

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 028 536**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.06.2019** **PCT/EP2019/065320**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.12.2019** **WO19243129**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.06.2019** **E 19730335 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.02.2025** **EP 3810924**

54 Título: **Operación de potencia reducida de una instalación de energía eólica**

30 Prioridad:

21.06.2018 DE 102018114935

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

19.06.2025

73 Titular/es:

WOBBEN PROPERTIES GMBH (100.00%)
Borsigstraße 26
26607 Aurich, DE

72 Inventor/es:

MESSING, RALF y
MÖLLER, CHRISTIAN

74 Agente/Representante:

ERVITI ARBAIZA, Blanca María

ES 3 028 536 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

Operación de potencia reducida de una instalación de energía eólica

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

10 Las instalaciones de energía eólica son bien conocidas y generan potencia eléctrica a partir del viento y generalmente alimentan esta potencia eléctrica a una red de suministro eléctrico que es mantenida regularmente por los operadores de la red. Lo ideal es que las instalaciones de energía eólica funcionen en la denominada operación en paralelo a la red, en el que cada instalación de energía eólica genera y suministra a la red eléctrica tanta energía como le es posible gracias al viento predominante, teniendo en cuenta las limitaciones técnicas de la instalación de energía eólica en cuestión.

- 15 A medida que aumenta el número de instalaciones de energía eólica en la red de suministro eléctrico, también aumenta su influencia en el comportamiento de la red de suministro eléctrico y, en determinadas circunstancias, también puede afectar la estabilidad de la red de suministro eléctrico. Por este motivo también existen modos de operación de potencia reducida. Los modos de operación de potencia reducida se desarrollaron para satisfacer las necesidades de los operadores de red que, por ejemplo, solicitan solo potencia de alimentación regulada de instalaciones de energía eólica o parques eólicos durante períodos de alta velocidad de viento para evitar la sobrecarga de la red de suministro eléctrico.

25 Para su implementación, se puede especificar un nivel de potencia nominal reducido, con lo cual se puede interpolar una velocidad de rotación nominal reducida correspondiente a partir de un modo de operación de potencia optimizada. Por tanto, se especifica un valor de potencia reducida que está por debajo de la potencia nominal normal de la instalación de energía eólica. A esta potencia nominal reducida se le asigna una velocidad de rotación que pueda considerarse como velocidad de rotación nominal reducida. Esta velocidad de rotación nominal correspondiente, que se asigna a esta potencia reducida, es decir, al nivel de potencia nominal reducido, se puede tomar de una curva característica de velocidad de rotación-potencia, que está destinada a la operación de carga parcial de la instalación de energía eólica.

35 Una curva característica de velocidad de rotación-potencia de este tipo muestra por tanto la relación entre la velocidad de rotación y la potencia en la operación de carga parcial y, así, al aumentar la velocidad de rotación, se asigna una mayor potencia y esta asignación concreta indica la curva característica de velocidad de rotación-potencia. En la operación de potencia reducida, en la que la potencia se reduce a un valor que es inferior al que el sistema podría generar realmente en ese momento, se extrae del viento menos potencia de la que sería posible. Esto se puede conseguir girando las palas del rotor fuera del viento, de modo que el rotor aerodinámico extraiga menos potencia del viento de la que sería posible en ese momento. Desde el punto de vista del generador, esto corresponde a una situación en la que en realidad hay menos viento. Por consiguiente, es obvio fijar el mismo valor de velocidad de rotación-potencia en el caso de reducción artificial de potencia que en el caso de viento predominante, lo que conduce al mismo valor de potencia.

45 Desde la perspectiva del generador, resulta el mismo punto operativo, pero se determinó que esta reducción artificial da como resultado que los modos operativos de potencia reducida siempre tengan velocidades de rotación nominales significativamente más bajas que el modo de potencia optimizada. Por tanto, las velocidades de rotación son, al menos en operación nominal, cuando se alcanza el límite de potencia correspondiente, más bajas en el modo de operación de potencia reducida que en el modo de operación normal, es decir, de potencia optimizada, con el mismo viento predominante.

50 En principio, la potencia nominal se alcanza a la denominada velocidad de viento nominal. Si se reduce esta potencia nominal en el modo de operación reducido, también se puede asumir una velocidad de viento nominal reducida para el modo de operación de potencia reducida, porque la potencia nominal reducida ya se alcanza con velocidades de viento más bajas. A velocidades de viento por encima de la velocidad nominal, ya sea normal o reducida, la instalación de energía eólica se regula a la velocidad nominal correspondiente mediante el ajuste de las palas del rotor, lo que generalmente también se conoce como paso de las palas del rotor, independientemente de la velocidad de viento, al menos mientras no haya operación de ventisca.

60 En esta así llamada operación nominal u operación de carga completa, el control no tiene en cuenta la velocidad de viento, sino que simplemente realiza un control que regula la instalación a la potencia nominal y a la velocidad de rotación nominal. Si, por ejemplo, la velocidad de viento aumenta en este modo de operación, la velocidad de rotación y la potencia pueden, por decirlo claramente, aumentar ligeramente durante un breve período de tiempo, aunque esto es contrarrestado por el sistema de control, concretamente mediante el paso de las palas de rotor. Si el par del generador permanece constante, porque, por ejemplo, la excitación de un

generador síncrono excitado independientemente permanece inalterada, la regulación a una velocidad de rotación nominal constante conduce inevitablemente a una potencia constante, es decir, normalmente la potencia nominal.

5 En la operación de ventisca o de temporal, que puede comenzar con una velocidad de viento predefinida, la instalación de energía eólica se regula a una velocidad de rotación dependiente de la velocidad de viento, que puede caer desde la velocidad de rotación nominal hasta una velocidad de ralentí durante la operación de ventisca.

10 Así, especialmente en esta operación nominal u operación de carga completa, la instalación de energía eólica se opera a diferentes velocidades de rotación con las mismas velocidades de viento. En particular, se produce el efecto de que la velocidad de rotación y, por lo tanto, la velocidad de giro es menor en la operación de potencia reducida que en la operación de potencia óptima. Esto, a su vez, significa que la relación de velocidad de punta λ , que indica la relación entre la velocidad de giro del rotor aerodinámico en sus puntas de pala y la
15 velocidad de viento, disminuye al aumentar la velocidad de viento y es menor en la operación de potencia reducida que en la operación de potencia óptima.

Se reconoció que tales relaciones de velocidad de punta bajas pueden provocar una separación del flujo en el lado de presión del perfil de la pala del rotor a altas velocidades de viento y los ángulos de pala correspondientes. Lo que puede resultar especialmente problemático es que dichas separaciones de flujo sólo se producen en unas pocas posiciones a lo largo de toda la longitud de la pala del rotor. Esto a su vez puede provocar un aumento de las cargas de torsión.

20 Dado que tales separaciones de flujo solo se producen en zonas parciales, la instalación de energía eólica continúa siendo impulsado por el viento, de modo que el rotor aerodinámico continúa girando y aún está expuesto a las cargas.

El problema de las bajas relaciones de velocidad de punta con altas velocidades de viento se produce especialmente en la zona de transición hacia la operación de ventisca. Precisamente en este caso se da una relación de velocidad de punta comparativamente baja, combinada con una alta carga mecánica causada por el fuerte viento, mientras que todavía no se ha implementado ninguna reducción en la operación de la
30 instalación de energía eólica para protegerse contra la ventisca o temporal.

La Oficina Alemana de Patentes y Marcas ha buscado el siguiente estado de la técnica en la solicitud de prioridad para esta solicitud: DE 198 44 258 A1, DE 10 2015 203 841 A1, DE 10 2016 124 630 A1 y US 2012/0139246 A1.

El documento US 2018/0051675 A1 se refiere a un aumento de potencia de una turbina eólica desde un modo de potencia baja, por lo que, al recibir una solicitud correspondiente para finalizar el modo de potencia baja, se
40 aumenta la potencia de salida de la turbina eólica inclinando las palas del rotor.

La invención se basa por tanto en el objeto de abordar al menos uno de los problemas mencionados anteriormente. En particular, se debería proponer una solución que evite en la medida de lo posible las vibraciones torsionales en la operación de potencia reducida. Se debería proponer al menos una solución
45 alternativa a las soluciones conocidas hasta ahora.

De acuerdo con la invención, se propone un procedimiento para operar una instalación de energía eólica según la reivindicación 1. En consecuencia, se supone que una instalación de energía eólica tiene un rotor aerodinámico con palas; en particular, se proponen tres palas de rotor. Este rotor aerodinámico o la instalación
50 de energía eólica en su conjunto se puede operar con una velocidad de rotor variable. Durante su operación, la instalación de energía eólica suministra una potencia de salida generada a partir del viento para inyectarla o alimentarla a una red de suministro eléctrica. También está previsto que la instalación de energía eólica pueda funcionar en un modo de operación normal sin reducción de potencia y en un modo de operación reducido con reducción de potencia. En particular, un requerimiento de reducción de potencia puede ser solicitado desde fuera, especialmente por un operador de red que explote la red de suministro eléctrico.

Para este fin, ahora se propone que la instalación de energía eólica, cuando funciona en el modo de operación reducido para velocidades de viento superiores a una velocidad de viento nominal, aumente su velocidad de rotación de rotor al menos en una región de aumento de velocidad de rotación a medida que la velocidad de
60 viento continúa aumentando, mientras que la potencia permanece reducida.

Por lo tanto, aquí se considera específicamente el modo de operación reducido y se supone que el modo de operación normal funciona preferiblemente de una manera conocida. En el modo de operación reducido, la

reducción de potencia indica un valor de potencia reducido, que también puede denominarse potencia especificada reducida. Esta potencia especificada reducida está por debajo de la potencia nominal normal de la instalación de energía eólica, es decir, por debajo de la potencia nominal sin reducir, que también puede denominarse potencia nominal de instalación.

5

La instalación de energía eólica funciona inicialmente de tal manera que, en operación de carga parcial con una velocidad de viento que aumenta, su potencia y velocidad de rotación aumentan junto con el aumento de la velocidad de viento. Este aumento de potencia y velocidad de rotación se lleva a cabo hasta que la potencia alcanza el valor límite especificado, es decir, hasta que la potencia de instalación alcanza la potencia especificada reducida predeterminada. Anteriormente, la potencia y la velocidad de rotación se mantenían en este valor, por lo que también se puede denominar velocidad de rotación nominal reducida o potencia especificada reducida.

10

Sin embargo, ahora se propone que, a medida que la velocidad de viento continúa aumentando, se aumente aún más la velocidad de rotación, es decir, más allá de esta velocidad de rotación nominal reducida. La potencia de salida de la instalación de energía eólica se puede reducir de otras maneras o se puede evitar que aumente aún más de otras maneras. En particular, es importante considerar la reducción de la excitación del generador, es decir, reducir el par del generador, de manera que, a pesar de que la velocidad de rotación siga aumentando, la potencia, es decir, la potencia de salida de la instalación de energía eólica, no aumente. Sin embargo, este aumento de velocidad de rotación no tiene por qué producirse inmediatamente, sino que puede sugerirse sólo después de que la velocidad de viento haya aumentado aún más.

15

20

Al menos la velocidad de rotación de rotor aumenta aún más en una región de aumento de velocidad de rotación por encima de la velocidad de viento nominal a medida que aumenta la velocidad de viento. La velocidad de viento nominal también puede ser una velocidad de viento nominal reducida, es decir, aquella en la que la potencia de salida, si se utiliza la curva característica velocidad de rotación-potencia habitual, alcanza el valor de la potencia especificada reducida. Por tanto, la velocidad de viento nominal reducida se refiere al modo de operación reducido. La velocidad de viento nominal suele estar relacionada con el modo operativo utilizado y se refiere a la velocidad de viento a la que se alcanza la potencia máxima del rango operativo respectivo. También es posible que el aumento de la velocidad de rotación de rotor, a medida que el viento continúa aumentando, solo se realice por encima de la velocidad de viento nominal normal, es decir, por encima de la velocidad de viento a la que la potencia de salida alcanza la potencia nominal normal de la instalación de energía eólica según la curva característica de velocidad de rotación-potencia normal.

25

30

Se reconoció que la carga de la instalación de energía eólica, especialmente en las palas de rotor, se puede reducir sorprendentemente si se continúa aumentando la velocidad a pesar de la limitación de potencia. Esto puede generar una relación de velocidad de punta más alta en comparación con una curva característica operativa en la que la velocidad no se aumenta más. Esto permite evitar la separación de flujo en el lado de presión del perfil de la pala de rotor y, por lo tanto, en particular, evitar la separación de flujo que solo se produce localmente, lo que a su vez evita cargas de torsión y, por lo tanto, vibraciones de torsión de la pala de rotor. Esto genera una carga total menor en comparación con un modo de operación en el que se producirían separaciones de flujo locales y cargas y vibraciones torsionales correspondientes. La separación de flujo en el lado de presión también puede provocar un aumento significativo de las emisiones de ruido de la instalación de energía eólica. El aumento de la velocidad y la consiguiente evitación de la separación de flujo también evitan un aumento de las emisiones de ruido debido al ruido de separación en el sistema. También en este caso se produce el sorprendente efecto de que un aumento de la velocidad provoca una reducción del ruido o, al menos, contrarresta un mayor aumento del ruido.

35

40

45

Preferiblemente, la velocidad de rotación en el modo de operación de potencia reducida se incrementa a medida que aumenta la velocidad de viento como máximo hasta la velocidad de rotación nominal normal, es decir, no reducida. Se reconoció que un aumento adicional en la velocidad de rotación debido al efecto descrito de evitar la separación del flujo local puede resultar inicialmente en una carga general reducida, lo que debe considerarse más significativo que un pequeño aumento en la carga debido a una mayor velocidad de rotación. Sin embargo, también se reconoció que un aumento de velocidad de rotación no se puede realizar de forma arbitraria y que la velocidad de rotación nominal normal, sin reducir, es un buen valor que no se debe superar si es posible. También debe tenerse en cuenta que una velocidad de rotación nominal normal suele ser significativamente mayor que una velocidad de rotación nominal reducida. Se propone preferentemente que el aumento de la velocidad de rotación de rotor en el modo de operación reducido se realice hasta valores por encima de la velocidad de rotación nominal normal. La velocidad de rotación de rotor no sólo aumenta hasta valores de la velocidad de rotación nominal, sino que, al menos en una sección, también puede aumentarse a valores superiores a ésta. En consecuencia, a pesar de la reducción de potencia, la velocidad de rotación se aumenta por encima de la velocidad de rotación nominal. Se reconoció que incluso mediante el aumento por encima de la velocidad de rotación nominal, se puede lograr una reducción de carga.

50

55

60

Según una realización, se propone que la instalación de energía eólica opere en una operación de carga parcial, operación de carga completa u operación de ventisca dependiendo de la velocidad de viento predominante. La instalación de energía eólica tiene por tanto estos tres modos de operación, cada uno de los cuales está

5

En la operación de carga parcial, la velocidad de viento es inferior a la velocidad de viento nominal, por lo que no se puede alcanzar la potencia máxima generable. La potencia de salida depende entonces de la velocidad de viento y, en particular, la instalación de energía eólica se opera de tal manera que la potencia de salida sea lo más alta posible.

10

En operación de carga completa, la velocidad de viento es igual o superior a la velocidad de viento nominal, pero inferior a una velocidad de viento de ventisca, de modo que se genera la máxima potencia generable. La potencia máxima que se puede generar se puede denominar potencia nominal. Para distinguir mejor entre el modo de operación normal, por un lado, y el modo de operación reducido, por otro, aquí se distingue entre una potencia nominal de instalación y una potencia especificada reducida. La potencia nominal de instalación es la potencia nominal normal para la que está diseñada la instalación de energía eólica. La potencia especificada reducida también puede considerarse como una potencia nominal reducida, porque también se refiere a una potencia que en principio no se debe superar, pero que está por debajo de la potencia nominal de instalación y se puede especificar. Por lo tanto, no está determinada por el diseño de la instalación de energía eólica, sino que puede especificarse durante la operación, especialmente por un operador de red.

15

20

Durante la operación de ventisca, la velocidad de viento es igual o superior a la velocidad inicial de viento de ventisca y, para proteger la instalación de energía eólica, se genera menos que la potencia máxima, es decir, al menos menos potencia que la potencia nominal normal, es decir, al menos menos potencia que la potencia nominal de instalación. Esto sirve para proteger la instalación de energía eólica y aquí la velocidad inicial de viento de ventisca se puede especificar como un valor fijo e indica una velocidad de viento por encima de la cual se puede asumir la operación de ventisca para la instalación de energía eólica en cuestión y la instalación de energía eólica se opera en consecuencia. La velocidad de viento de ventisca es un término general que describe las velocidades de viento durante la operación de ventisca, es decir, la velocidad inicial de viento de ventisca y las velocidades de viento por encima de ella. Por lo tanto, una velocidad de viento inferior a la velocidad de viento de ventisca también está por debajo de la velocidad inicial de viento de ventisca.

25

30

35

A continuación, se propone lo siguiente para la velocidad de rotación de rotor de la instalación de energía eólica en el modo de operación reducido y con carga completa. Para velocidades de viento superiores a la velocidad de viento nominal hasta una velocidad de viento de escalada que está por encima de la velocidad de viento nominal y por debajo de la velocidad inicial de viento de ventisca, la instalación de energía eólica mantiene su velocidad de rotación de rotor constante a una velocidad de rotación nominal reducida. Para velocidades de viento superiores a la velocidad de viento de escalada, la instalación de energía eólica aumenta su velocidad de rotación de rotor. El aumento se realiza en particular de tal manera que aumenta de forma continua, en particular de forma lineal, a medida que aumenta aún más la velocidad de viento hasta la velocidad inicial de viento de ventisca, o que aumenta de forma continua a medida que aumenta aún más la velocidad de viento hasta una velocidad de rotación nominal normal.

40

45

Por lo tanto, se especifica una velocidad de viento de escalada y esto se produce esencialmente dentro de la operación de carga completa. Por lo tanto, es mayor que la velocidad de viento nominal y menor que la velocidad inicial de viento de ventisca. Por consiguiente, se propone en particular que la velocidad de rotación de rotor en el modo de operación reducido no se incremente inicialmente más allá de la velocidad de viento nominal hasta que la velocidad de viento haya alcanzado el valor de la velocidad de viento de escalada. Luego, a medida que la velocidad de viento continúa aumentando, aumenta la velocidad de rotación de rotor. Aquí se reconoció en particular que inicialmente, es decir, con velocidades de viento comparativamente bajas en operación de carga completa, no es necesario un aumento de la velocidad de rotación en el modo de operación reducido porque inicialmente no se esperan problemas debido a relaciones de velocidad de punta demasiado bajas. Sólo más tarde, cuando la velocidad de viento aumenta aún más, pueden producirse los fenómenos descritos de separación del flujo en relaciones de velocidad de punta bajas. Correspondientemente se define tal velocidad de viento de escalada. En particular, puede ser ligeramente inferior a una velocidad de viento a la que podrían producirse los problemas mencionados anteriormente debido a una baja relación de velocidad de punta.

50

55

60

La forma de aumentar la velocidad de rotación de rotor a partir de la velocidad de viento de escalada puede variar y aquí se proponen particularmente dos variantes. Según la primera variante, la velocidad de rotación de

rotor se incrementa en particular a partir de la velocidad de viento de escalada a medida que aumenta la velocidad de viento hasta la velocidad inicial de viento de ventisca. Luego se produce la ventisca o vendaval y es necesario reducir nuevamente la operación de la instalación de energía eólica para no sobrepasar las cargas de instalación. En principio, dicha curva de velocidad de rotación de rotor dependiente de la velocidad de viento también puede alcanzar la curva de velocidad de rotación de rotor en el modo de operación normal.

Según la segunda variante propuesta, la velocidad de rotación de rotor se incrementa desde la velocidad de viento de escalada hasta una velocidad de rotación nominal normal. En otras palabras, la velocidad de rotación de rotor en el modo de operación reducido aumenta a partir de la velocidad de viento de escalada hasta que alcanza la curva característica de velocidad de viento o la curva de velocidad de rotación dependiente de la velocidad de viento del modo de operación normal. A partir de este momento o de este estado, se puede controlar la operación posterior de al menos la velocidad de rotación de rotor de la misma forma que en el modo de operación normal cuando la velocidad de viento continúa aumentando en el modo de operación reducido.

En principio, estas dos alternativas también pueden coincidir si la velocidad de rotación de rotor alcanza la velocidad de rotación nominal normal exactamente a la velocidad inicial de viento de ventisca.

Aquí se reconoció en particular que inicialmente puede ser útil una velocidad de rotación de rotor más baja en el modo de operación reducido, pero que esta debe aumentarse a partir de una cierta velocidad de viento para evitar los problemas mencionados anteriormente de que la relación de velocidad de punta sea demasiado baja. El aumento posterior se realiza de tal manera que la curva de la velocidad de rotación de rotor dependiente de la velocidad de viento en el modo de operación reducido alcanza la curva de la velocidad de rotación de rotor del modo de operación normal a medida que aumenta la velocidad de viento. A partir de entonces, las velocidades de rotación del rotor se pueden controlar de la misma manera en ambos modos de operación.

Según una realización, se propone que, en el modo de operación reducido, la potencia de salida y/o la velocidad de rotación de rotor en la operación de carga parcial se ajuste en función de una curva característica predeterminada, en particular una curva característica de velocidad de rotación-potencia, hasta que la potencia de salida haya alcanzado el valor de la potencia especificada reducida. En este sentido se puede aplicar aquí la misma gestión operativa que en el modo operativo normal. En particular, la potencia de salida se ajusta en función de la curva característica velocidad de rotación-potencia. Esto se hace de tal manera que, dependiendo de una velocidad de rotación de rotor detectada, la potencia de salida se ajusta de acuerdo con la curva característica de velocidad de rotación-potencia. Preferentemente, el ángulo de la pala de rotor es constante, es decir, constante en particular durante la operación de carga parcial. Si la velocidad de rotación de rotor permanece constante con la potencia de salida establecida, se ha establecido un punto de operación estable. Sin embargo, si no permanece constante y aumenta, por ejemplo, la potencia de salida cambiará en consecuencia, en el ejemplo mencionado podría aumentar, pero también podría reducirse. Por esto también aumenta o disminuye el torque o par de generador o el contra torque, de modo que se puede encontrar un punto de operación estable ajustando continuamente la potencia de salida de acuerdo con la curva característica de velocidad de rotación-potencia.

En este sentido se ajusta la potencia de salida y se determina la velocidad de rotación de rotor. Esto también ajusta indirectamente la velocidad de rotación de rotor dependiendo de la curva característica de velocidad de rotación-potencia. Dependiendo del punto de vista, tanto la potencia de salida como la velocidad de rotación de rotor se ajustan en función de la curva característica velocidad de rotación-potencia. De manera similar, también se puede establecer un par de generador en lugar de la potencia de salida. Cabe señalar que la velocidad de rotación n está relacionada con el par M y la potencia P en el estado estable a través de la ecuación $P=M*n$.

Ahora se propone además que, en el modo de operación reducido, a medida que la velocidad de viento aumenta, en particular en la operación de carga completa, la potencia de salida se regule al valor de la potencia especificada reducida y, al mismo tiempo, la velocidad de rotación de rotor se ajuste en función de una velocidad de viento detectada, en particular medida, en particular basándose en una curva característica de velocidad de viento-velocidad de rotación. Por ello, se propone aquí modificar fundamentalmente el concepto regulador. Se cambia del control de potencia y velocidad de rotación en función de la curva característica de velocidad de rotación-potencia a dos ramas de control esencialmente independientes. Por lo tanto, la potencia de salida se regula simplemente a un valor constante, independientemente de cómo sea la velocidad de viento. Para la velocidad de rotación, también se propone utilizar una curva característica velocidad de viento-velocidad de rotación, que es un control de la velocidad de rotación de rotor, al menos se controla o especifica un punto de ajuste de la velocidad de rotación de rotor. Sin embargo, la implementación de dicho punto de ajuste para la velocidad de rotación de rotor todavía puede llevarse a cabo mediante un sistema de control.

También se reconoció aquí en particular que, en principio, la regulación o el control de la instalación de energía eólica en función de una velocidad de viento detectada, en particular medida, es indeseable porque la detección de una velocidad de viento está sujeto regularmente a grandes imprecisiones. Sin embargo, también se reconoció que la velocidad de rotación de rotor ajustada en función de la velocidad de viento puede hacer frente a ligeras desviaciones de la curva característica de velocidad de viento-velocidad de rotación especificada, porque representa una mejora con respecto a la velocidad de rotación de rotor reducida utilizada anteriormente y todavía está por debajo de una velocidad de rotación nominal no reducida, al menos la mayor parte del tiempo. Además, mediante el control o regulación desacoplada de la velocidad de rotación y la potencia se lleva a cabo la regulación de la potencia todavía de forma independiente de la velocidad de viento detectada.

Se propone además que, en el modo de operación reducido, cuando la velocidad de viento continúa aumentando desde o por encima de la velocidad inicial de viento de ventisca, la potencia de salida y la velocidad de rotación de rotor se ajusten dependiendo de la velocidad de viento detectada, en particular medida. En particular, este ajuste se basa en una curva característica para cada una de estas dos variables. De este modo, se propone un concepto de control diferente para la operación de ventisca, según el cual tanto la velocidad de rotación como la potencia se ajustan en función de la velocidad de viento detectada. En este caso, por supuesto, también se puede realizar una configuración de este tipo mediante una regulación.

Según una realización, se propone que el aumento de la velocidad de rotación de rotor en el modo de operación reducido por encima de la velocidad de rotación nominal se realice en función de una variable representativa de una carga sobre las palas de rotor, en particular en función de una vibración detectada de al menos una de las palas de rotor, en particular una vibración torsional. Esto permite contrarrestar directamente dichas vibraciones. Se debe tener en cuenta que es bastante inusual aumentar la velocidad de rotación cuando se producen vibraciones en las palas de rotor, porque en principio un aumento de la velocidad de rotación tiende a conducir a un aumento de la carga. Sin embargo, aquí se reconoció que un aumento de la velocidad de rotación conduce a un aumento en la relación de velocidad de punta y puede evitar vibraciones torsionales en este modo de operación.

Por lo tanto, se propone que el aumento de la velocidad de rotación de rotor también se controle cuantitativamente en función de la carga o de un variable representativo de ella. En este caso es especialmente adecuado una regulación de velocidad de rotación en función de la carga.

Adicionalmente o alternativamente, se propone que el aumento de la velocidad de rotación de rotor en el modo de operación reducido se realice por encima de la velocidad de rotación nominal tan pronto como la variable representativa de una carga sobre las palas de rotor o la vibración detectada de al menos una de las palas de rotor supere un valor de umbral de carga predeterminado. Esto permite registrar cargas y establecer un valor umbral, cuya superación provoca una reacción, es decir, un aumento de la velocidad de rotación de rotor. Las dos alternativas mencionadas también se pueden combinar, es decir, que la carga mencionada provoque un aumento de la velocidad de rotación de rotor y que esta carga también conduzca cuantitativamente al aumento de la velocidad de rotación de rotor.

Según una realización, se propone que el modo de operación normal se base en una curva característica de velocidad de rotación normal que depende de la velocidad de viento.

Esta curva característica de velocidad de rotación normal describe básicamente el valor de velocidad de rotación en función de la velocidad de viento. Esto no significa necesariamente que la velocidad de rotación se controle enteramente en base a esta curva característica de velocidad de rotación normal, de tal manera que siempre se ajuste dependiendo de una velocidad de viento detectada. Esta curva característica de velocidad de rotación normal es inicialmente la base para un diseño, es decir, se utiliza para el diseño de la instalación de energía eólica y, si es necesario, se puede utilizar en secciones, especialmente en operación de ventisca, pero en realidad también se puede utilizar para ajustar la velocidad de rotación.

Además, el modo de operación reducido se basa en una curva característica de velocidad de rotación reducida que depende de la velocidad de viento. Esto también describe la curva de la velocidad de rotación en función de la velocidad de viento, pero aquí para el modo de operación reducido. También en este caso esto no significa necesariamente que la velocidad de rotación de rotor en cada zona se fije en función de esta curva característica de velocidad de rotación, es decir, en función de la velocidad de viento, aunque esto puede ser así al menos en parte.

Para la curva característica de velocidad de rotación reducida, se propone que esta, en operación de carga completa, hasta una velocidad de viento de unificación, tenga valores de velocidad de rotación más bajos que la curva característica de velocidad de rotación normal a los mismos valores de velocidad de viento y que a partir de la velocidad de viento de unificación en adelante, para velocidades de viento en aumento, la curva

característica de velocidad de rotación reducida concuerde parcial o totalmente con la curva característica de velocidad de rotación normal. Además, o como alternativa, se prevé que la curva característica de velocidad de rotación reducida presente, al menos en tramos, velocidades de rotación mayores que la curva característica de velocidad de rotación normal. En particular, se puede prever que la curva característica de velocidad de rotación reducida intersecte la curva característica de velocidad de rotación normal a la velocidad de viento de unificación y luego tenga valores más altos a medida que la velocidad de viento continúa aumentando. A más tardar, en los valores de velocidad de viento en los que la potencia de salida alcanza la potencia especificada reducida en el modo de operación normal en la operación de ventisca, ambas características de velocidad pueden coincidir.

Aquí se reconoció en particular que a la velocidad de viento de unificación las dos curvas características de velocidad de rotación tienen la misma velocidad, pero la potencia sigue siendo diferente y en consecuencia también hay un ángulo de paso de pala diferente y, por lo tanto, para el modo de operación reducido, a pesar de tener la misma velocidad de rotación, pueden existir condiciones de flujo menos favorables en la pala de rotor.

Como precaución, debe tenerse en cuenta que la curva característica de velocidad de rotación reducida se refiere a la curva característica de velocidad de rotación asignada al modo de operación reducido. No necesariamente tiene que tener una velocidad de rotación menor que la curva característica de velocidad de rotación normal.

Se propone preferiblemente que en el modo de operación reducido la velocidad de rotación de rotor a la velocidad de viento nominal sea menor que a la velocidad inicial de viento de ventisca y/o que la velocidad de viento de unificación sea igual o menor que la velocidad inicial de viento de ventisca. Por lo tanto, se propone especialmente que la velocidad de rotación de rotor del modo de operación reducido aumente hacia la velocidad inicial de viento de ventisca incluso en operación de carga completa. También se debe tener en cuenta que, por lo general, un aumento de velocidad de rotación solo se produce en la operación de carga parcial hasta la operación de carga completa y que, en operación de carga completa, la velocidad de rotación no se incrementa más para evitar cargas. Ahora se propone aumentar aún más la velocidad de rotación de rotor durante la operación de carga completa y lograr así una reducción de carga. En este caso, el aumento mismo se propone en dirección a la operación de ventisca, aunque es precisamente en la operación de ventisca donde se espera una reducción de la velocidad de rotación para reducir las cargas.

Según una realización, se propone que en la operación de carga parcial se especifique una curva de velocidad de rotación dependiente de la velocidad de viento, que es la misma en el modo de operación normal y en el modo de operación reducido hasta que la potencia de salida alcance la potencia especificada reducida. Para este fin, se propone, además, que el valor de la velocidad de rotación de rotor que se establece cuando la potencia de salida ha alcanzado la potencia especificada reducida forme una velocidad nominal reducida, con una velocidad de viento nominal reducida al mismo tiempo. La velocidad de rotación nominal reducida está por debajo de la velocidad de rotación nominal de instalación, y la velocidad de viento nominal reducida está por debajo de la velocidad de viento nominal de instalación. Se propone además que, en el modo de operación reducido, a medida que la velocidad de viento continúa aumentando hasta la velocidad de viento de escalada, las palas de rotor se ajusten de modo que la potencia de salida no aumente más. En particular, se propone que la potencia de salida mantenga el valor de la potencia especificada reducida y la velocidad de rotación de rotor se mantenga en el valor de la velocidad de rotación nominal reducida.

En consecuencia, se reconoció que se pueden utilizar sistemáticamente los mismos parámetros clave para el modo de operación reducido y para el modo de operación normal. Se propone un aumento de la velocidad de rotación de rotor para el modo de operación reducido, pero inicialmente se propone mantener la velocidad de rotación de rotor en el valor de la velocidad de rotación nominal reducida y aumentarla solo a partir de la velocidad de viento de escalada. En el modo de operación reducido, la velocidad de rotación de rotor puede ser inicialmente comparativamente baja y mantenerse, especialmente al comienzo de la operación de carga completa, y luego aumentarse si esto es apropiado para reducir las cargas torsionales por las razones mencionadas.

Se propone preferiblemente que la velocidad de viento de escalada esté al menos un 10 % por encima de la velocidad de viento nominal, en particular un 10 % por encima de la velocidad de viento nominal del modo de operación normal, es decir, un 10 % por encima de la velocidad de viento nominal de instalación. Se propone además que la velocidad de viento de escalada esté al menos un 10% por debajo de la velocidad inicial de viento de ventisca. De esta manera se proporciona un rango significativo en el cual se puede aumentar la velocidad de rotación de rotor desde la velocidad de viento de escalada hasta la velocidad inicial de viento de ventisca, mientras que al mismo tiempo se propone que el aumento no se produzca inmediatamente desde la velocidad de rotación nominal, sino solo a un valor significativamente más alto de la velocidad de viento.

Según otra realización, se propone que la velocidad de rotación de rotor y la potencia de salida en la operación de carga parcial se controlen en función de una curva característica de velocidad de rotación-potencia, donde se utiliza la misma curva característica de velocidad de rotación-potencia para el modo de operación normal y para el modo de operación reducido hasta la potencia especificada reducida o hasta la potencia nominal reducida. Se propone además que la velocidad de rotación de rotor y la potencia de salida se reduzcan a medida que aumenta la velocidad de viento a partir una velocidad de viento superior a la segunda velocidad de viento de ventisca, que es mayor que la velocidad inicial de viento de ventisca. Se especifica una curva característica de velocidad de rotación que depende de la velocidad de viento para reducir la velocidad de rotación de rotor y se especifica una curva característica de potencia para reducir la potencia de salida. Para el modo de operación normal y el modo de operación reducido, se utilizan la misma curva característica de velocidad de rotación y la misma curva característica de potencia para las velocidades de viento a partir de la segunda velocidad de viento de ventisca.

En particular, se propone utilizar curvas características de potencia diferentes para el modo de operación normal y para el modo de operación reducido para el rango desde la velocidad inicial de viento de ventisca hasta la segunda velocidad de viento de ventisca. Lo ideal es que las curvas características de velocidad de rotación sean las mismas en este rango o al menos las mismas en algunas secciones.

También en este caso se ha reconocido que a partir de la segunda velocidad de viento de ventisca el modo de operación normal y el modo de operación reducido pueden funcionar de forma idéntica. Según la invención también se propone una instalación de energía eólica. Esta incluye

- un generador eléctrico para generar energía eléctrica,
- un rotor aerodinámico con palas de rotor para generar una potencia mecánica a partir del viento para impulsar el generador, donde el rotor es operable con una velocidad de rotor variable,
- un dispositivo de alimentación para alimentar una potencia de salida genera a partir del viento a una red de suministro eléctrico en un punto de conexión a la red,
- un dispositivo de conmutación para conmutar una operación de la instalación de energía eólica entre un modo de operación normal sin reducción de potencia y un modo de operación reducido con reducción de potencia, donde en el modo de operación reducido se especifica una potencia especificada reducida con respecto a una potencia nominal de instalación, y
- un dispositivo de control que está configurado para controlar la instalación de energía eólica de tal manera que, cuando se opera en un modo de operación reducido y para velocidades de viento superiores a una velocidad de viento nominal, al menos en un rango o región de aumento de velocidad de rotación, la velocidad de rotación de rotor aumenta a medida que la velocidad de viento continúa aumentando, donde a pesar del aumento continuo de la velocidad de rotación, la potencia de salida no aumenta.

De este modo, en particular, se propone una instalación de energía eólica que dispone de dispositivos correspondientes para llevar a cabo al menos un procedimiento de operación de una instalación de energía eólica según una realización descrita anteriormente.

El generador eléctrico puede configurarse preferentemente como generador síncrono con excitación independiente o con excitación constante. Preferentemente, se propone una instalación de energía eólica sin engranajes en la que el rotor aerodinámico está conectado mecánicamente directamente a un rotor electrodinámico o rotor del generador.

El dispositivo de alimentación está configurado preferiblemente como un inversor o una disposición de inversores con varios inversores. Estos pueden recibir su potencia del generador, ya sea a través de un rectificador que suministra una corriente continua o una tensión continua, que luego el inversor convierte en corriente alterna alimentable. Sin embargo, también puede considerarse que el dispositivo de alimentación esté configurado como un convertidor completo, en particular como un denominado convertidor back-to-back, que genera una corriente alterna en un lado y recibe una corriente alterna para un generador en otro lado y también puede controlar al menos parcialmente el generador con este otro lado, es decir, en particular puede controlar una corriente de estator multifásica del generador.

El dispositivo de conmutación para conmutar la operación de la instalación de energía eólica entre el modo de operación normal y el modo de operación reducido puede estar previsto preferentemente en un ordenador de proceso e implementado allí, por ejemplo, como dispositivo de control, es decir, por ejemplo, programado.

El dispositivo de control también se puede implementar en el mismo ordenador de proceso o en otro ordenador de proceso y por lo tanto puede implementar los pasos de control descritos a través de este ordenador de proceso. En particular, el dispositivo de control está conectado al dispositivo de alimentación de tal manera que envía señales de control al dispositivo de alimentación. El dispositivo de control también puede estar preparado para enviar señales al dispositivo de conmutación. También es posible conectar preferentemente el dispositivo de control a medios de medición, en particular a medios de medición para detectar la velocidad de viento, una velocidad de rotación de rotor y/o una potencia de salida de la instalación de energía eólica.

También es posible que el dispositivo de conmutación sea parte del dispositivo de control.

Preferiblemente, la instalación de energía eólica está preparada para implementar al menos un procedimiento de operación de una instalación de energía eólica según una de las realizaciones descritas anteriormente, llevándolo a cabo total o parcialmente mediante el dispositivo de control. En particular, el dispositivo de control está así preparado para implementar al menos uno de los procedimientos descritos anteriormente para operar una instalación de energía eólica.

Según la invención se propone también un parque eólico que comprende una pluralidad de instalaciones de energía eólica según al menos una realización de las instalaciones de energía eólica descritas anteriormente. En particular, el parque eólico puede tener un controlador de parque central para especificar una potencia especificada reducida a cada instalación de energía eólica, en particular dependiendo de una reducción de potencia general para el parque eólico recibida externamente. De esta forma, el operador de la red puede, en particular, transmitir una reducción total de potencia como especificación al parque eólico, por ejemplo, como señal de solicitud correspondiente. Esto se puede hacer directamente en el controlador de parque. El parque eólico convierte luego esta reducción de potencia total recibida en reducciones de potencia individuales para las instalaciones de energía eólica individuales. Esto se puede hacer utilizando valores concretos o como porcentaje. Preferentemente, el controlador de parque central registra la potencia realmente suministrada a la red de suministro eléctrico o la suma de todas las potencias de salida de las instalaciones de energía eólica del parque eólico y puede, en función de ello, detectar si se consigue o no la reducción total de potencia recibida de fuentes externas y, a continuación, si es necesario, adaptar las potencias especificadas reducidas a las instalaciones de energía eólica. Esto también se puede hacer en valores absolutos o en valor porcentual, que, por ejemplo, especifica un valor porcentual para cada instalación de energía eólica en relación a su potencia nominal.

A continuación, se explicará la invención con más detalle mediante 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 parque eólico en una representación esquemática.

Figura 3 muestra un diagrama esquemático con dos curvas características de operación, es decir, para operación con potencia optimizada y operación con potencia reducida.

Figura 4 muestra un diagrama simplificado que ilustra una relación entre curvas de velocidad de rotación y la velocidad de viento con carga completa y ventisca.

Figura 5 muestra un diagrama esquemático de los ángulos de ataque aerodinámicos efectivos en función de la posición del radio de la pala de rotor para diferentes estados de operación.

Figura 6 muestra un diagrama simplificado de ángulos de ataque aerodinámicos efectivos en función de la posición de radio de la pala de rotor para diferentes curvas características de operación.

La figura 1 muestra una instalación de energía eólica 100 con una torre 102 y una góndola 104. Un rotor 106 con tres palas de rotor 108 y un spinner 110 está dispuesto en la góndola 104. Durante la operación, el rotor 106 se pone en rotación por acción del viento y acciona de este modo un generador en la góndola 104.

En la figura 1 se indica también un generador 130 en la góndola 104, que genera potencia eléctrica y la transmite a un inversor 132, habiendo sido previamente rectificada la corriente alterna generada por el generador. El inversor 132 alimenta la red de suministro eléctrico 138 a través de un transformador 134 en un punto de conexión a la red 136.

Para controlar el inversor 132, se proporciona un dispositivo de control 140 que controla el inversor 132, que forma un dispositivo de alimentación. Para un modo de operación de potencia reducida, se puede enviar una señal de reducción R a un dispositivo de conmutación 142. El dispositivo de conmutación 142, que también puede ser parte del dispositivo de control 140, inicia entonces un cambio del modo de operación normal al modo de operación reducido.

La figura 2 muestra un parque eólico 112 con, a modo de ejemplo, tres instalaciones de energía eólica 100, que pueden ser iguales o diferentes. De este modo, las tres instalaciones de energía eólica 100 son representativos de prácticamente cualquier número de instalaciones de energía eólica de un parque eólico 112. Las instalaciones de energía eólica 100 suministran su potencia, en concreto la corriente que generan, a través de una red eléctrica del parque eólico 114. En este caso, las corrientes o las potencias generadas por cada instalación de energía eólica 100 se suman y normalmente se proporciona un transformador 116 que aumenta la tensión en el parque para luego alimentarla a la red de suministro 120 en el punto de alimentación 118, que generalmente también se denomina PCC. La figura 2 es solo una representación simplificada de un parque eólico 112, en el que, por ejemplo, no se muestra ningún sistema de control, aunque, por supuesto, hay un sistema de control presente. La red del parque 114 también puede diseñarse de forma diferente, por ejemplo, disponiendo de un transformador a la salida de cada instalación de energía eólica 100, por citar sólo otra realización.

El parque eólico 112 de la Figura 2 puede disponer adicionalmente de un controlador de parque central 150. Este controlador de parque central 150 puede recibir una señal de reducción de potencia R de un operador de red 152 y por tanto de fuentes externas. El controlador de parque central 150 puede emitir valores individuales o valores porcentuales para la reducción de potencia de las instalaciones de energía eólica individuales 100 a partir de esta señal de reducción R.

La figura 3 muestra esquemáticamente dos curvas características de operación, denominadas curvas características de velocidad de rotación-potencia. De estas, la primera curva característica de velocidad de rotación-potencia 301 se refiere a un modo de operación normal, es decir, una denominada curva característica de operación de potencia optimizada. Aquí se optimiza la operación de la instalación y la curva característica de velocidad de rotación-potencia 301 se configura correspondientemente de forma óptima y también se adapta a la pala de rotor y al ángulo de pala seleccionado correspondientemente. La potencia P aumenta así a partir de una velocidad de rotación inicial n_0 con velocidades de rotación creciente hasta la velocidad de rotación nominal n_N y alcanza también entonces la potencia nominal P_N , es decir, la potencia nominal de instalación.

Una curva característica de operación de potencia reducida 302 corresponde al menos inicialmente a la primera curva característica de operación, es decir, la primera curva característica de velocidad de rotación-potencia 301, hasta que se alcanzan la velocidad de rotación nominal reducida n_{NR} y la potencia nominal reducida P_{NR} . Entonces, se alcanza la potencia especificada reducida correspondiente a esta potencia nominal reducida P_{NR} y no se puede aumentar más la potencia de salida. Al mismo tiempo, la velocidad de rotación de rotor n queda prácticamente congelada en este valor de velocidad de rotación bajo. La velocidad de rotación de rotor n tiene entonces este valor de velocidad de rotación de potencia nominal reducida n_{NR} y lo mantiene.

De acuerdo con una realización de la invención, la Figura 4 muestra una curva de una velocidad de rotación de rotor para tres casos de operación, a saber, una curva de potencia optimizada 401, una curva de potencia reducida mejorada 402 y una curva de potencia reducida no mejorada 403.

La operación de la instalación por encima de la velocidad de viento nominal se ilustra con la ayuda de la Figura 4. La figura 4 muestra la relación entre la velocidad de rotación y la velocidad de viento en el rango de operación de la instalación en el rango de carga completa del modo de operación respectivo, es decir, para velocidades de viento superiores a la velocidad de viento nominal aplicable para el modo de operación respectivo. Por razones de claridad, no se muestra la operación de carga parcial hasta alcanzar la velocidad de rotación nominal.

La curva de potencia optimizada 401 muestra así el modo de operación de potencia optimizada OM0. A partir de la velocidad de viento nominal $V_{Nenn,OM0}$, la instalación se regula a la velocidad de rotación nominal constante N_{Soll} hasta la velocidad inicial de viento de ventisca V_{SA} , a la que la instalación pasa a la operación de ventisca, en la que la velocidad de rotación disminuye desde la velocidad nominal N_{Soll} del modo de potencia optimizada OM0 linealmente a la velocidad de ralentí N_t a la velocidad de viento de apagado V_{max} .

El modo de potencia reducida tiene, como se mencionó, una velocidad de rotación nominal más baja N_{red} y una velocidad de viento nominal igualmente reducida $V_{Nenn,red}$, como se muestra en la Figura 4 mediante la curva 403 de potencia reducida no mejorada. Incluso en el modo de operación reducido, la instalación se controlaba anteriormente a su velocidad de rotación nominal constante durante la operación de carga completa hasta que

se alcanzaba la operación de ventisca. En el modo de operación reducido, esta es la velocidad de rotación nominal reducida N_{red} . Como la velocidad de rotación ya está reducida, la instalación solo se reduce correspondientemente a partir de velocidades de viento superiores a V_{SA} de manera lineal hasta la velocidad de ralenti N_t a la velocidad de viento de apagado V_{max} .

Ahora se ha reconocido que este enfoque tiene la desventaja de que cuando se opera a la velocidad de rotación nominal reducida N_{red} se establecen relaciones de velocidad de punta pequeñas, que dan como resultado distribuciones de ángulo de ataque con ángulos de ataque negativos altos en el área exterior de la pala de rotor. Sin embargo, debido a posibles problemas aeroelásticos, estos ángulos de ataque negativos elevados no son deseables, lo que ahora se ha reconocido.

Por lo tanto, se propone un control operativo mejorado en el rango de carga completa en modos operativos de potencia reducida, que evita estos ángulos de ataque negativos elevados, mostrado en la Figura 4 mediante la curva de potencia reducida mejorada 402. Inicialmente, el rotor de la instalación gira a la velocidad de rotación nominal reducida N_{red} como en la curva 402 de potencia reducida no mejorada. A partir de una velocidad de viento predeterminada $V_{SA, red}$ que es menor que la velocidad inicial de viento de ventisca V_{SA} , la velocidad de rotación se incrementa de manera arbitraria, pero preferiblemente de manera lineal, hasta una velocidad de rotación constante que sea mayor que N_{red} preferiblemente hasta N_{Soll} . A partir de ese momento, la curva característica de velocidad de rotación-velocidad de viento toma el mismo curso que en el modo de potencia optimizada OM0 según la curva de potencia optimizada 401.

La velocidad de viento $V_{SA, red}$ no tiene que ser mayor que $V_{Nenn, OM0}$ como se muestra en la figura, sino que también puede ser menor, pero en cualquier caso es mayor que $V_{Nenn, red}$. La velocidad de viento $V_{SA, red}$ puede determinarse de antemano mediante simulaciones y depende al menos del tipo de instalación y de la potencia nominal reducida. Como alternativa, se propone que se midan las vibraciones durante la operación de la instalación y que, si se superan los valores de umbral, la instalación funcione a mayor velocidad de rotación. La velocidad de viento $V_{SA, red}$ en cualquier caso, no se trata de un valor fijo, sino que difiere de un tipo de instalación a otro debido a los diferentes diseños de las palas de rotor.

La figura 5 explica por qué la técnica anterior puede dar lugar a ángulos de ataque negativos elevados en la región exterior de la pala y por qué la propuesta inventiva conduce a ángulos de ataque mayores, es decir, ángulos de ataque menos negativos.

A velocidades de viento superiores a la velocidad de viento nominal V_{Nenn} por un lado, las relaciones de velocidad de punta disminuyen de manera continua y, por otro lado, los ángulos de la pala, también llamados ángulos de paso, aumentan de manera continua. La disminución de la relación de velocidad de punta λ , que depende de la velocidad de rotación n , del radio de la pala R y de la velocidad de viento v_{wind} que está relacionada mediante la expresión

$$\lambda = \frac{v_{tip}}{v_{wind}} = \frac{n \cdot \frac{2\pi}{60} R}{v_{wind}}$$

se ve fácilmente, ya que la velocidad de rotación n y, por lo tanto, la velocidad de punta de la pala v_{tip} es constante en el rango de carga completa. El radio R se deriva del radio del rotor aerodinámico y se utiliza en el sentido del radio R de la pala de rotor, que básicamente significa la longitud de la pala del rotor más la distancia restante desde la raíz de la pala hasta el eje de rotación. Las posiciones del radio de las palas de rotor según los diagramas de las figuras 5 y 6 también se refieren a esto. La posición máxima del radio corresponde a la punta de la pala y la mínima a la raíz de la pala del rotor.

En cualquier caso, el aumento del ángulo de paso al aumentar la velocidad de viento es igualmente fácil de entender, ya que la potencia eólica aumenta al aumentar la velocidad de viento y para alcanzar la potencia nominal constante solo una fracción decreciente de la potencia contenida en el flujo entrante puede convertirse en energía mecánica en el eje del rotor. Por ello, las hojas se orientan adecuadamente fuera del viento.

Cuanto menor sea la potencia nominal, por ejemplo, cuando se opera a potencia nominal reducida, mayores serán los ángulos de paso requeridos. La influencia de la disminución de la relación de velocidad de punta y el aumento del ángulo de paso en el ángulo de ataque aplicado a la pala es diferente y se muestra con la ayuda de la Figura 5. La línea continua 501 muestra una curva de ángulo de ataque típica sobre el radio de la pala en el modo de operación de potencia óptima, también denominado "OM0", en el rango de carga parcial.

Si solo se reduce la relación de velocidad de punta y el ángulo de paso permanece inicialmente en gran medida constante, como puede ser el caso, por ejemplo, durante la transición del rango de carga parcial al rango de

carga nominal, es decir, durante la transición de la operación de carga parcial a la operación de carga completa, entonces se establece una curva de ángulo de ataque, como se muestra mediante la línea de puntos 502 en la Figura 5.

Los aumentos del ángulo de ataque son mayores en el área interior de la pala y disminuyen hacia la punta de la pala, indicados en la Figura 5 por las dos flechas sólidas 504 y 506. Si el ángulo de paso también aumenta con el aumento de la velocidad de viento durante la operación de carga nominal, que también puede denominarse operación de carga completa, se obtiene la distribución del ángulo de ataque discontinua 503. Un aumento del ángulo de paso conduce a una disminución aproximadamente uniforme del ángulo de ataque aerodinámico, indicado por las flechas discontinuas 508 y 510.

Especialmente a velocidades de viento altas y una baja recepción de potencia por parte del generador, surge la situación de que las palas de rotor tienen relaciones de velocidad de punta muy bajas y, al mismo tiempo, ángulos de paso grandes. El resultado es un alto gradiente en los ángulos de ataque aerodinámicos a lo largo del radio de la pala, con ángulos de ataque más altos en el área interior de la pala y ángulos de ataque correspondientemente más bajos en el área exterior de la pala, que pueden tener valores negativos altos. A partir de una combinación predecible de velocidad de viento y modo de operación de potencia reducida, los ángulos de ataque se vuelven tan pequeños que puede producirse una separación del flujo en el lado de presión del perfil de la pala del rotor, lo que se conoce como pérdida negativa.

Se reconoció en particular que estas condiciones de entrada de flujo deben evitarse, ya que permanecer en este estado puede provocar que las palas de rotor oscilen y, en última instancia, causar daños estructurales. Además, este estado de flujo también debe evitarse desde un punto de vista acústico, ya que la separación del flujo puede provocar emisiones de ruido muy incrementadas, que también pueden percibirse como desagradables debido a su espectro de frecuencia.

La figura 6 explica la propuesta según la invención, al menos parte de ella. La propuesta según la invención se centra en la gestión operativa de la instalación para solucionar el problema del elevado ángulo de ataque negativo en la zona exterior de las palas. Como ya se ha descrito, los ángulos de ataque negativos elevados en la zona exterior de la pala son el resultado de relaciones de velocidad de punta bajas combinadas con ángulos de paso de pala elevados. En comparación con el estado de la técnica, la propuesta inventiva de aumentar la velocidad de rotación a una potencia eléctrica constante y reducida da como resultado un aumento en las relaciones de velocidad de punta al mismo tiempo que reduce los ángulos de paso cuando se consideran condiciones a velocidades de viento idénticas. El ángulo de paso disminuye porque, con una velocidad de viento constante y una potencia nominal constante, el coeficiente de potencia de la instalación permanece constante. Si observa el campo característico de la pala de rotor, puede ver que, a bajas relaciones de velocidades de punta, el ángulo de paso cae cuando se mueve a lo largo de la isolinia del coeficiente de potencia en la dirección de aumento de las relaciones de velocidad de punta.

Un aumento simultáneo en la relación de velocidad de la punta y una disminución en el ángulo de paso con la potencia de instalación sin cambios conduce entonces a una distribución del ángulo de ataque en el nuevo modo operativo propuesto como se muestra en la Figura 6 mediante la línea de puntos y guiones 602. En comparación con la distribución del ángulo de ataque del estado de la técnica en operación de potencia reducida, representada por la línea discontinua 603, se puede ver que los ángulos de ataque disminuyen en la zona interior de la pala, pero aumentan en la zona exterior de la pala, como se desea. El aumento del ángulo de ataque en la zona exterior de la pala reduce el riesgo de separación del flujo en el lado de presión de la pala de rotor con los efectos negativos ya mencionados.

Por tanto, la invención sirve para evitar estados de operación durante la operación de la instalación de energía eólica en los que los fenómenos aeroelásticos provoquen vibraciones en las palas de rotor que puedan provocar un aumento de las cargas de la instalación. Además, la invención sirve para evitar un aumento considerable de las emisiones de ruido durante la operación de la instalación en caso de fuertes vientos o ventiscas.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para operar una instalación de energía eólica (100), y
 - la instalación de energía eólica (100) comprende un rotor aerodinámico (106) con palas de rotor,
 - el rotor (106) es operable con una velocidad de rotación de rotor variable,
 - la instalación de energía eólica (100) entrega una potencia de salida generada a partir del viento para alimentar a una red de suministro eléctrico,
 - la instalación de energía eólica (100) puede funcionar en un modo de operación normal sin reducción de potencia y
 - en un modo de operación reducido con reducción de potencia, en el que se especifica una potencia especificada reducida con respecto a una potencia nominal de la instalación, donde
 - cuando se opera en el modo de operación reducido para velocidades de viento superiores a una velocidad de viento nominal (V_{Nenn}), al menos en una región de aumento de velocidad de rotación, la instalación de energía eólica aumenta su velocidad de rotación de rotor a medida que aumenta aún más la velocidad de viento, donde a pesar del aumento continuo en la velocidad de rotación la potencia de salida no se incrementa.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que
 - en función de la velocidad de viento predominante, la instalación de energía eólica (100) se opera en una operación de carga parcial, una operación de carga completa o una operación de ventisca, en donde
 - en operación de carga parcial, la velocidad de viento se encuentra por debajo de la velocidad de viento nominal, de modo que no se puede alcanzar la potencia máxima que se puede generar,
 - en operación de carga completa, la velocidad de viento se encuentra en, o por encima de, la velocidad de viento nominal (V_{Nenn}) pero por debajo de la velocidad de viento de ventisca, de modo que se genere la máxima potencia que se puede generar, y
 - en operación de ventisca, la velocidad de viento se sitúa en, o por encima de, la velocidad inicial de viento de ventisca, y se genera menos de la potencia máxima para proteger la instalación de energía eólica, y por que
 - en el modo de operación reducido, la instalación de energía eólica, en operación de carga completa,
 - para velocidades de viento superiores a la velocidad de viento nominal (V_{Nenn}) hasta una velocidad de viento de escalada que se encuentra por encima de la velocidad de viento nominal (V_{Nenn}) y por debajo de la velocidad inicial de viento de ventisca, mantiene constante su velocidad de rotación de rotor a una velocidad de rotación nominal reducida ($V_{Nenn,red}$) y
 - para velocidades de viento superiores a la velocidad de viento de escalada, aumenta su velocidad de rotación de rotor, en particular
 - a medida que la velocidad de viento aumenta aún más
 - la aumenta de forma continua, en particular de forma lineal, hasta la velocidad inicial de viento de ventisca, y/o
 - la aumenta continuamente hasta una velocidad de rotación nominal normal.
3. Procedimiento según se reivindica en la reivindicación 1 o 2, caracterizado por que
 - en el modo de operación reducido
 - la potencia de salida y/o la velocidad de rotación de rotor (n) en una, o en la, operación de carga parcial se ajusta en función de una curva característica predefinida, en particular una curva característica de velocidad de rotación-potencia (301), hasta que la potencia de salida alcance el valor de la potencia especificada reducida, y
 - a medida que aumenta la velocidad de viento, en particular en una, o en la, operación de carga completa, la potencia de salida se regula al valor de la potencia especificada reducida y la velocidad de rotación de rotor (n) se ajusta en función de una velocidad de viento determinada, en particular medida, en particular sobre la base de una curva característica de velocidad de viento-velocidad de rotación, y/o
 - a medida que aumenta la velocidad de viento desde o por encima de una, o de la, velocidad inicial de viento de ventisca, la potencia de salida y la velocidad de rotación de rotor (n) se ajustan en función de la velocidad de viento determinada, en particular medida, en particular sobre la base de una curva característica de velocidad de viento-potencia y de la curva característica de velocidad de viento-velocidad de rotación.
4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que
 - el aumento de la velocidad de rotación de rotor (n) en el modo de operación reducido se realiza por encima de la velocidad de rotación nominal reducida en función de una variable representativa de una carga de las palas del rotor, en particular en función de una oscilación detectada de al menos una de las palas del rotor, en particular una oscilación torsional, y/o por que
 - el aumento de la velocidad de rotación de rotor (n) en el modo de operación reducido se realiza por encima de la velocidad de rotación nominal reducida tan pronto como la variable representativa de una carga en las

palas del rotor, o la oscilación detectada de al menos una de las palas del rotor supera un valor de umbral de carga predefinido, y/o

- el aumento de la velocidad de rotación de rotor (n) en el modo de operación reducido se realiza a valores superiores a la velocidad de rotación nominal normal.

5

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que

- el modo de operación normal se basa en una curva característica de velocidad de rotación normal que depende de la velocidad de viento,

10 - el modo de operación reducido se basa en una curva característica de velocidad de rotación reducida que depende de la velocidad de viento, y

- la curva característica de velocidad de rotación reducida

- en operación de carga completa hasta una velocidad de viento de unificación comprende valores de velocidad de rotación más bajos que la curva característica de velocidad de rotación normal a los mismos valores de velocidad de viento y

15

- coincide parcial o totalmente con la curva característica normal de velocidad de rotación para una velocidad de viento que continúa aumentando a partir de la velocidad de viento de unificación, y/o

- tiene velocidades de rotación más altas, al menos en secciones, que la curva característica de velocidad de rotación normal.

20

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que

- en el modo de operación reducido, la velocidad de rotación de rotor (n) a la velocidad de viento nominal es menor que a la velocidad inicial de viento de ventisca y/o por que

25

- la velocidad de viento de unificación corresponde con la velocidad inicial de viento de ventisca o se encuentra por debajo de ella.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que

30

- en una, o la, operación de carga parcial se especifica una curva de velocidad de rotación que depende de la velocidad de viento, que es la misma en el modo de operación normal y en el modo de operación reducido, hasta que la potencia de salida alcanza la potencia especificada reducida,

- el valor de la velocidad de rotación de rotor que se ajusta cuando la potencia de salida alcanza la potencia especificada reducida forma una velocidad de rotación nominal reducida, donde al mismo tiempo una velocidad de viento nominal reducida ($V_{Nenn,red}$) está presente, y donde la velocidad de rotación nominal reducida se encuentra por debajo de una velocidad de rotación nominal de instalación, y la velocidad de viento nominal reducida ($V_{Nenn,red}$) se encuentra por debajo de una velocidad de viento nominal de instalación, y

35

- en el modo de operación reducido, a medida que la velocidad de viento aumenta hasta una, o la, velocidad de viento de escalada, las palas del rotor se ajustan de tal manera que

40

- la potencia de salida no siga aumentando y, en particular, conserve el valor de la potencia especificada reducida, y

- la velocidad de rotación de rotor (n) se mantenga en el valor de la velocidad de rotación nominal reducida.

45

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que

- la velocidad de rotación de rotor (n) y la potencia de salida en la operación de carga parcial se controlan en función de una curva característica de velocidad de rotación-potencia, donde hasta la potencia especificada reducida, o hasta la potencia nominal reducida para el modo de operación normal y para el modo de operación reducida se utiliza la misma curva característica de velocidad de rotación-potencia,

50

- la velocidad de rotación de rotor (n) y la potencia de salida se reducen a medida que la velocidad de viento aumenta, a partir de una velocidad de viento que es mayor que una segunda velocidad de viento de ventisca que es mayor que la velocidad inicial de viento de ventisca, donde

- se especifica una curva característica de velocidad de rotación que depende de la velocidad de viento para la reducción de la velocidad de rotación de rotor (n), y

55

- se especifica una curva característica de potencia para la reducción de la potencia de salida y

- para el modo de operación normal y el modo de operación reducido se usa la misma curva característica de velocidad de rotación y la misma curva característica de potencia para velocidades de viento a partir de la segunda velocidad de viento de ventisca.

60

9. Instalación de energía eólica que comprende

- un generador eléctrico para generar potencia eléctrica,

- un rotor aerodinámico con palas de rotor para generar una potencia mecánica a partir del viento para impulsar el generador, donde
 - el rotor es operable con velocidad de rotación de rotor variable,
 - un dispositivo de alimentación para alimentar una potencia de salida generada a partir del viento a una red de suministro eléctrico en un punto de conexión a la red,
 - un dispositivo de conmutación (142) para conmutar una operación de la instalación de energía eólica entre
 - un modo de operación normal sin reducción de potencia y
 - un modo de operación reducido con reducción de potencia, donde en el modo de operación reducido se especifica una potencia especificada reducida con respecto a una potencia nominal de instalación, y
 - un dispositivo de control (140), caracterizado por que el dispositivo de control está configurado para controlar la instalación de energía eólica de tal manera que
 - cuando se opera en el modo de operación reducido y
 - para velocidades de viento superiores a una velocidad de viento nominal (V_{Nenn}), al menos en una región de aumento de velocidad de rotación, la velocidad de rotación de rotor (n) aumenta a medida que aumenta aún más la velocidad de viento, donde a pesar del aumento continuo en la velocidad de rotación la potencia de salida no aumenta.
10. Instalación de energía eólica (100) según la reivindicación 9, caracterizada por que la instalación de energía eólica (100), en particular el dispositivo de control (140), está configurada para llevar a cabo un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8.
11. Parque eólico (112) con una pluralidad de instalaciones de energía eólica según la reivindicación 9 o 10, donde las instalaciones de energía eólica alimentan una red de suministro eléctrico (138) en un punto de conexión a la red común.
12. Parque eólico según se reivindica en la reivindicación 11, caracterizado por que incluye un controlador de parque central (15) para especificar en cada caso una potencia especificada reducida a las instalaciones de energía eólica (100), en particular en función de una reducción de potencia total para el parque eólico (112) recibida desde el exterior.

DIBUJOS

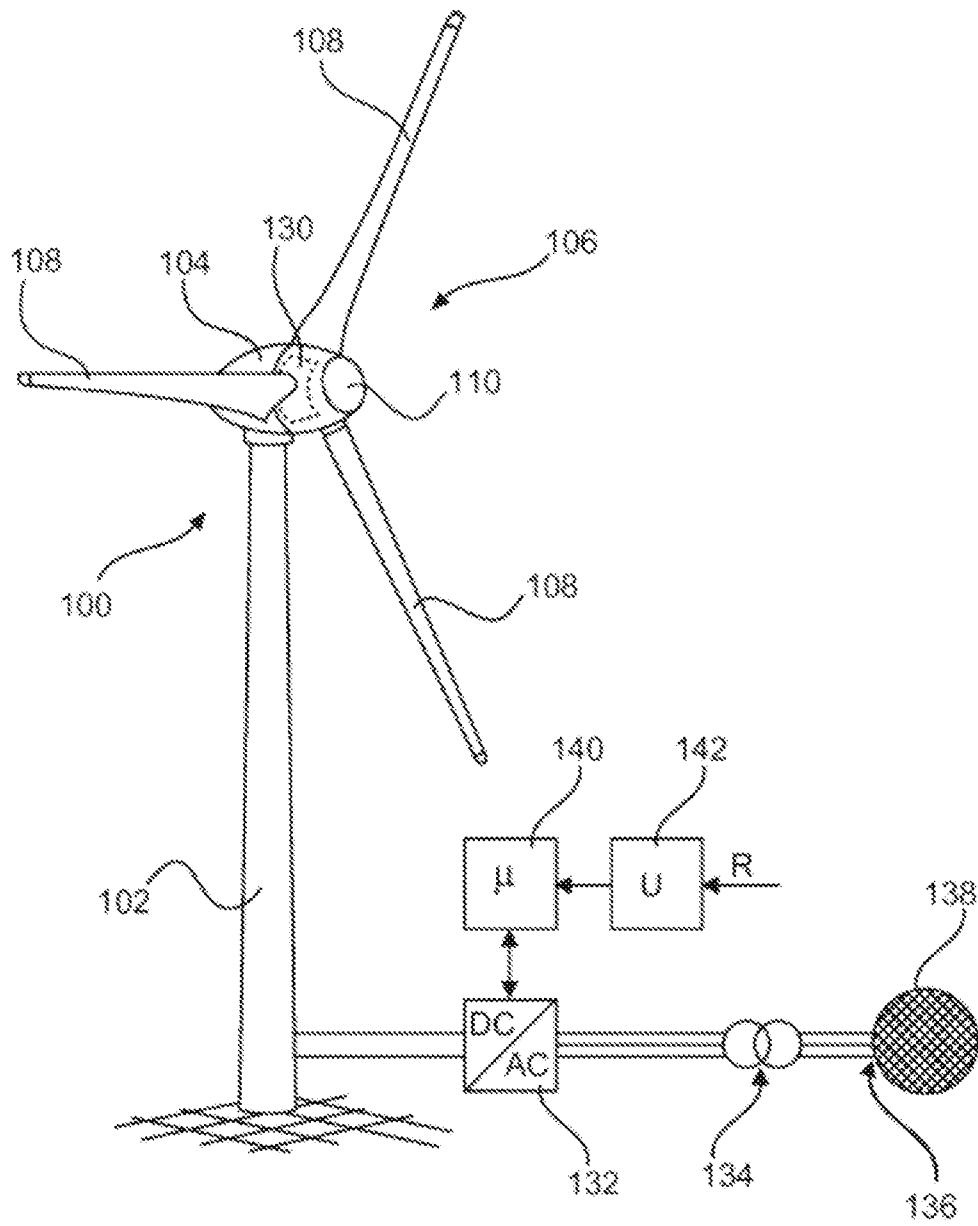


Fig. 1

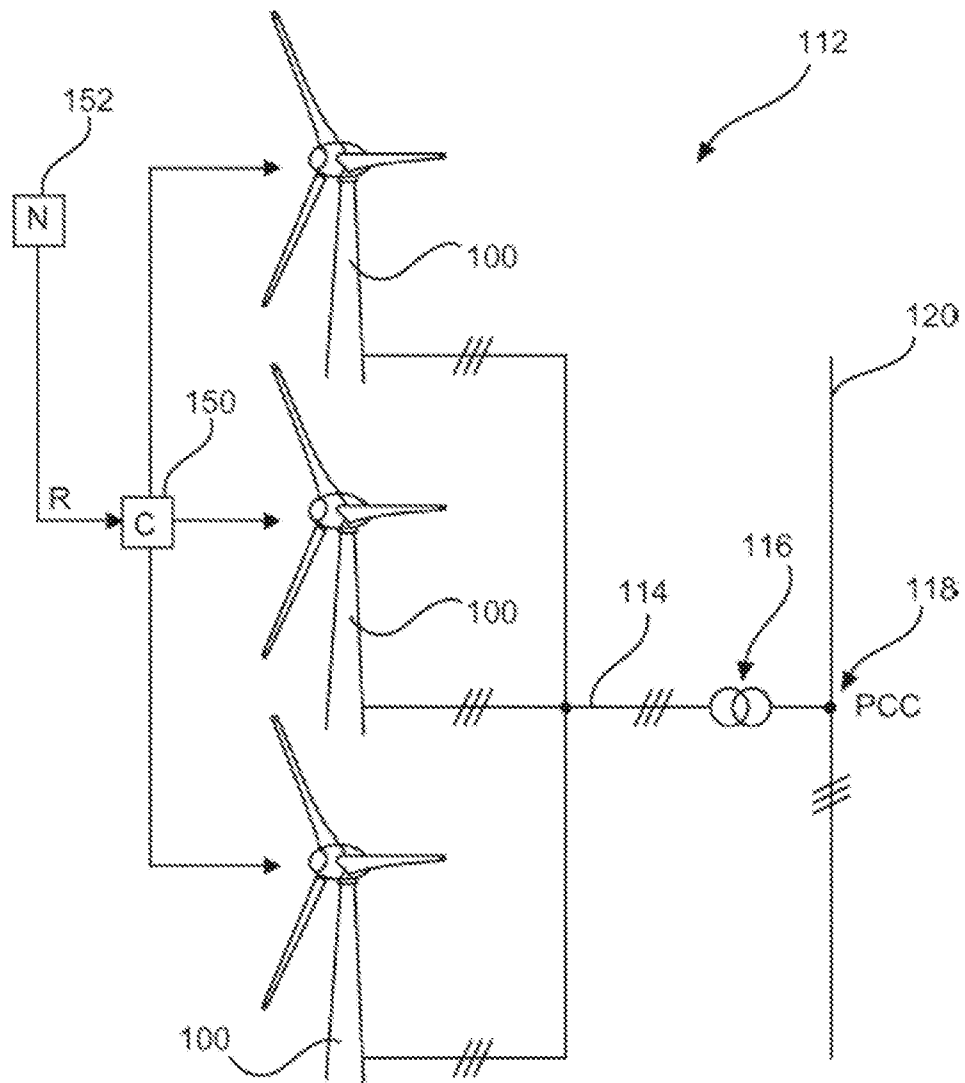


Fig. 2

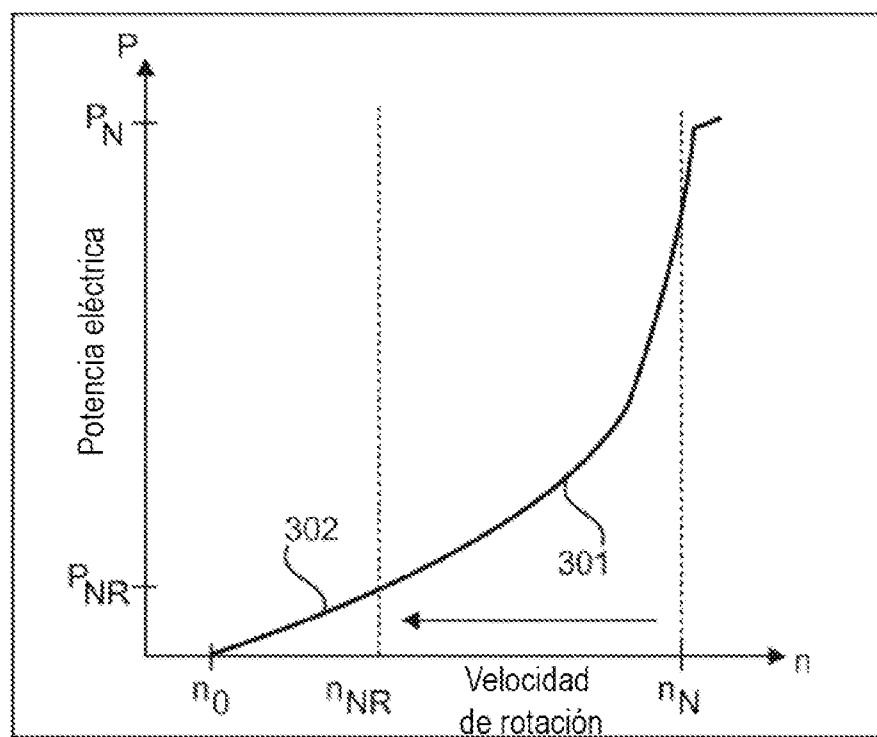


Fig. 3

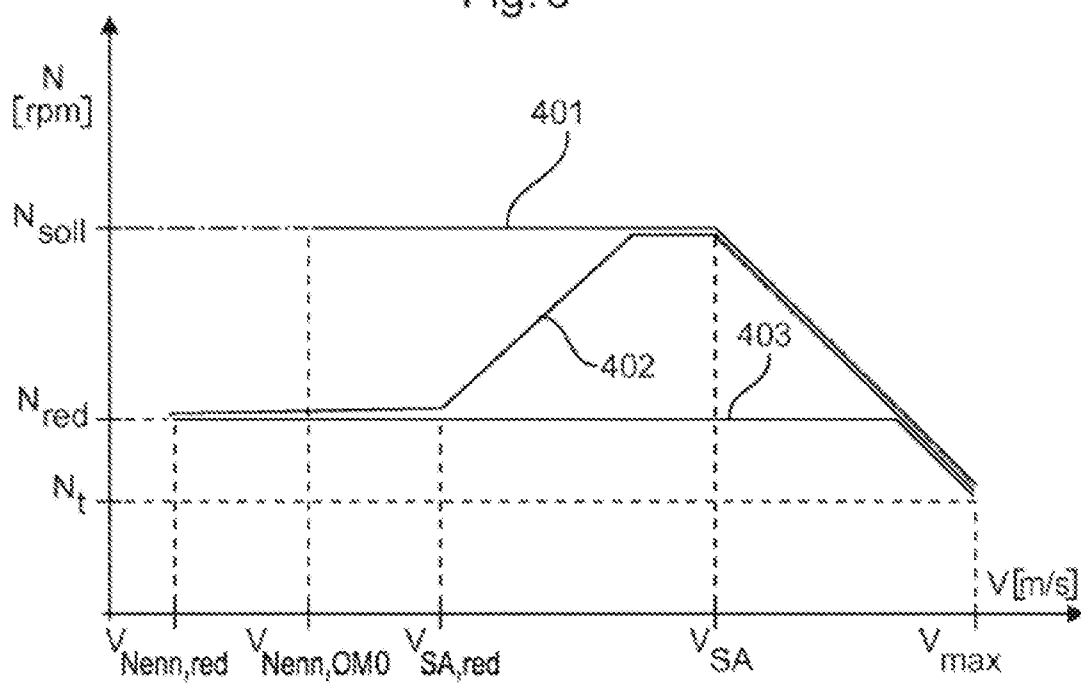


Fig. 4

