rotor de un generador, que está acoplado directa o indirectamente al rotor aerodinámico 106. El generador eléctrico está dispuesto en la góndola 104 y genera energía eléctrica. Los ángulos de paso de las palas del rotor 108 se pueden cambiar mediante motores de paso en las raíces de las palas de rotor 109 de las respectivas palas de rotor 108.

La instalación de energía eólica 100 tiene un generador eléctrico 101, que está indicado en la góndola 104. La potencia eléctrica se puede generar usando el generador 101. Para alimentar potencia eléctrica está prevista una unidad de alimentación 105, que puede estar configurada específicamente como inversor. De este modo se puede generar una

corriente de alimentación trifásica y/o una tensión de alimentación trifásica en función de la amplitud, la frecuencia y la fase para la alimentación a un punto de conexión a red PCC. Esto se puede hacer directamente o junto con otras instalaciones de energía eólica en un parque eólico. Se proporciona un controlador de instalación 103 para controlar la instalación de energía eólica 100 y también la unidad de alimentación 105. El control de instalación 103 también puede recibir valores predeterminados desde el exterior, en particular desde un ordenador central de parque

La Figura 2 muestra un diagrama en el que se dibujan curvas características para diferentes velocidades del viento, que muestran la relación entre la potencia del rotor P y la velocidad rotacional del rotor n . Se muestran las curvas características $k_3 - k_{13}$. El índice se refiere al valor de velocidad del viento asociado, es decir, de 3 m/s para k_3 a 13 m/s para k_{13} . Se puede observar que para cada una de las curvas características $k_3 - k_{13}$ la potencia P que se puede generar inicialmente aumenta al aumentar la velocidad rotacional n hasta alcanzar un máximo. A partir del máximo, la potencia P vuelve a disminuir a medida que aumenta la velocidad rotacional n . Para un funcionamiento óptimo, es decir, para un coeficiente de potencia óptimo y , por tanto, una generación máxima de potencia la instalación eólica se hace funcionar en el máximo de las curvas características.

Esto se muestra como la curva característica operativa óptima 200 en la Figura 2. Sin embargo, la instalación de energía eólica no puede funcionar a cualquier velocidad rotacional alta, sino que no debe exceder una velocidad rotacional nominal n_N . Esta velocidad rotacional nominal n_N se muestra en el diagrama. Para velocidades del viento de 10 m/s, el máximo de la curva característica relevante, es decir, la característica k_{10} , se encuentra aproximadamente en el rango de la velocidad nominal. Para curvas características con velocidades de viento más altas, es decir, para las curvas características $k_{11} - k_{13}$, los máximos se encuentran a velocidades rotacionales más altas y, en consecuencia, la curva característica de funcionamiento óptima cambia cuando se alcanza el máximo de la curva característica k_{10} y a partir de ese momento discurre verticalmente. A partir de ese momento, la instalación de energía eólica ya no funciona de manera óptima, concretamente, para protegerla contra sobrecargas.

La curva característica de funcionamiento óptima 200 se refiere por lo tanto al rango de carga parcial hasta este punto de cambio en la curva característica k_{10} , en el que la instalación eólica todavía no puede generar la potencia máxima. En este sentido, la zona vertical es una curva característica regulada 220.

Por lo tanto, se reconoció particularmente que, para velocidades de viento bajas, se tienen en cuenta tanto un aumento de la velocidad rotacional como una reducción de la velocidad rotacional para reducir la potencia. En particular, se reconoció que esto permite aprovechar un grado de libertad al seleccionar un punto de operación estrangulado.

La Figura 3 muestra un diagrama $\lambda\theta$ o una sección del mismo. La relación de velocidad punta λ se muestra en ordenadas y el ángulo de pala θ en abscisas con unidades de grados ($^\circ$). Por lo tanto, la relación de velocidad punta sin unidades λ se representa frente al ángulo de pala θ . En el diagrama $\lambda\theta$ también se introducen las curvas isocaracterísticas $E_{0,45}$ a $E_{0,00}$. El índice indica el coeficiente de potencia asociado de la curva característica correspondiente. Por tanto, el coeficiente de potencia de la curva isocaracterística $I_{0,45}$ es 0,45. Las curvas isocaracterísticas se dibujan comenzando con un valor de C_p de 0,45 en pasos iguales de 0,05 hasta el valor de C_p de 0,05 y el valor final de 0,00. Por tanto, la diferencia en el valor C_p entre dos curvas isocaracterísticas adyacentes es siempre 0,05.

En el diagrama también se muestra una curva característica de operación de instalación 300. Esta curva característica de operación de instalación 300 refleja la totalidad de los puntos de operación de la instalación de energía eólica, que surgen dependiendo de la velocidad del viento si no hay una solicitud de estrangulación especial. Un punto de operación óptimo 302 se encuentra prácticamente en el centro de la curva isocaracterística $I_{0,45}$ para un valor C_p de 0,45. Es probable que el valor C_p del punto de operación óptimo 302 sea ligeramente mayor. Aunque la curva característica de operación de instalación 300 es una curva característica a lo largo de la cual los puntos de operación pueden cambiar, aún puede darse el caso de que en el punto de operación óptimo 302 el funcionamiento de la instalación de energía eólica se lleve a cabo para un rango mayor de velocidades del viento. En otras palabras, en el punto de operación óptimo 302, un gran número de puntos de operación para diferentes velocidades del viento pueden estar prácticamente uno encima del otro.

Sin embargo, este punto de operación óptimo 302 puede variar con la velocidad del viento. Debido a las condiciones límite, se puede esperar que una relación de velocidad punta más alta tenga sentido con velocidades de viento muy bajas, por ejemplo, por debajo de 5 m/s. Por consiguiente, también puede tener sentido una ligera modificación del ángulo de pala θ . Para ilustrar esto, se muestra un punto de operación subóptimo 304 para bajas velocidades del viento o la rama de la curva característica de operación de instalación 300 cerca del punto de operación subóptimo 304 representa generalmente el funcionamiento a bajas velocidades del viento.

A altas velocidades del viento, hacia el final del rango de carga parcial y más allá, la relación de velocidad punta disminuirá a medida que aumenta la velocidad del viento. Al salir del rango de carga parcial, se aumenta entonces el

ángulo de pala θ para regular la instalación de energía eólica. Esto se caracteriza por la rama 306 de la curva característica regulada.

Hay muchas opciones para seleccionar un punto de operación estrangulado en caso de una solicitud de estrangulamiento, es decir, si la instalación de energía eólica debe entregar permanentemente menos potencia en el rango de carga parcial de la que podría generar con el viento. En primer lugar, idealmente partiendo del punto de operación óptimo 302, se debería encontrar un punto de operación en el que el coeficiente de potencia sea correspondientemente menor que en el punto de operación óptimo 302. Si, por ejemplo, la instalación de energía eólica debe generar aproximadamente la mitad de potencia en el punto de operación estrangulado que, en el punto de operación óptimo, se sugiere seleccionar el punto de operación estrangulado en la curva isocaracterística $I_{0,25}$. En consecuencia, en el diagrama de la figura 3 se muestra un punto de operación estrangulado 308 como ejemplo ilustrativo.

Además, está previsto un punto de operación de reserva 310, que tiene una potencia de salida mayor que el punto de operación estrangulado 308 y, por tanto, se ha seleccionado, por ejemplo, en la curva isocaracterística $I_{0,40}$ para un coeficiente de potencia de 0,4.

Ahora se propone que el punto de operación estrangulado 308 tenga una relación de velocidad punta aumentada en comparación con el punto de operación de reserva 310. En consecuencia, estos dos puntos de operación 308 y 310 se muestran en el diagrama de la figura 3. Si ahora se realiza un cambio desde el punto de operación estrangulado 308 al punto de operación de reserva 310, concretamente en respuesta a una solicitud de incremento de potencia, la velocidad rotacional se reduce algo porque se debe reducir la relación de velocidad punta λ . Suponiendo la misma velocidad del viento, la reducción en la relación de velocidad punta es una reducción en la velocidad rotacional. Como resultado, se puede liberar energía cinética y se puede lograr inmediatamente un aumento en la potencia, que comienza antes de que se haya alcanzado el punto de operación de reserva 310.

En la figura 3 también se puede ver que el punto de operación estrangulado 308 se encuentra en una curva isocaracterística asociada, es decir, la curva isocaracterística $I_{0,25}$, que tiene este valor C_p deseado de 0,25, y que esta curva isocaracterística $I_{0,25}$ en este punto de operación estrangulado 308 tiene una pendiente de curva característica negativa, en la que la relación de velocidad punta disminuye a medida que aumenta el ángulo de pala. En este caso, la pendiente de la curva isocaracterística $I_{0,25}$ es aproximadamente $-2,2/1^\circ$.

En el diagrama de la figura 3 se puede ver que el punto de operación estrangulado 308 que resulta de la selección propuesta, específicamente incluyendo la selección acorde a la cual el gradiente de curva característica es negativo en el punto de operación estrangulado, no está en la zona en la que la curva característica de operación de instalación 308 se encuentra o podrían encontrarse a bajas velocidades del viento. También se puede observar que con estos valores de una relación de velocidad punta mayor que el punto de operación de reserva, pero con un gradiente de curva característica negativo, las curvas características están próximas entre sí. La distancia mostrada en la figura. 3 entre el punto de operación estrangulado 308 y el punto de operación de reserva 310 es, por tanto, comparativamente pequeña. Para pasar de la curva isocaracterística $I_{0,25}$ a la curva isocaracterística $I_{0,4}$ en el rango seleccionado, sólo es necesario un ajuste de la pala de menos de 2° . Esta posibilidad de cambio rápido puede crearse mediante la elección propuesta del punto de operación estrangulado y del punto de operación de reserva, en particular mediante la elección del punto de operación estrangulado con relación al punto de operación de reserva.

La figura 3 también muestra una curva característica de gradiente 320, con un límite de banda superior 321 y un límite de banda inferior 322. Ambos límites de la banda se muestran con líneas discontinuas y se eligieron diferentes valores para la distancia de los límites de la banda de modo que la curva característica de gradiente en la banda se encuentre más arriba, hacia el límite de banda superior.

La figura 4 ilustra una elección preferida del punto de operación estrangulado en relación con el punto de operación de reserva, teniendo en cuenta la energía cinética de ambos puntos de operación. Para ello, en la figura 4 se muestran varias curvas temporales, concretamente en cuatro diagramas individuales. Cada gráfico utiliza el mismo eje temporal. La figura 4 ilustra el cambio de un punto de operación estrangulado a un punto de operación de reserva. Este cambio comienza en el momento t_1 , cuando se abandona el punto de operación estrangulado, y finaliza en el momento t_2 , cuando se alcanza el punto de operación de reserva. El cambio ilustrado puede referirse a un cambio del punto de operación estrangulado 308 al punto de operación de reserva 310 según la figura 3.

Para cambiar el punto de operación estrangulado al punto de operación de reserva, el ángulo de pala se ajusta aproximadamente de 6° a 4° de manera lineal, por ejemplo. Esto se muestra en el diagrama inferior, al que se puede hacer referencia como diagrama de ángulo de pala. Se supone que el ángulo de pala se ajusta a la velocidad de ajuste máxima y, por lo tanto, se requiere el tiempo de ajuste de pala T_θ , es decir, la diferencia entre t_2 y t_1 .

Al mismo tiempo, idealizando también aproximadamente de forma lineal, la velocidad rotacional n disminuye desde el valor n_1 en el instante t_1 , es decir, la velocidad rotacional del punto de operación estrangulado, hasta la velocidad n_2 en el instante t_2 , es decir, la velocidad rotacional del punto de operación de reserva. Esto se muestra en el diagrama II, que forma así un diagrama para representar la curva de velocidad rotacional.

- 5 Por lo tanto, el punto de operación estrangulado tiene una potencia de salida menor con el valor P_1 , mientras que el punto de operación de reserva tiene una potencia de salida mayor con el valor P_2 . En consecuencia, la potencia de salida P_A aumenta desde el valor P_1 al valor P_2 , es concreto, desde el instante t_1 hasta el instante t_2 .
- 10 Por potencia de salida P_A se entiende la potencia que la instalación de energía eólica genera y entrega a partir del viento en el respectivo punto de operación. Incluso en la zona comprendida entre los instantes t_1 y t_2 , es decir, en la zona de transición en la que se produce el cambio entre el punto de operación estrangulado y el punto de operación de reserva, se debe entender por potencia de salida P_A la potencia que se genera a partir del viento.
- 15 Sin embargo, ahora se propone aumentar primero más rápidamente la potencia suministrada en la zona de transición, para alcanzar lo antes posible el valor P_2 . Esta potencia puede denominarse potencia instantánea P_I y se muestra con una línea discontinua en el tercer diagrama III. Este tercer diagrama III representa por lo tanto un diagrama temporal de potencia.
- 20 Idealmente, se puede extraer tanta potencia de la energía cinética del rotor de la instalación de energía eólica en el instante t_1 o inmediatamente después que la potencia aumente inmediatamente hasta el valor P_2 . Entonces se alimenta más potencia en la red de suministro eléctrico que la potencia de salida P_A disponible. Sin embargo, esta potencia de salida P_A se acerca lentamente a la potencia instantánea P_I y la alcanza en el instante t_2 .
- 25 El aumento idealizado de la potencia instantánea P_I en comparación con la potencia de salida P_A en el tiempo que va de t_1 a t_2 da como resultado un área aproximadamente triangular, que se muestra sombreada en este diagrama III. Su superficie corresponde a una energía denominada diferencia de energía característica ΔE_c .
- 30 El cuarto diagrama IV también muestra la variación de la energía cinética E_k de la instalación de energía eólica. Entre los instantes t_1 y t_2 , la variación temporal de la energía cinética E_k corresponde aproximadamente a la integral negativa del rango de diferencia de potencia que se muestra sombreado en el Diagrama III. Idealmente, la diferencia entre la energía cinética inicial E_1 menos la energía cinética E_2 alcanzada en el instante t_2 corresponde al diferencial de energía característica ΔE_c .
- 35 Cabe señalar que esta figura 4 está idealizada y sirve para propósitos ilustrativos. Por supuesto, hay que tener en cuenta especialmente que con el fuerte aumento de la potencia instantánea P_I poco después del instante t_1 con la correspondiente caída brusca del valor energético de la energía cinética E_k , la velocidad rotacional n también disminuiría más de lo mostrado. Esto se indica en el segundo diagrama II con una línea de puntos y se denomina n' .
- 40 Una caída de velocidad rotacional correspondientemente más rápida también podría influir en la potencia de salida P_A en el diagrama III. Sin embargo, una caída más rápida en la velocidad rotacional n no necesariamente conduciría a que la potencia de salida P_A aumentara correspondientemente más rápido al mismo tiempo, porque se puede ver en la figura 3 que una caída más rápida en la velocidad rotacional, es decir, una caída más rápida en la relación de velocidad punta, no necesariamente conduce a un aumento más rápido en el coeficiente de potencia.
- 45 Por lo tanto, se reconoció que el diferencial de energía característica ΔE_c se puede calcular en una buena aproximación a partir del producto del diferencial de potencia de salida, es decir, P_2 menos P_1 y el tiempo de ajuste de pala T_θ y multiplicado adicionalmente por $1/2$. En consecuencia, se propone seleccionar el punto de operación estrangulado y/o el punto de operación de reserva de manera que se elija que el diferencial de energía rotacional sea aproximadamente de la misma magnitud que el diferencial de energía característica ΔE_c .
- 50

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para controlar una instalación de energía eólica (100), donde
 - la instalación de energía eólica (100) tiene un rotor (106) con palas de rotor (108) con un ángulo de pala ajustable (θ), y el rotor (106) se puede operar con una velocidad rotacional variable (n), y donde
 - la instalación de energía eólica (100) se opera en un rango de carga parcial en el que no hay suficiente viento para operar la instalación de energía eólica (100) con potencia nominal (PN),
 - la instalación de energía eólica (100) se puede operar en un punto de operación (302, 308, 310) que puede especificarse de forma variable, y
 - el punto de operación (302, 308, 310) se caracteriza por el ángulo de pala (θ) y una relación de velocidad punta (λ), y donde
 - el punto de operación (302, 308, 310) se puede representar en un diagrama $\lambda\theta$, donde
 - en el diagrama $\lambda\theta$, la relación de velocidad punta (λ) se representa frente al ángulo de pala (θ), y
 - el punto de operación (302, 308, 310) se puede representar en el diagrama $\lambda\theta$ como un par de valores compuesto por un ángulo de pala (θ) y una relación de velocidad punta (λ), donde
 - a cada punto de operación (302, 308, 310) se le asigna un coeficiente de potencia (valor C_p), y
 - una pluralidad de puntos de operación (302, 308, 310) con el mismo valor C_p se pueden representar como una curva isocaracterística en el diagrama $\lambda\theta$,
 que comprende los pasos:
 - operar la instalación de energía eólica en un punto de operación normal (302) en el que la instalación de energía eólica (100) no opera de forma estrangulada si no existe una solicitud de estrangulación,
 - operar la instalación de energía eólica (100) en un punto de operación estrangulado (308) en el que, en respuesta a una solicitud de estrangulación, la instalación de energía eólica (100) se opera con potencia de salida (P_A) estrangulada en comparación con la del punto de operación normal (302), y
 - cambiar la operación de la instalación de energía eólica desde el punto de operación estrangulado (308) a un punto de operación de reserva (310), en el que, como reacción a una solicitud de incremento de potencia, la instalación de energía eólica (100) se opera con una mayor potencia de salida en comparación con el punto de operación estrangulado (308), donde
 - el punto de operación estrangulado (308) tiene una relación de velocidad punta aumentada en comparación con el punto de operación de reserva (310), y
 - el punto de operación estrangulado (308) se encuentra en una curva isocaracterística asociada en el diagrama $\lambda\theta$, y la curva isocaracterística asociada tiene, en el punto de operación estrangulado (308), un gradiente de curva característico negativo en el que la relación de velocidad punta disminuye a medida que aumenta el ángulo de pala, caracterizado por que
 el gradiente de curva característico en el punto de operación estrangulado (308) disminuye con un valor que es al menos $0,5/1^\circ$ en términos de valor absoluto.
2. El procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que
 - el punto de operación de reserva (310)
 - se opera con menor potencia de salida en comparación con el punto de operación normal (302), y/o
 - tiene una relación de velocidad de punta reducida en comparación con el punto de operación estrangulado (308), y opcionalmente
 - tiene una relación de velocidad de punta aumentada en comparación con el punto de operación normal (302).
3. El procedimiento según la reivindicación 1 o 2, caracterizado por que
 - el punto de operación estrangulado (308) y/o
 - el punto de operación de reserva (310)
 se selecciona en función de
 - una distancia entre dos curvas isocaracterísticas en el punto de operación estrangulado (308) o en el punto de operación de reserva (310) y/o
 - un gradiente del coeficiente de potencia del punto de operación estrangulado (308) o del punto de operación de reserva (310).
4. El procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que
 - el punto de operación estrangulado (308) y/o el punto de operación de reserva (310) se seleccionan de tal forma que en cada caso
 - una derivada del coeficiente de potencia (C_p) del punto de operación estrangulado (308) o del punto de operación de reserva (310) según el ángulo de pala supera un valor derivado mínimo predeterminado en términos del valor absoluto, en particular en tal manera que
 - para el punto de operación estrangulado (308) el valor derivado mínimo es de al menos $0,3/6^\circ (= 0,05/1^\circ)$ y/o
 - para el punto de operación de reserva (310) el valor derivado mínimo es de al menos $0,1/6^\circ$.
5. El procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores,

caracterizado por que

- la instalación de energía eólica (100) puede caracterizarse mediante un campo de curvas características compuesto por curvas isocaracterísticas en el diagrama $\lambda\theta$, y

- el campo de curvas características se puede definir como un campo de curvas características normalizado en el que el ángulo de pala está normalizado en grados enteros ($^{\circ}$),

- en el campo de curvas características normalizado se forma una primera subregión en la que

- los ángulos de pala son mayores que los ángulos de pala del punto de operación normal y

- las curvas isocaracterísticas tienen un gradiente de curva característica negativo, en el que la relación de velocidad en punta disminuye a medida que aumenta el ángulo de pala,

- en el campo de curvas características normalizado, cada punto de operación se caracteriza por un valor de gradiente que cuantifica el gradiente máximo del coeficiente de potencia del punto de operación en el campo de curvas características normalizado,

- donde en la primera subregión del campo de curvas características normalizado hay un punto de operación con un valor de gradiente máximo para cada curva isocaracterística, y se puede representar una curva característica de gradiente que conecta todos estos puntos de operación con un valor de gradiente máximo, donde

- el punto de operación estrangulado (308) y/o el punto de operación de reserva (310) se seleccionan de modo que cada uno de ellos se encuentre en la curva característica de gradiente, y/o

- se encuentren en una banda de gradiente que incluye la curva característica de gradiente (320),

- donde la banda de gradiente tiene

- un límite de banda superior (321) que se encuentra por encima de la curva característica de gradiente en una diferencia de relación de velocidad punta, y

- un límite de banda inferior (322) que se encuentra por debajo de la curva característica de gradiente en una diferencia de relación de velocidad punta inferior, donde

- las diferencias de relación de velocidad de punta superior e inferior tienen preferiblemente cada una como máximo el valor 2, en particular como máximo el valor 1, o

- la diferencia de relación de velocidad de punta superior tiene como máximo el valor 1 y

- la diferencia de relación de velocidad de punta inferior tiene como máximo el valor 4.

6. El procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores,

caracterizado por que la instalación de energía eólica (100) tiene

- en el punto de operación estrangulado (308)

- una primera potencia de salida,

- una primera energía rotacional y

- un primer ángulo de pala, y

- en el punto de operación de reserva (310)

- una segunda potencia de salida,

- una segunda energía rotacional y

- un segundo ángulo de pala, donde

- la primera potencia de salida es inferior a la segunda potencia de salida, y una diferencia entre la segunda potencia de salida y la primera potencia de salida forma un diferencial de potencia de salida de los puntos de operación,

- la primera energía rotacional (E_1) es mayor que la segunda energía rotacional (E_2), y una diferencia entre la primera y la segunda energía rotacional forma un diferencial de energía rotacional,

- se requiere un tiempo de ajuste de palas para ajustar las palas de rotor desde el primer ángulo de pala hasta el segundo ángulo de pala,

- un producto del diferencial de potencia de salida por el tiempo de ajuste de palas multiplicado por 50% forma un diferencial de energía característico (ΔE_c), y

- el punto de operación estrangulado (308) y/o el punto de operación de reserva (310) se seleccionan de tal manera que el diferencial de energía rotacional quede por encima o por debajo del diferencial de energía característico en un valor de desviación porcentual máximo predeterminado, donde valor de desviación porcentual es como máximo del 60%, preferiblemente como máximo el 40% y en particular como máximo el 20%.

7. El procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores,

caracterizado por que

- para ajustar el punto de operación estrangulado, en particular a partir del punto de operación normal, en primer lugar, se ajusta en un primer paso de ajuste un punto de operación intermedio, donde

- el punto de operación intermedio tiene el mismo valor C_p que el punto de operación estrangulado, al menos un valor C_p que varía menos del 20%, en particular por que

- en un segundo paso de ajuste se produce un cambio del punto de operación intermedio al punto de operación estrangulado, y el cambio se puede representar en el diagrama $\lambda\theta$ esencialmente como un cambio a lo largo de una curva isocaracterística, al menos con una desviación máxima de 20 % del valor C_p de la curva isocaracterística del punto de operación estrangulado.

8. El procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores,

caracterizado por que

- la solicitud de estrangulación para solicitar la operación de la instalación de energía eólica en el punto de operación estrangulado está configurada como una especificación externa que se recibe a través de una interfaz de datos, y/o
- la solicitud de incremento de potencia para solicitar la operación de la instalación de energía eólica en el punto de operación de reserva está configurada como una prescripción de reacción a un estado de la red de suministro eléctrico detectado por la instalación de energía eólica, en particular como una prescripción para realizar un incremento de potencia a partir del punto de operación estrangulado (308) en función de una frecuencia de red detectada de la red de suministro eléctrico.

9. El procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que

- la instalación de energía eólica (100) se opera durante un período de tiempo más largo en el punto de operación estrangulado (308) que en el punto de operación de reserva (310), en particular al menos 20 veces más.

10. Una instalación de energía eólica (100) con

- un rotor (106) con palas de rotor (108) con un ángulo de pala ajustable (θ), donde el rotor (106) se puede operar con una velocidad rotacional variable, y donde

- la instalación de energía eólica (100) se opera en un rango de carga parcial en el que no hay suficiente viento para operar la instalación de energía eólica (100) con potencia nominal (P_N),

- la instalación de energía eólica (100) se puede operar como un punto de operación (302, 308, 310) que puede especificarse de forma variable, y

- el punto de operación (302, 308, 310) se caracteriza por el ángulo de pala (θ) y una relación de velocidad punta (λ), y donde

- el punto de operación (302, 308, 310) se puede representar en un diagrama $\lambda\theta$, donde

- en el diagrama $\lambda\theta$, la relación de velocidad punta (λ) se representa frente al ángulo de pala (θ), y

- el punto de operación (302, 308, 310) se puede representar en el diagrama $\lambda\theta$ como un par de valores compuesto por un ángulo de pala (θ) y una relación de velocidad punta (λ), donde

- a cada punto de operación (302, 308, 310) se le asigna un coeficiente de potencia (valor C_p), y

- una pluralidad de puntos de operación (302, 308, 310) con el mismo valor C_p se pueden representar como

una curva isocaracterística en el diagrama $\lambda\theta$,

y la instalación de energía eólica (100) tiene un dispositivo de control (103), preparado para operar la instalación de energía eólica (100) en el rango de carga parcial, y por tanto preparado

- para operar la instalación de energía eólica en un punto de operación normal (302) en el que la instalación de energía eólica (100) no opera de forma estrangulada si no existe una solicitud de estrangulación,

- para operar la instalación de energía eólica (100) en un punto de operación estrangulado (308) en el que, en respuesta a una solicitud de estrangulación, la instalación de energía eólica (100) se opera con potencia de salida (P_A) estrangulada en comparación con la del punto de operación normal (302), y

- para cambiar la operación de la instalación de energía eólica desde el punto de operación estrangulado (308) a un punto de operación de reserva (310), en el que, como reacción a una solicitud de incremento de potencia, la instalación de energía eólica (100) se opera con una mayor potencia de salida en comparación con el punto de operación estrangulado (308), donde

la operación de la instalación de energía eólica (100) está implementada de tal manera que

- el punto de operación estrangulado (308) tiene una relación de velocidad punta aumentada en comparación con el punto de operación de reserva (310), y

- el punto de operación estrangulado (308) se encuentra en una curva isocaracterística asociada en el diagrama $\lambda\theta$, y la curva isocaracterística asociada tiene, en el punto de operación estrangulado (308), un gradiente de curva característica negativo en el que la relación de velocidad punta disminuye a medida que aumenta el ángulo de pala, caracterizado por que

el gradiente de curva característica en el punto de operación estrangulado (308) disminuye con un valor que es al menos $0,5/1^\circ$ en términos de valor absoluto.

11. Instalación de energía eólica según la reivindicación 10,

caracterizada por que la instalación de energía eólica, en particular el dispositivo de control (103), está preparada para la realización de un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 9.

12. Instalación de energía eólica (100) según la reivindicación 10 u 11, caracterizada por que

- se proporciona una interfaz de datos para recibir y evaluar una señal externa como especificación externa de la solicitud de estrangulación, y

- un dispositivo de detección para detectar y evaluar un estado de la red de suministro eléctrico para comprobar una solicitud de incremento de potencia como prescripción para la reacción al estado detectado.

13. Instalación de energía eólica (100) según una de las reivindicaciones 10 a 12,

caracterizada por se proporciona una memoria de control y en la memoria de control,

- se almacenan prescripciones de control para la operación de la instalación de energía eólica según al menos un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 9, y/o

5 - se almacenan puntos de operación que dependen de la velocidad del viento, en particular se almacenan respectivamente un punto de operación normal, un punto de operación estrangulado y un punto de operación de reserva para varias velocidades del viento.

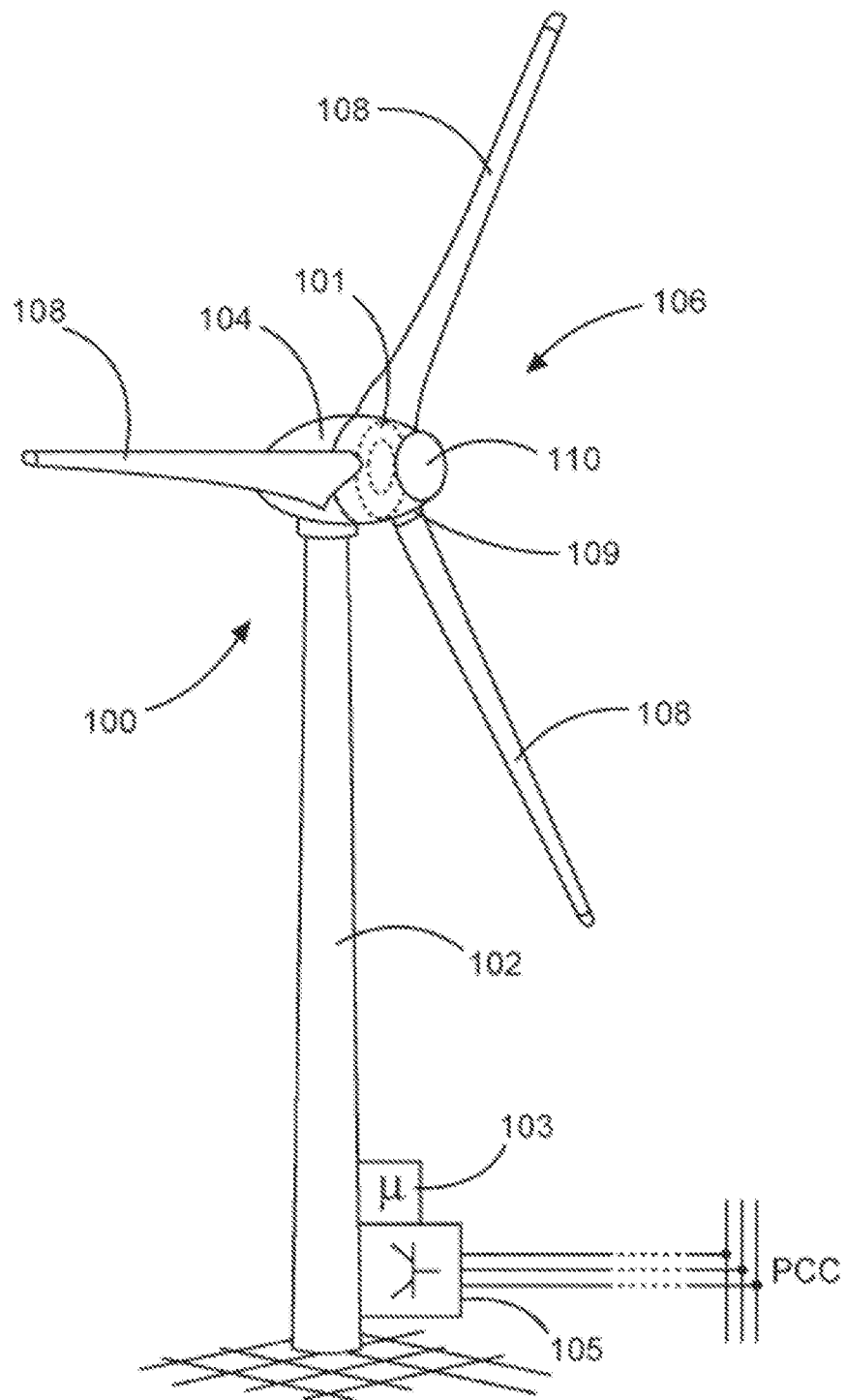


Fig. 1

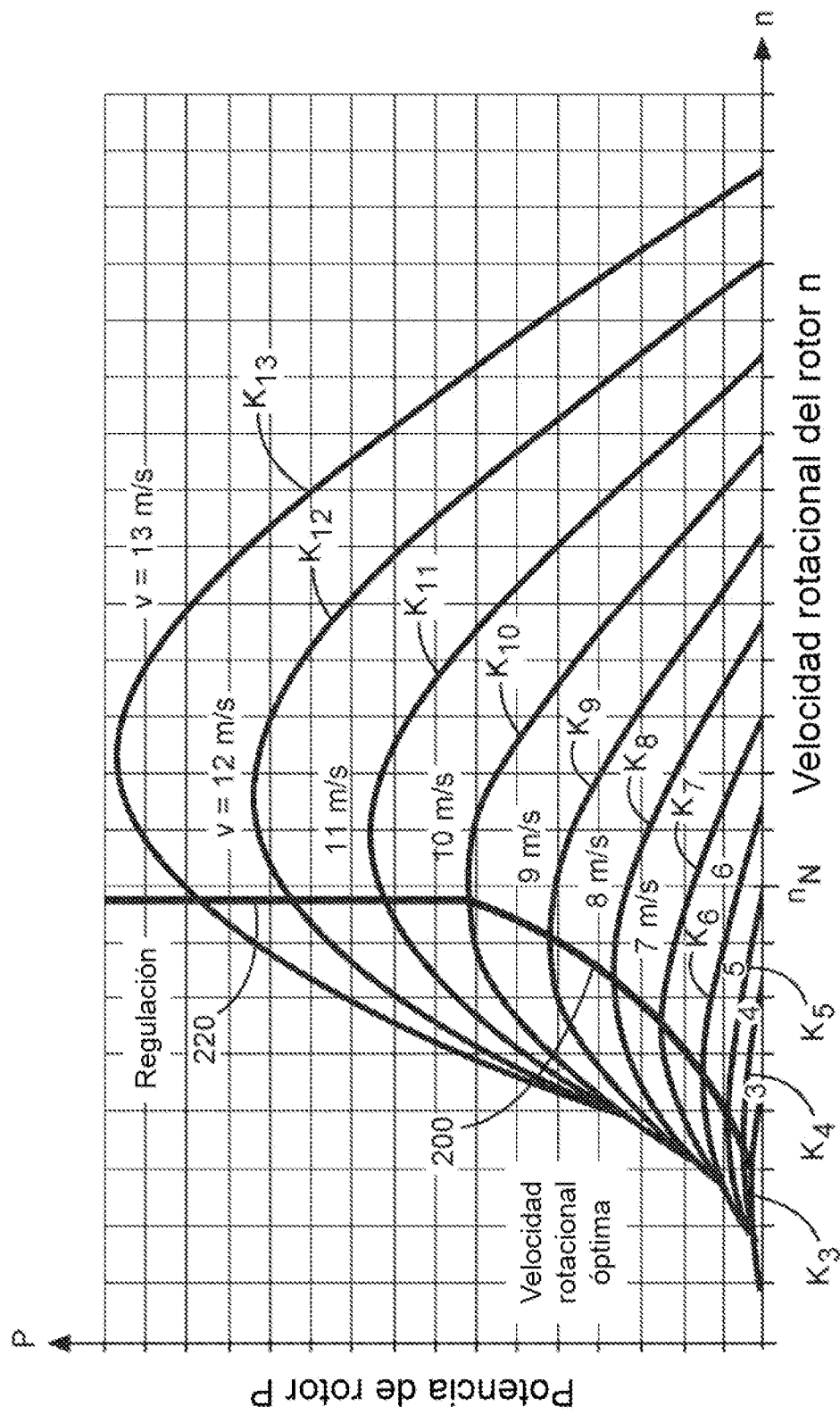
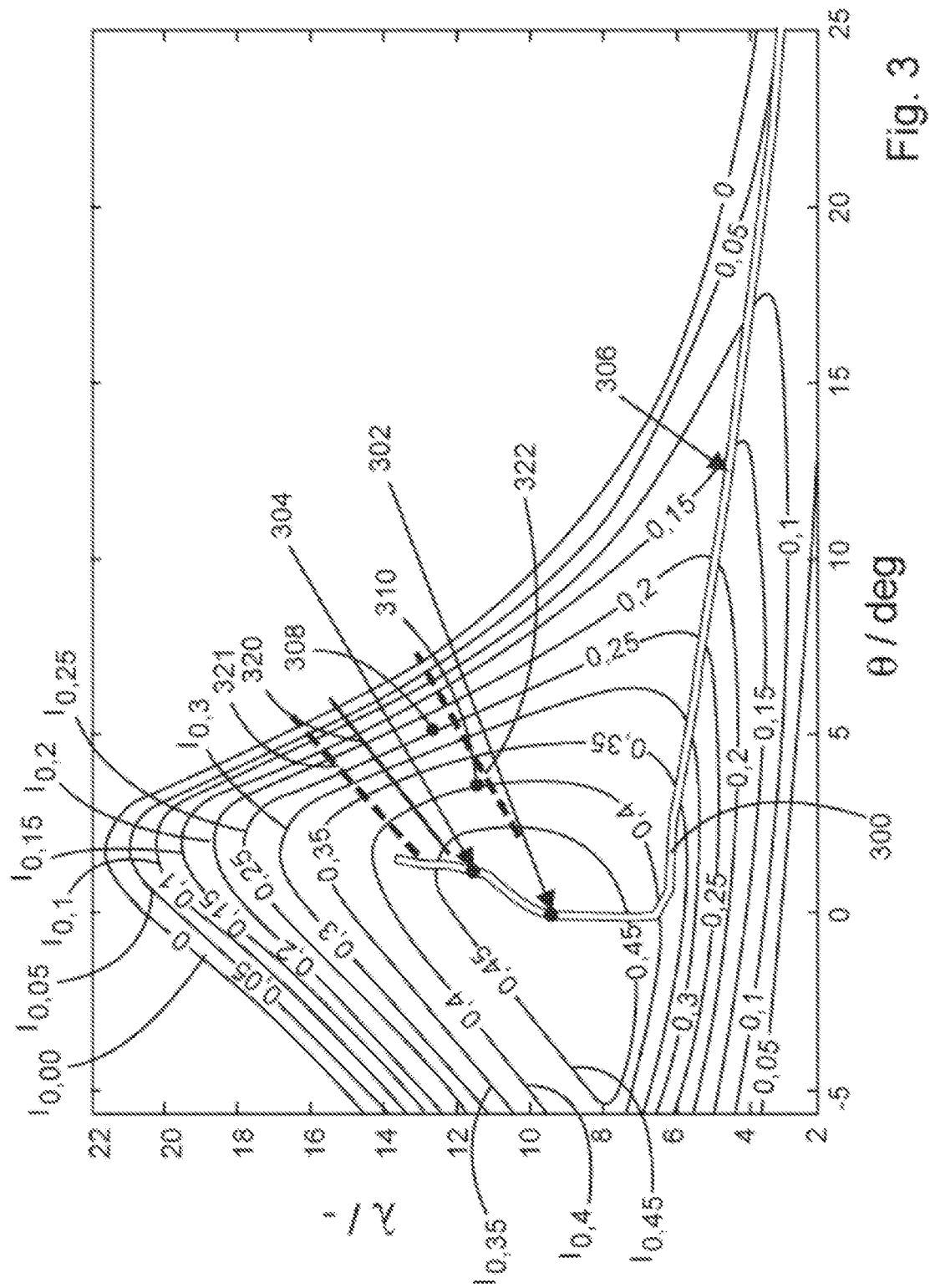


Fig. 2



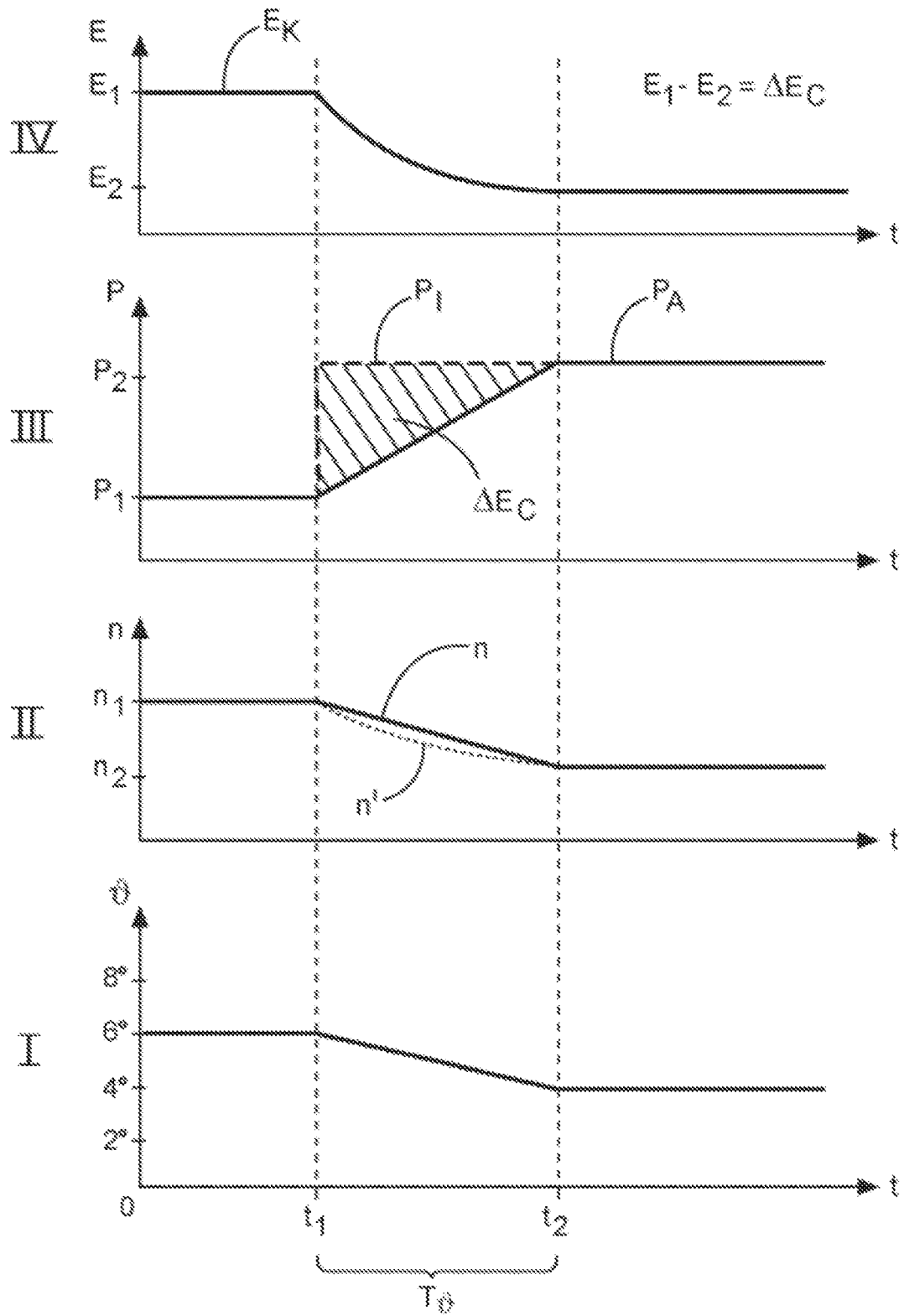


Fig. 4