

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 536 231**

51 Int. Cl.:

**F03D 9/00** (2006.01)

**F03D 7/04** (2006.01)

**F03D 7/02** (2006.01)

**H02J 3/24** (2006.01)

**H02J 3/48** (2006.01)

**H02J 3/38** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.08.2011 E 11743428 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.04.2015 EP 2603696**

54 Título: **Producción de energía eólica con fluctuaciones de potencia reducidas**

30 Prioridad:

**13.08.2010 US 373414 P**

**13.08.2010 DK 201000712**

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

**21.05.2015**

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)**

**Hedeager 42**

**8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**TARNOWSKI, GERMÁN, CLAUDIO**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 2 536 231 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

Producción de energía eólica con fluctuaciones de potencia reducidas

### Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a un procedimiento para hacer funcionar un parque eólico o una turbina eólica con fluctuaciones de potencia reducidas, y a un sistema de control y un parque eólico o turbina eólica dispuesto para llevar a cabo este procedimiento.

### Antecedentes de la invención

10 En una red de suministro eléctrico, normalmente los consumidores pueden consumir potencia eléctrica de manera incontrolada. Puesto que casi no se almacena energía en la red, no puede haber un desequilibrio entre la potencia producida y la potencia consumida. Por lo tanto, la producción momentánea de potencia debe coincidir con el consumo de potencia momentáneo. La superproducción da lugar a un incremento en la frecuencia de la red más allá del valor nominal (por ejemplo, 50 o 60 Hz), ya que los generadores síncronos convencionales aceleran, mientras que el sobreconsumo dará lugar a una disminución en la frecuencia de la red más allá del valor nominal (por ejemplo, 50 o 60 Hz), ya que entonces los generadores síncronos convencionales decelerarán.

15 Con el fin de estabilizar la frecuencia de la red eléctrica, de forma convencional, aproximadamente un 10 % de los productores contribuyen a lo que se denomina "control energético primario". Estos productores, también denominados "controladores primarios", incrementan la salida de potencia cuando la frecuencia cae por debajo del valor nominal y disminuyen la salida de potencia cuando sube por encima del valor nominal.

20 De forma convencional, las turbinas eólicas no contribuyen al control primario, en primer lugar porque normalmente las turbinas eólicas no pueden incrementar su salida de potencia por una orden (ya que normalmente funcionan a una carga nominal o, cuando funcionan a una carga parcial, en un punto de trabajo óptimo), y en segundo lugar porque la energía eólica disponible, normalmente, se debe explotar en su totalidad. Se han propuesto excepciones, por ejemplo, en los documentos US 7.372.173 B2, WO 2009/112605 A1 y WO 2010/000663 A1, de acuerdo con estos, la salida de potencia se incrementa con la disminución de la frecuencia de la red por debajo de un límite de frecuencia determinado, y viceversa.

25 En general, la energía eólica añade un momento adicional de inestabilidad de la red debido a que, con una fracción significativa de energía eólica en una red, no sólo el consumo es incontrolado, sino también la producción por las turbinas eólicas. Aún cuando las previsiones de viento permiten predecir la producción de energía eólica con una precisión considerable sobre una base a largo plazo (del nivel de horas), normalmente la velocidad del viento fluctúa de manera impredecible sobre una base a corto plazo (del nivel de minutos a unos pocos segundos). Una turbina eólica que funciona a carga parcial (es decir, cuando la velocidad del viento está por debajo de la velocidad del viento nominal de la turbina eólica considerada) normalmente transformará estas fluctuaciones de la velocidad del viento en fluctuaciones correspondientes de la cantidad de potencia real producida y suministrada a la red eléctrica. Sólo a velocidades del viento por encima de la nominal, cuando una turbina eólica funciona a una carga nominal, normalmente las turbinas eólicas controlan su salida de potencia para que sea constante a la salida de potencia nominal.

30 La consecuencia de la producción de potencia fluctuante por las turbinas eólicas sobre la estabilidad de la red depende de las características de la red. En una gran red estable, una fluctuación de potencia por una turbina eólica o un parque eólico no producirá ninguna respuesta significativa en forma de una fluctuación de frecuencia. Por tanto, dichas redes pueden hacer frente a mayores variaciones de potencia. Sin embargo, en una red pequeña aislada, o en redes débiles, una fluctuación de potencia de este tipo puede producir una fluctuación de frecuencia significativa, de modo que las variaciones de potencia a corto plazo pueden provocar problemas de estabilidad y regulación en la red (E. Hau, "Windturbines", Springer, Berlín, 2000, sección 13.1.5, p. 390).

### Sumario de la invención

45 La invención proporciona un procedimiento de funcionamiento a carga parcial de una turbina eólica que suministra potencia a una red eléctrica que está equipada con capacidad de regulación frente a fluctuaciones de frecuencia de la red. El procedimiento comprende monitorizar la estabilidad de la red eléctrica y, tras la detección de una reducción en la estabilidad de la red, cambiar el funcionamiento de la turbina eólica limitando las fluctuaciones provocadas por el viento del suministro de potencia a la red eléctrica, o reduciendo un límite ya existente para las fluctuaciones del suministro de potencia.

50 De acuerdo con otro aspecto, se proporciona un sistema de control para controlar al menos una turbina eólica que suministra potencia a una red eléctrica. El sistema de control está dispuesto para llevar a cabo un procedimiento que comprende monitorizar la estabilidad de la red eléctrica y, tras la detección de una reducción en la estabilidad de la red, cambiar el funcionamiento de la turbina eólica limitando las fluctuaciones provocadas por el viento del suministro de potencia a la red eléctrica, o reduciendo un límite ya existente para las fluctuaciones del suministro de potencia.

De acuerdo con otro aspecto, se proporciona un parque eólico o turbina eólica que comprende un control para controlar al menos una turbina eólica que suministra potencia a una red eléctrica. El sistema de control está dispuesto para llevar a cabo un procedimiento que comprende monitorizar la estabilidad de la red eléctrica y, tras la detección de una reducción en la estabilidad de la red, cambiar el funcionamiento de la turbina eólica limitando las fluctuaciones provocadas por el viento del suministro de potencia a la red eléctrica, o reduciendo un límite ya existente para las fluctuaciones del suministro de potencia.

Otras características son inherentes en los procedimientos y productos divulgados o serán evidentes para los expertos en la técnica a partir de la siguiente descripción y los dibujos adjuntos.

**Breve descripción de los dibujos**

Se explican modos de realización de la presente invención a modo de ejemplo con respecto a los dibujos adjuntos, en los que:

la fig. 1 muestra esquemáticamente un modo de realización de una turbina eólica ejemplar;

la fig. 2 ilustra, por medio de un ejemplo, la variación de potencia y frecuencia en función del tiempo en un modo de realización con funcionalidad del límite de fluctuaciones;

la fig. 3 es un diagrama de circuito funcional de un modo de realización de un controlador de parque eólico dispuesto para realizar el procedimiento explicado en relación con la fig. 2;

la fig. 4 es un diagrama de flujo para ilustrar funciones adicionales o alternativas de modos de realización.

**Descripción detallada de los modos de realización**

Antes de volver a la descripción detallada de los modos de realización en base a los dibujos, se analizarán unos pocos puntos más generales de los modos de realización.

Los modos de realización se refieren a un procedimiento de funcionamiento de una turbina eólica (por ejemplo, una turbina eólica de velocidad variable) que suministra potencia a una red eléctrica que está equipada con capacidad de regulación frente a fluctuaciones de frecuencia de la red. "Red eléctrica" o "red" es una red de suministro fuera del límite y punto de acoplamiento común de un parque eólico; cuando se hace referencia a la red dentro de un parque eólico se hace una expresión con indicación explícita al parque eólico, por ejemplo, "red de parque eólico". La capacidad de regulación frente a fluctuaciones de frecuencia de la red se proporciona, por ejemplo, por una determinada fracción (típicamente de aproximadamente un 10 %) de controladores primarios, que, típicamente son productores convencionales, que pueden usar turbinas accionadas por vapor o gas y fuentes de energía fósil, o energía hidroeléctrica. Los controladores primarios incrementan la salida de potencia cuando la frecuencia cae por debajo del valor nominal (por ejemplo, 50 o 60 Hz) y disminuyen la salida de potencia cuando sube por encima del valor nominal.

Como el presente texto trata de la potencia activa más que de la potencia reactiva, la potencia activa se denomina brevemente como "potencia" o "potencia de salida". Cuando se hace referencia a potencia reactiva, se denomina explícitamente como "potencia reactiva"

Existe un límite superior a la potencia de salida que se puede producir por la turbina eólica de acuerdo con los modos de realización, por ejemplo, debido a los límites estructurales y a un límite de corriente en el convertidor eléctrico de la turbina eólica. Esta cantidad de potencia se denomina "potencia nominal". La velocidad del viento suficiente para que la turbina eólica produzca la potencia nominal se denomina como "velocidad del viento nominal". Cuando la turbina eólica de acuerdo con los modos de realización funciona a velocidades del viento por encima de la velocidad del viento nominal, sólo la fracción de la energía eólica disponible se transforma en potencia eléctrica de salida, lo que corresponde con la potencia nominal. Esta reducción de la producción de potencia se logra, por ejemplo, cambiando gradualmente el ángulo de paso del rotor hacia la denominada posición indicadora. En otras palabras, la turbina eólica, de forma intencionada, no se hace funcionar a un rendimiento óptimo. En algunos modos de realización, la turbina eólica también se hace funcionar a una relación de velocidad periférica subóptima para reducir las cargas estructurales.

Por el contrario, durante el funcionamiento a carga parcial, es decir a una velocidad del viento por debajo de la velocidad del viento nominal, la turbina eólica de acuerdo con los modos de realización se hace funcionar a un rendimiento óptimo. Por ejemplo, se hace funcionar con la relación de velocidad periférica y el ángulo de paso de la pala aerodinámicamente óptimos. En general, la velocidad del viento fluctúa de manera impredecible sobre una base a corto plazo (al nivel de minutos hasta unos pocos segundos). Cuando se hace funcionar a carga parcial y con rendimiento óptimo, la turbina eólica de acuerdo con los modos de realización transforma estas fluctuaciones de velocidad del viento de manera casi individualizada en las correspondientes fluctuaciones provocadas por el viento de la cantidad de potencia real producida y suministrada a la red eléctrica. Las fluctuaciones en el sentido del viento también pueden contribuir a las fluctuaciones provocadas por el viento de la cantidad de potencia real producida resultante y suministrada a la red eléctrica debido a que el mecanismo de ajuste de guiñada de la turbina eólica, en

general, no puede alinear de inmediato el eje del rotor de la turbina eólica en el sentido del viento. Un rotor alineado erróneamente tiene un rendimiento reducido de modo que las fluctuaciones en el sentido del viento son una fuente adicional de fluctuaciones provocadas por el viento de la cantidad de potencia real producida y suministrada a la red eléctrica.

- 5 Como se menciona al comienzo, la consecuencia de la producción de potencia fluctuante por las turbinas eólicas sobre la estabilidad de la red depende de las características de la red. En una gran red estable, una fluctuación de potencia por una turbina eólica o un parque eólico no producirá ninguna respuesta significativa en forma de una fluctuación de frecuencia. Sin embargo, en una red pequeña aislada, o en redes débiles, una fluctuación de potencia de este tipo puede producir una fluctuación de frecuencia significativa. Una determinada capacidad de la red para compensar desequilibrios de producción y compensación de potencia y para regular variaciones de frecuencia resultantes, es decir un determinado grado de dureza o debilidad de la red, se denomina como "estabilidad de la red".

10 El inventor ha reconocido que la estabilidad de la red puede variar con el tiempo, por ejemplo, debido a fallos relacionados con la red, tales como el aislamiento de la parte de la red en la que se sitúa la turbina eólica, debido a fallos de los productores primarios, etc. El inventor también ha reconocido que se puede detectar un deterioro de la estabilidad de la red monitorizando, por ejemplo, las fluctuaciones de frecuencia en la red. Además, el inventor ha reconocido que es deseable en el caso de un deterioro de las condiciones de estabilidad de la red limitar las fluctuaciones de la potencia de salida producidas por la turbina eólica y suministradas a la red o (si la turbina eólica ya ha funcionado con fluctuaciones de potencia de salida limitadas antes de producirse el deterioro) reducir el límite de fluctuaciones ya existente. "Reducir" el límite de fluctuaciones quiere decir hacer el límite más estricto. Por esta medida, aunque la turbina eólica de acuerdo con los modos de realización no funciona como un controlador primario, contribuye a la estabilidad de la red reduciendo las fluctuaciones inducidas por fuentes. Sin embargo, limitando las fluctuaciones de la potencia de salida, en general se reducirá la salida de potencia acumulada y de este modo disminuirá el rendimiento efectivo de la turbina eólica. Sin embargo, restringiendo esta medida a situaciones en las que la estabilidad de la red se deteriora (temporalmente), se limitará la pérdida de energía eléctrica producida.

25 En los modos de realización, se logra limitar las fluctuaciones de potencia activa, por ejemplo, por medio del ajuste del paso de la pala. En algunos modos de realización, las fluctuaciones de potencia activa también se limitan eléctricamente, por el correspondiente control del convertidor de potencia eléctrica de la turbina eólica. Sin embargo, esto último da como resultado el desequilibrio entre la cantidad de energía eólica convertida en potencia mecánica del rotor de la turbina eólica y la potencia eléctrica de salida que, por ejemplo, da como resultado la aceleración del rotor. Por lo tanto, en algunos modos de realización, limitar eléctricamente la potencia sólo se realiza en combinación con un ajuste del paso de la pala para hacer frente a transitorios de la velocidad del viento. Por ejemplo, cuando la velocidad del viento aumenta más rápido que el paso se puede ajustar para compensar el aumento de la velocidad del viento, en primer lugar, se limita eléctricamente la potencia de salida y, una vez que las palas se han cabeceado a su nuevo ángulo de paso, entonces se limita por el ajuste del paso.

30 La presente descripción se centra en limitar, o limitar adicionalmente, las fluctuaciones de potencia de salida. Sin embargo, el procedimiento también va en la otra dirección, que es relajar o cancelar el límite, de una manera análoga. Es decir, tras la detección del incremento en la estabilidad de la red, el funcionamiento de la turbina eólica se cambia cancelando o relajando un límite de fluctuaciones fijado previamente.

35 La función de monitorización y de ajuste del límite es una función de autodiagnóstico y autoajuste realizada por un sistema de control al nivel de turbinas eólicas individuales, o al nivel de un parque eólico, o al nivel mayor de la red de suministro. El sistema de control también puede estar distribuido, por ejemplo, incluyendo controladores al nivel del parque eólico y de la turbina eólica.

40 En algunos modos de realización, se determina permanentemente el intervalo de frecuencias cubierto por las fluctuaciones de frecuencia de la red, y se considera que una variación de la frecuencia de la red fuera de un intervalo de frecuencia permitido  $F_{max}/F_{min}$  (entre una frecuencia máxima permitida  $F_{max}$  y una frecuencia mínima permitida  $F_{min}$ ) es una detección de una reducción en la condición de estabilidad de la red. De forma alternativa o adicional, se determina permanentemente la varianza de la frecuencia de la red, y se considera que un aumento más allá del valor umbral de varianza es una detección de una reducción en la condición de estabilidad de la red. A continuación, se reduce la fluctuación permitida de la salida de potencia de la turbina eólica o del parque eólico.

45 En algunos modos de realización, la monitorización de si las fluctuaciones de frecuencia de la red están dentro del intervalo de frecuencias permitido, o de si su varianza está por debajo del valor umbral de varianza, se realiza de manera absoluta, es decir, sin tener en cuenta ninguna correlación de la frecuencia de la red y la potencia de salida producida por la turbina eólica o parque eólico.

50 Sin embargo, la monitorización con menor correlación de las fluctuaciones de frecuencia de la red es, de algún modo, inespecífica en el sentido de que no se garantiza que la fluctuación de la turbina eólica o parque eólico considerado contribuya en realidad a las fluctuaciones de frecuencia de la red observadas. Por lo tanto, en estos modos de realización, la reducción del límite de fluctuaciones puede ser inútil, y sólo produciría costes (por la reducción de la salida de potencia acumulada provocada por la misma). Por lo tanto, en otros modos de realización, la monitorización de la estabilidad de la red comprende determinar una correlación entre la potencia suministrada a la red eléctrica y la

frecuencia de la red. Correlación quiere decir que si se incrementa la salida de potencia, la frecuencia de la red también se incrementa. La frecuencia de la red se mide, por ejemplo, en los terminales de la turbina eólica o en el punto de acoplamiento a la red del parque eólico. Sin embargo, si no se observa ningún incremento en la frecuencia de la red tras el incremento en la potencia de salida no existe correlación. En realidad, "correlación" puede ser un parámetro continuo que mide el grado de coincidencia entre el incremento en la potencia de salida y el aumento en la frecuencia de la red. En algunos de los modos de realización, cuanto mayor es la correlación así determinada, menor es la estabilidad de la red detectada. Para que se considere como un indicador de una reducción en la estabilidad de la red, un aumento en la correlación tiene que ser significativo en algunos modos de realización, por ejemplo, el aumento tiene que exceder un valor umbral de correlación aceptable máximo. A continuación, se reduce la fluctuación permitida de la potencia de salida de la turbina eólica. Relacionando la reducción del límite de fluctuaciones con la correlación observada entre fluctuaciones de potencia de salida y fluctuaciones de frecuencia de la red se garantiza que la reducción del límite de fluctuaciones de potencia de salida contribuye en realidad a la reducción de las fluctuaciones de frecuencia de la red.

En algunos modos de realización, se usa la información de la correlación para determinar si la variación de la frecuencia de la red se extiende más allá del intervalo de frecuencia permitido  $F_{max}/F_{min}$ , o si la varianza de la frecuencia excede el límite de varianza, teniendo en cuenta sólo los picos (o depresiones) en la frecuencia de la red que se puede atribuir a un pico (o depresión) correspondiente de la potencia de salida de la turbina eólica o parque eólico considerado. Esto tiene en cuenta la correlación sobre una base de pico a pico.

En otros modos de realización, se usa la información de la correlación para el mismo propósito de forma más global, (no pico a pico) multiplicando la amplitud de fluctuación no correlacionada por la magnitud de la correlación, que puede ser un número entre 0 y 1 (o multiplicando la varianza no correlacionada de la frecuencia por el cuadrado de la fluctuación). "Diluir" la varianza o la amplitud de fluctuación no correlacionada observada de esta manera tiene en cuenta que sólo una fracción de la varianza o la amplitud de fluctuación no correlacionada observada se debe a las fluctuaciones de potencia de salida de la turbina eólica o parque eólico considerado.

Un prerrequisito de una medida de correlación de este tipo es que existe una variación de la potencia de salida de la turbina eólica. En algunos modos de realización, también denominados como "modos de realización de variación pasiva", se hace uso de las variaciones de potencia de salida provocadas por las variaciones de la velocidad del viento naturales. Estas variaciones de potencia pasiva se rastrean y se correlacionan con la frecuencia de la red medida.

En otros modos de realización, también denominados como "modos de realización de variación activa", se realizan activamente una o más variaciones de prueba de la potencia suministrada a la red. El límite sobre la potencia de salida no es eficaz para la variación realizada activamente; es decir la variación realizada activamente puede ser mayor que el límite sobre la potencia de salida. Se mide la respuesta de la frecuencia de la red. Se determina la correlación entre la potencia de prueba y la frecuencia de la red, como con los modos de realización de variación pasiva. En consecuencia, cuanto mayor es la respuesta de la frecuencia de la red, menor es la estabilidad de la red detectada. La variación activa se adapta a situaciones en las que las variaciones de potencia de salida provocadas por las variaciones de velocidad del viento naturales son insuficientes (en frecuencia y/o amplitud) para determinar la correlación. Por ejemplo, es un estado de funcionamiento en el que se ha fijado un límite de potencia de salida estricto, el límite evitará que aparezca cualquier fluctuación de potencia natural suficiente. A continuación, se realiza la variación activa relajando o cancelando el límite de fluctuaciones y esperando una fluctuación natural que dé lugar a un pico de potencia de salida alto. En algunos modos de realización, se proporcionan ambas funciones de variación pasiva y activa. Por ejemplo, en el modo de funcionamiento normal (en el que no se ha fijado un límite de variación o se ha fijado un límite de variación amplio) se realiza una variación pasiva, mientras que en el modo de fluctuación reducido (por ejemplo, en el que se ha fijado un límite de variación estricto) se realiza la variación activa.

En algunos de los modos de realización, la correlación se determina de acuerdo con una función de correlación

$$R_{xy} = \frac{1}{T_F} \int_{-T_F/2}^{T_F/2} x(t) \cdot y(t) dt$$

(es decir, una función de autocorrelación), en la que  $x(t)$  es la potencia de salida suministradas en función del tiempo  $t$ ,  $y(t)$  es la frecuencia de la red en función del tiempo  $t$ ,  $T_F$  es un periodo de tiempo para el que se determina la correlación. En una implementación digital (discretizada), la integral se puede reemplazar por una suma sobre periodos de tiempo discretos. En modos de realización de variación activa, se puede elegir la variación de potencia para que sea tan breve en el tiempo que sólo exista un término de suma, es decir, no se requiere ninguna suma.

En ciertos casos, se retrasa la reacción de la frecuencia de la red a una variación de potencia de salida. En consecuencia, en algunos de los modos de realización, la correlación se determina de acuerdo con una función de correlación cruzada que evalúa las funciones que se van a correlacionar a diferentes tiempos:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T_F} \int_{-T_F/2}^{T_F/2} x(t) \cdot y(t + \tau) dt$$

donde  $\tau$  es el desplazamiento de tiempo entre  $x(t)$  y  $y(t)$ . En algunos modos de realización, se asume que el retraso en la respuesta es fijo y se conoce con antelación, la variable  $\tau$  se puede fijar para el retraso. En otros modos de realización  $\tau$  es una variable, entonces se evalúa la integral (o suma) para una pluralidad de valores diferentes de  $\tau$ , el máximo de  $R_{xy}(\tau)$  se determina finalmente y se considera que es la correlación entre la potencia de salida y la frecuencia de la red.

5 En algunos modos de realización, el límite en las fluctuaciones de potencia se elige de modo que las fluctuaciones de frecuencia de la red provocadas por el suministro de potencia se mantengan dentro del intervalo  $F_{max}/F_{min}$ , o la varianza de fluctuaciones de frecuencia de la red provocadas por el suministro de potencia se mantenga por debajo del límite de varianza.

10 En algunos de estos modos de realización, toda la fluctuación de frecuencia de la red (incluyendo la contribución no provocada por la turbina eólica o parque eólico considerado) se va a mantener dentro del intervalo  $F_{max}/F_{min}$ , o por debajo del valor umbral de varianza, mientras que en otros modos de realización sólo la fracción de las fluctuaciones de frecuencia de la red que está provocada por el suministro de potencia de la turbina eólica o parque eólico considerado se mantiene dentro del intervalo  $F_{max}/F_{min}$ , o por debajo del valor umbral de varianza.

15 En algunos de los modos de realización en los que la fluctuación de frecuencia de la red (total o fraccionada) se va a mantener dentro del intervalo  $F_{max}/F_{min}$ , o por debajo del valor umbral de varianza, el límite de fluctuaciones para la potencia de salida se ajusta continuamente en la medida del límite justo necesario para mantener la frecuencia de la red dentro del intervalo  $F_{max}/F_{min}$ , o la varianza por debajo del valor umbral de varianza. Esto quiere decir que la producción de potencia por la turbina eólica o parque eólico se maximiza dejando que la potencia de salida fluctúe, pero la fluctuación está limitada, o modulada, si la frecuencia de la red va más allá de  $F_{max}/F_{min}$ . Por tanto, el objetivo del ajuste continuo es evitar que la frecuencia de la red salga del intervalo  $F_{max}/F_{min}$  sin perder más producción de potencia que la necesaria.

20 En algunos modos de realización, el funcionamiento de la turbina eólica se cambia automáticamente entre dos modos de funcionamiento discretos, es decir, de un modo de funcionamiento normal (es decir, un modo sin límite de fluctuaciones de potencia, o con un límite de fluctuaciones de potencia relativamente relajado) a un modo de fluctuaciones reducidas (en el que el límite de fluctuaciones de potencia está activado). En algunos de estos modos de realización, se activa el modo automático que cambia del modo de funcionamiento normal al modo de fluctuaciones reducidas por la detección de una reducción de la estabilidad de la red más allá del valor umbral de cambio de modo inferior. El cambio del modo de fluctuación reducida de nuevo al modo de funcionamiento normal se puede activar asimismo por la detección de un incremento en la estabilidad de la red más allá de un valor umbral de cambio de modo superior.

25 En algunos modos de realización de cambio de modo, se mantiene el modo de fluctuación reducida un intervalo de tiempo mínimo antes de que el modo pueda volver a cambiar al modo de funcionamiento normal. Por esta medida, se puede evitar un cambio de modo demasiado frecuente. Además, puede haber un acuerdo contractual con el proveedor de red de acuerdo con el que el productor de energía eólica se compromete a suministrar potencia de salida con una fluctuación de potencia de salida fuertemente limitada durante un intervalo de tiempo predeterminado, por ejemplo 15 min. Al productor de energía eólica se le puede compensar por la pérdida de producción sufrida debido a este periodo (de ejemplo) de 15 min de suministro de potencia de salida uniforme.

30 En algunos de los modos de realización de cambio de modo, el límite de fluctuaciones de potencia se mantiene constante durante el modo de fluctuación reducida. La constancia del límite de fluctuaciones de potencia se refiere a la anchura del límite relativa a la potencia de salida media; no quiere decir necesariamente que los valores absolutos de los límites de potencia superior e inferior se mantengan constantes. En algunos modos de realización, el límite es relativo a un valor medio de la potencia producida. Por ejemplo, si la potencia media producida se incrementa con el tiempo, los valores absolutos de los límites de fluctuación de potencia superior e inferior también se incrementarán.

35 En otros modos de realización de cambio de modo, el límite de fluctuaciones también se ajusta para evitar que la frecuencia de la red salga fuera del intervalo  $F_{max}/F_{min}$ , sin perder más producción de potencia de la necesaria, como se describió anteriormente. Este ajuste puede ser por etapas (una configuración ajustada al principio del cambio de modo y después mantenida constante durante un periodo de tiempo determinado) o continuo. Por tanto, el ajuste de potencia de salida para mantener la frecuencia de la red dentro del intervalo  $F_{max}/F_{min}$ , o por debajo del valor umbral de varianza, en la medida del límite justo necesario para mantener la frecuencia de la red dentro del intervalo  $F_{max}/F_{min}$ , o la varianza por debajo del valor umbral de varianza se aplica tanto a los modos de realización de ajuste continuo como a los modos de realización de cambio de modo.

40 Ya se ha mencionado que la fluctuación de potencia limitante puede dar como resultado una pérdida de potencia acumulada. Se podía evitar una pérdida de potencia acumulada si no sólo los picos de la potencia de salida ("fluctuaciones positivas") se cortan, sino que también las depresiones de la potencia de salida ("fluctuaciones negativas") se elevan, o se rellenan, de manera simétrica. Sin embargo, en algunos modos de realización, la turbina eólica es un punto de trabajo óptimo durante el funcionamiento de modo normal, lo que no permite ningún incremento en la potencia de salida. Por lo tanto, la limitación de las fluctuaciones de salida se realiza más bien de manera asimétrica, cortando la potencia de salida durante las fluctuaciones positivas (cortando los picos de salida altos), sin (o

significativamente sin) elevar la potencia de salida relativa durante las fluctuaciones negativas. Como se explica anteriormente, el corte de la potencia de salida durante las fluctuaciones positivas se logra, por ejemplo, por un ajuste correspondiente del ángulo de paso de la pala hacia la posición indicadora.

5 Sin embargo, en otros modos de realización se proporciona una capacidad para elevar la potencia de salida relativa. Esto se puede lograr haciendo funcionar una turbina eólica normalmente fuera de su punto de trabajo óptimo, y contrarrestando las fluctuaciones de energía eólica negativas cambiando el punto de trabajo hacia el punto de trabajo óptimo. Aunque esta medida vuelve la limitación de la fluctuación de salida más simétrica también reduce la producción de potencia acumulada, debido al funcionamiento de la turbina eólica fuera del punto de trabajo óptimo.

10 La rigurosidad del límite en las fluctuaciones de potencia de salida, y/o la posición del valor umbral que se ha de exceder por la inestabilidad de la red de modo que se realice el cambio de modo, también puede depender de otros factores además de la estabilidad de la red monitorizada.

15 Por ejemplo, en algunos de los modos de realización, se usa una previsión de viento para variar el límite de fluctuaciones, por ejemplo, para hacerlo más estricto cuando la previsión predice un incremento en la fluctuación de energía eólica. Además, en los modos de realización de cambio de modo, el valor umbral de cambio de modo se puede variar en respuesta a la previsión de viento. Por ejemplo, el valor umbral se puede variar tras una previsión de incremento en la fluctuación de energía eólica de modo que el cambio del modo de funcionamiento normal al modo de fluctuación reducida se activa ya para una reducción menos pronunciada de la estabilidad de la red.

20 De forma similar, en otros modos de realización, se usa una expectativa de consumo de potencia en la red eléctrica para variar el límite de fluctuaciones, o para variar el valor umbral de cambio de modo. Por ejemplo, una expectativa de consumo de potencia que da lugar a una expectativa de incremento en la fluctuación de frecuencia de la red puede volver el límite de fluctuaciones más estricto, o modificar el valor umbral de cambio de modo de modo que el cambio del modo de funcionamiento normal al modo de fluctuación reducida se activa ya para una reducción menos pronunciada de la estabilidad de la red.

25 Algunos modos de realización conciernen a un sistema de control dispuesto para controlar al menos una turbina eólica (que puede incluir alguna de, o todas, las turbinas eólicas de todo un parque eólico) de la manera descrita anteriormente. El sistema de control puede ser un controlador de turbina eólica individual, un controlador de parque eólico o un controlador a un nivel mayor en la red y conectado al controlador de la turbina eólica para enviar órdenes de fluctuaciones límite. El sistema de control puede estar distribuido, por ejemplo, incluyendo controladores al nivel del parque eólico y de la turbina eólica o al nivel de la red de suministro.

30 El sistema de control comprende un ordenador o una pluralidad de ordenadores distribuidos, por ejemplo, en forma de uno o más microcontroladores, denominados como "el ordenador". El procedimiento llevado a cabo por el sistema de control se proporciona preferentemente como un programa informático almacenado en una o más memorias asociadas al ordenador. El programa se puede ejecutar por del ordenador. La expresión "... estando dispuesto para llevar a cabo el procedimiento ..." en la reivindicación del sistema de control, que se define por las etapas del procedimiento, quiere decir por tanto que el ordenador se programa de modo que hace que las etapas del procedimiento reivindicadas se lleven a cabo cuando se ejecuta el programa informático. El sistema de control, la turbina eólica y el parque eólico definidos de esta manera se distinguen al menos por esta programación especial (es decir, almacenamiento de este programa informático especial) de los sistemas de control, turbinas eólicas y parques eólicos con el mismo soporte físico que, sin embargo, no están dispuestos (por ejemplo, no están programados) para llevar a cabo dicho procedimiento.

35 Una turbina eólica de velocidad variable, que se usa al menos en uno de los modos de realización descritos anteriormente y que puede estar conectada a una red eléctrica se equipa con el sistema de control descrito anteriormente. Comprende un rotor con un buje y al menos una pala montada en el rotor como se analiza anteriormente. Se conecta el rotor, por ejemplo, por medio de un árbol principal, a un generador para convertir el par del rotor en potencia eléctrica. En algunos modos de realización, se conecta una caja de engranajes entre el rotor y el generador con el fin de convertir la velocidad rotacional del rotor en una velocidad mayor para el generador.

40 Volviendo ahora a la fig. 1, una turbina eólica de velocidad variable 1 ejemplar es una de una pluralidad de turbinas eólicas de un parque eólico 2. Tiene un rotor 3 con un buje en el que, por ejemplo, se montan tres palas 4. El ángulo de paso de las palas del rotor 4 es variable por medio de accionadores de paso. Se soporta el rotor 3 por una góndola 5 y acciona un generador 12 por medio de un árbol principal 8, una caja de engranajes 10 y un árbol de alta velocidad 11. Esta estructura es ejemplar; otros modos de realización usan, por ejemplo, un generador de accionamiento directo.

45 El generador 12 (por ejemplo, un generador síncrono o asíncrono) produce potencia eléctrica de salida de una frecuencia relativa a la velocidad de rotación del rotor 3, que se convierte a la frecuencia de la red (por ejemplo, aproximadamente 50 o 60 Hz) por un convertidor 19. El voltaje de la potencia eléctrica producido de este modo se transforma por un transformador 9. La salida del transformador 9 son los terminales 9a de la turbina eólica. La potencia eléctrica de la turbina eólica 1 y de las otras turbinas eólicas del parque eólico 2 se alimenta en la red del parque eólico 18 (simbolizado por "a" en la fig. 1). La red del parque eólico 18 está conectada en un punto de acoplamiento común 21 y otro transformador elevador 22 adicional a una red de suministro eléctrico externa del parque eólico 20. La red 20

está equipada con capacidad de regulación frente a fluctuaciones de frecuencia de la red, por ejemplo, en forma de productores convencionales que pueden incrementar o disminuir la producción en una escala de tiempo corto para controlar la frecuencia.

5 Un sistema de control incluye un controlador de turbina eólica 13 y un controlador de parque eólico 23. El controlador de parque eólico 13 controla el funcionamiento de la turbina eólica individual 1, por ejemplo, selecciona el modo de funcionamiento de carga total o de carga parcial, dependiendo, en ausencia, de la velocidad del viento actual, provoca, en el modo de carga parcial, el funcionamiento de la turbina eólica en el punto de trabajo óptimo ajustando el ángulo de la pala y controlando la proporción de velocidad de la punta con respecto al ideal aerodinámico para la velocidad del viento actual, y controla el convertidor 19 para producir electricidad de acuerdo con las prescripciones del controlador del parque eólico, por ejemplo, una instrucción para proporcionar una determinada cantidad de potencia reactiva además de la potencia activa, etc. El controlador de parque eólico 13 usa diferentes señales de entrada para realizar sus tareas de control, por ejemplo señales que representan las condiciones de viento actuales (por ejemplo, de un anemómetro 14 y una veleta 15), señales de retroalimentación que representan el ángulo de paso, la posición del rotor, amplitudes y fases del voltaje y corriente en el generador 12 y los terminales 9a, etc., y señales de órdenes del controlador de parque eólico 23.

15 El controlador de parque eólico 23 recibe las señales representativas del voltaje, corriente y frecuencia en el punto de acoplamiento común 21 (parámetros que se puede considerar que representan el voltaje, la corriente la frecuencia en la red de suministro 20) y, opcionalmente, recibe señales de información o de órdenes del proveedor de la red de suministro (en "c" en la fig. 1). En base a algunos de estos (y, opcionalmente, otros) parámetros de entrada, el controlador de parque eólico 23 monitoriza la estabilidad de la red y, tras la detección de una reducción en la estabilidad de la red, ordena a los controladores de turbina eólica 13 de la turbina eólica 1 y de las otras turbinas eólicas del parque eólico 2 (en "b" en la fig. 1) que cambien el funcionamiento limitando las fluctuaciones de la potencia de salida suministrada. Tras la recepción de una orden, el controlador de turbina eólica 13, tras el incremento de la velocidad del viento, corta el pico de salida alto que se produciría entonces en el funcionamiento de carga parcial normal con rendimiento máximo, por ejemplo, ajustando el paso de la pala hacia la posición indicadora, para cumplir con la orden el fluctuación límite del controlador de parque eólico. Por tanto, en el modo de realización ejemplar de la fig. 1, la tarea de control del sistema de control para limitar las fluctuaciones de salida se comparte por el controlador de parque eólico 23 y el controlador de turbina eólica 13. En otros modos de realización, esta tarea de control se realiza por el controlador de turbina eólica 13 solo; en esos modos de realización, el "sistema de control" está representado sólo por el controlador de turbina 13, sin un controlador de parque eólico.

20 La variación ejemplar de potencia y frecuencia en función del tiempo se ilustra en la fig. 2. La mitad superior de la fig. 2 muestra (i) la potencia de salida teóricamente obtenible, o "disponible"  $P_{\text{disponible}}$  (que es la energía eólica multiplicada por el rendimiento de conversión mecanoeléctrica), y ii) la potencia de salida real  $P_{\text{salida}}$  de la turbina eólica 1, por ejemplo, medida en los terminales 9a. La  $P_{\text{salida}}$  es casi siempre inferior a la  $P_{\text{disponible}}$ . En el ejemplo mostrado, se asume que la turbina eólica 1 tiene una potencia nominal de 3 MW; ya que la potencia disponible  $P_{\text{disponible}}$  permanece por debajo de 3 MW en el intervalo de tiempo ejemplar mostrado, la fig. 2 ilustra un caso en el que la turbina eólica 1 funciona en el modo de carga parcial. En otros modos de realización, la potencia de salida real  $P_{\text{salida}}$  se refiere al parque eólico 2, no a la turbina individual 1, y se mide en el punto de acoplamiento común 21.

35 Se puede observar de la fig. 2 que la potencia disponible  $P_{\text{disponible}}$  fluctúa de aproximadamente un 30 % a un 100 % del máximo de la potencia disponible  $P_{\text{disponible}}$ , que es de aproximadamente 2,5 MW. La escala de tiempo de fluctuación (es decir, una longitud de coherencia temporal) es aproximadamente de 5 a 100 segundos. En la fig. 2, la turbina eólica 1 se hace funcionar en el modo de funcionamiento normal entre los puntos temporales "200 s" y "600 s". En el modo de funcionamiento normal, la fluctuación de potencia no está en absoluto limitada en el ejemplo mostrado; por lo tanto, la potencia de salida real  $P_{\text{salida}}$ , casi traza la potencia disponible  $P_{\text{disponible}}$ , y por tanto presenta una fluctuación similar a la de la  $P_{\text{disponible}}$ .

40 La mitad inferior de la fig. 2 ilustra las variaciones de frecuencia en función del tiempo. Durante la primera parte del intervalo de tiempo del funcionamiento normal, de aproximadamente "200 s" a aproximadamente "500 s" la variación en la frecuencia es relativamente pequeña. Esto se debe a la capacidad de regulación habitual frente a las fluctuaciones de frecuencia de la red durante esa parte. Debido a la capacidad de regulación habitual, las fluctuaciones de la potencia inyectada en la red 20 se compensan en gran parte por los controladores primarios y/o la dureza de una gran red 20 (si la cantidad total de potencia inyectada y consumida en la red 20 es muy grande en comparación con la potencia inyectada por la turbina eólica 1 o el parque eólico 2, su contribución relativa a la potencia total es insignificante). La pequeñez relativa de la fluctuación de frecuencia quiere decir que la correlación entre la potencia de salida de la turbina eólica 1 y la frecuencia de la red es pequeña (próxima a cero). El controlador de turbina eólica 13, o el controlador de parque eólico 23, monitoriza la capacidad de regulación frente a fluctuaciones de frecuencia de la red, por ejemplo, evaluando dicha correlación y sometiéndola a prueba frente a un valor umbral. Durante esta primera parte del intervalo de tiempo de funcionamiento normal, por lo tanto, no se aplica ningún límite a la fluctuación de la potencia de salida real  $P_{\text{salida}}$ .

50 Sin embargo, a alrededor de "500 s" la cantidad de fluctuación de frecuencia se incrementa y se vuelve fuertemente correlacionada con la fluctuación de la potencia de salida real  $P_{\text{salida}}$ . El controlador de turbina eólica 13, o el controlador de parque eólico 23, que monitorizan la capacidad de regulación evaluando la correlación detecta ahora



que se reduce la estabilidad de la red, por ejemplo, determinando que la correlación excede dicho valor umbral. Es se puede deber al aislamiento, o a un fallo de los controladores primarios, por ejemplo.

En respuesta a esa detección, después de un cierto retraso de tiempo, el controlador de turbina eólica 13, o el controlador de parque eólico 23, cambia el modo de funcionamiento de un modo normal a un modo de fluctuación reducida. En la fig. 2 ejemplar, el modo de fluctuación reducida comienza a "600 s". El controlador de turbina eólica 13 corta ahora los picos de salida altos que se producirían en un funcionamiento a carga parcial normal, ajustando el ángulo de paso de la pala hacia la posición indicadora. Más específicamente, el controlador de parque eólico 23 envía una orden para limitar la fluctuación de potencia de salida a un valor determinado denominado como "Límite  $\Delta P$ ". La magnitud de Límite  $\Delta P$  se elige de modo que la fluctuación de frecuencia de la red se mantenga dentro de un intervalo  $F_{\max}/F_{\min}$  de variación de frecuencia de la red permitida. La magnitud corresponde al límite justo necesario para mantener la frecuencia de la red dentro del intervalo  $F_{\max}/F_{\min}$ . Por tanto, la producción de potencia por la turbina eólica 1 o parque eólico 2 se maximiza sin dejar que la frecuencia de la red fluctúe fuera de  $F_{\max}/F_{\min}$ . El controlador de turbina eólica 13 cumple con la orden de limitación aplicando un límite superior a la potencia de salida  $P_{\text{salida}}$ . Este límite superior se elige de modo que la potencia de salida  $P_{\text{salida}}$  permanezca dentro de una potencia de referencia  $\pm 0,5 \cdot$  Límite  $\Delta P$ . La potencia de referencia no está fija, pero se determina que es un promedio continuo de la potencia de salida  $P_{\text{salida}}$ , donde la constante de tiempo promediada es mayor que la escala de fluctuación-tiempo. Como resultado, como se ilustra en la fig. 2, la potencia de salida  $P_{\text{salida}}$  permanece dentro de una banda de ancho de Límite  $\Delta P$  que sigue, hasta un cierto grado, una variación a largo plazo de  $P_{\text{disponible}}$ .

Después de que haya transcurrido un cierto periodo de tiempo de funcionamiento en el modo de fluctuación reducida (por ejemplo, casi 600 segundos en el ejemplo de la fig. 5), el controlador de parque eólico 23 provoca que el controlador de turbina eólica realice una variación de prueba 24 de la potencia de salida  $P_{\text{salida}}$ , por ejemplo, en forma de un pico de prueba de salida alto, aproximadamente a 1200 s en la fig. 2. El pico de prueba de salida alto se genera, por ejemplo, sin cortar un pico alto en la potencia disponible  $P_{\text{disponible}}$ . Sin embargo, con el fin de ser independiente de si el viento natural proporciona una fluctuación positiva con una amplitud suficiente para usarse como pico de prueba 24, en otros modos de realización el pico de prueba de salida alto 24 se genera usando la energía cinética almacenada en el rotor en rotación 3. Esto puede decelerar el rotor a una velocidad de rotor subóptima, baja.

Se evalúa la respuesta de frecuencia 24' para el pico de prueba de salida alto 24. La detección de una correlación pequeña, por debajo de un valor umbral, por el controlador de parque eólico 23, como se ilustra en la mitad inferior de la fig. 2 a 1200 s, se toma como indicación de que la estabilidad de la red ha recuperado entretanto, después de esto el controlador de parque eólico 23 cambia el modo de funcionamiento del modo de fluctuación reducida de nuevo al modo normal. En la fig. 2 ejemplar, el funcionamiento de modo normal se reanuda poco después de 1200 s. El controlador de turbina eólica 13 cancela ahora el límite de fluctuaciones Límite  $\Delta P$ , por ejemplo, ajustando el ángulo de paso de la pala en la posición correspondiente al rendimiento óptimo. Debido a la recuperación de la estabilidad de la red, las fluctuaciones de frecuencia son ahora relativamente pequeñas, y casi no se correlacionan con las fluctuaciones de potencia de salida, de nuevo.

La fig. 3 es un diagrama de circuito funcional de un modo de realización del controlador de parque eólico 23 dispuesto para realizar el procedimiento explicado en relación con la fig. 2. El controlador de parque eólico 23 implementa una función de observador de la red 25 que monitoriza la frecuencia de la red y la potencia de salida, por ejemplo, en el punto de acoplamiento común 21 del parque eólico 2. La salida de la función de observador de la red 25 se proporciona en un controlador de fluctuaciones 26 que está dispuesto para determinar la correlación entre la potencia de salida y las fluctuaciones de frecuencia de la red, y para determinar la cantidad de reducción de potencia, es decir, el Límite  $\Delta P$ . Como se explica, se determina el Límite  $\Delta P$  para permitir la cantidad de fluctuación aceptable.

El Límite  $\Delta P$  se introduce en un calculador de punto de ajuste de parque eólico 27 que está dispuesto para transformarlo en un punto de ajuste de salida de potencia del parque eólico 2. Para determinar el punto de ajuste de salida de potencia, el calculador de punto de ajuste de parque eólico 27 también puede considerar una señal de punto externa, por ejemplo, desde el proveedor de la red. En base al punto de ajuste, un controlador de potencia de salida 28 produce una señal de control para la potencia que es de salida por el parque eólico 2, usando una señal de retroalimentación que representa la potencia real producida por el parque eólico 2. La señal de control se alimenta a un distribuidor 29 que está dispuesto para dividir la regulación entre las turbinas eólicas individuales (aquí denominadas WT1, WT2, ... WTn) del parque eólico 2, y calcula puntos de ajuste individuales. Los puntos de ajuste individuales pueden diferir para las turbinas eólicas WT1, WT2, WTn, por ejemplo, debido a diferentes condiciones de viento para las turbinas eólicas WT1, WT2, WTn. El distribuidor basa la actividad de división en retroalimentaciones sobre los estados de funcionamiento de las turbinas eólicas WT1, WT2, WTn.

Los puntos de ajuste individuales se transmiten a los controladores de las turbinas eólicas individuales, de los que uno es el controlador de turbina eólica 13 de la fig. 1.

El controlador de parque eólico 23 está dispuesto de este modo para calcular y enviar los puntos de ajuste para las turbinas eólicas con el fin de obtener una reducción de la potencia total para contribuir a la estabilidad de frecuencia de la red. La reducción es tal que maximiza el rendimiento del parque eólico. También se denomina como "equilibrio de potencia del sistema". El controlador de parque eólico 23 ajusta el punto de ajuste del parque eólico y los puntos de

ajuste de las turbinas eólicas continuamente para equilibrar la producción de potencia y las fluctuaciones de frecuencia.

Las funciones adicionales o alternativas de los modos de realización se ilustran por el diagrama de flujo de la fig. 4.

5 En algunos modos de realización, la actividad de monitorización de la estabilidad de la red se realiza analizando las fluctuaciones de frecuencia de la red sin correlacionarlas con la potencia de salida, como en 31 en la fig. 4. Por ejemplo, una medida cuantitativa adecuada de las fluctuaciones de frecuencia de la red es la varianza (suma de las desviaciones cuadráticas del valor medio). La varianza es una medida ponderada combinada tanto de la amplitud como de la frecuencia de las fluctuaciones. A medida que el tiempo avanza, en algunos modos de realización, se calcula una varianza continua de la frecuencia de la red frente al tiempo.

10 en 32, se determina si la estabilidad de la red se cambia (en particular: se reduce) con relación a la determinación de la estabilidad de la red previa. Por ejemplo, en el modo de realización basado en la evaluación de la frecuencia de la red de menor correlación, se determina si la varianza determinada en 31 se ha incrementado.

Las siguientes actividades también se pueden usar en relación con los modos de realización basados en un análisis de correlación y/o señal de prueba, pero sólo se ilustran en relación con el análisis de menor correlación en la fig. 4.

15 Si la respuesta en 32 es positiva, se evalúan otros parámetros que pueden influenciar la rigurosidad del límite de fluctuaciones que se aplica. Una influencia es la previsión de viento. Típicamente, la amplitud absoluta de los incrementos en las fluctuaciones de energía eólica crece con la velocidad del viento, y también depende del sentido del viento. Por lo tanto, en algunos modos de realización, una estimación de la fluctuación de frecuencia total esperada de las turbinas eólicas conectadas a la red en general (no la particular considerada) se deriva, por ejemplo, por el controlador de parque eólico, de la previsión de la velocidad y del sentido del viento. El controlador de parque eólico puede recibir una señal que represente la previsión de viento sobre una línea de comunicación desde el proveedor de la red. Además, la fracción de energía eólica (en general fluctuante) suministrada a la red depende de la velocidad del viento en general. En ausencia de viento, no se producirán fluctuaciones en la red debido a la energía eólica. En 33, el límite de fluctuaciones Límite  $\Delta P$  se ajusta para las fluctuaciones esperadas debido a la previsión de viento (cuando el límite es más estricto mayor es la fluctuación esperada).

20

25

Otra influencia sobre la rigurosidad del límite de fluctuaciones es el consumo de potencia total esperado en la red de suministro. Por lo tanto, en algunos modos de realización, se deriva una expectativa del consumo de potencia total, por ejemplo, por el controlador de parque eólico, que a su vez puede recibir una señal que representa el consumo de potencia total esperado sobre una línea de comunicación del proveedor de la red. Típicamente, mientras que la amplitud de fluctuación de potencia absoluta en la red se espera que crezca con el consumo de potencia total, la amplitud relativa se espera que caiga con el consumo de potencia total. Puesto que la fluctuación de frecuencia está más ligada a la fluctuación de frecuencia relativa que a la absoluta, la fluctuación de frecuencia se espera que disminuya con el incremento del consumo total. Además, con el incremento en el consumo total la fracción de energía eólica suministrada a la red disminuirá, de este modo disminuirá la fluctuación de la red. Por lo tanto, en algunos modos de realización, una estimación de la fluctuación de frecuencia total esperada se deriva de una predicción del consumo de potencia total. En 34, el límite de fluctuaciones Límite  $\Delta P$  se ajusta para las fluctuaciones esperadas debido a la predicción del consumo de potencia total (cuando el límite es más estricto mayor es la fluctuación esperada).

30

35

En 35, el límite de fluctuaciones Límite  $\Delta P$  se ajusta de acuerdo con la propia determinación del controlador de parque eólico de la estabilidad de la red, por ejemplo, en base al análisis de la varianza de la frecuencia de la red en 31, o en base al análisis de la correlación o respuesta de señal de prueba, en ausencia, descrito en relación con la fig. 2.

40

En 36, los ajustes 33, 34, y 35 se combinan en un Límite  $\Delta P$  combinado.

En 37, la turbina eólica 1 se hace funcionar con la potencia de salida dentro del límite de fluctuaciones ajustado combinado Límite  $\Delta P$ . En los modos de realización de cambio de modo, esto se realiza junto con el cambio al modo de limitación reducida en el que el Límite  $\Delta P$  se puede mantener constante al menos durante un período de tiempo predeterminado. En otros modos de realización, no se realiza ningún cambio de modo, pero el Límite  $\Delta P$  se ajusta continuamente.

45

Aunque en el presente documento se han descrito determinados procedimientos y productos construidos de acuerdo con las enseñanzas de la invención, el alcance de cobertura de esta patente no se limita a los mismos. Por el contrario, esta patente cubre todos los modos de realización de las enseñanzas de la invención que entran realmente dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas de forma literal o bien bajo la doctrina de equivalentes.

50

**REIVINDICACIONES**

1. Un procedimiento de funcionamiento a carga parcial de una turbina eólica (1) que suministra potencia a una red eléctrica (20), estando equipada la red eléctrica (20) con capacidad de regulación frente a fluctuaciones de frecuencia de la red, que comprende:
  - 5 - monitorizar la estabilidad de la red eléctrica (20); y
    - tras la detección de una reducción en la estabilidad de la red, cambiar el funcionamiento de la turbina eólica limitando, Límite  $\Delta P$ , las fluctuaciones del suministro de potencia a la red eléctrica (20) provocadas por el viento, o reduciendo un límite ya existente, Límite  $\Delta P$ , para las fluctuaciones del suministro de potencia.
- 10 2. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que la monitorización de la estabilidad de la red comprende determinar al menos uno de un intervalo de fluctuaciones de frecuencia de la red y una varianza de fluctuaciones de frecuencia de la red.
3. El procedimiento de la reivindicación 1 o 2, en el que la monitorización de la estabilidad de la red comprende determinar una correlación entre la potencia suministrada a la red eléctrica (20) y la frecuencia de la red, en el que cuanto mayor sea la correlación menor será la estabilidad de la red detectada.
- 15 4. El procedimiento de la reivindicación 3, en el presente documento la determinación de la correlación comprende realizar una variación de prueba (24) de la potencia suministrada a la red eléctrica (20) y medir una respuesta de la frecuencia de la red (24').
- 20 5. El procedimiento de la reivindicación 3 o 4, en el que la correlación se determina de acuerdo con una función de correlación  $R_{xy} = \frac{1}{T_F} \int_{-T_F/2}^{T_F/2} x(t) \cdot y(t) dt$ , en la que x(t) es la potencia,  $P_{eléctrica}$ , suministrada a la red eléctrica (20) en función del tiempo t, y(t) es la frecuencia de la red en función del tiempo t,  $T_F$  es un periodo de tiempo para el que se determina la correlación.
- 25 6. El procedimiento de una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5, en el que las fluctuaciones de frecuencia de la red provocadas por el suministro de potencia se mantienen dentro de un intervalo,  $F_{max}/F_{min}$ , de un mínimo a un máximo de frecuencia permitida, o una varianza de fluctuaciones de frecuencia de la red provocadas por el suministro de potencia se mantiene por debajo de un límite de varianza, eligiendo el límite en las fluctuaciones de potencia, Límite  $\Delta P$ , de forma correspondiente.
- 30 7. El procedimiento de una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 6, en el que el límite de fluctuaciones (Límite  $\Delta P$ ) se ajusta continuamente para mantener la frecuencia de la red dentro de un intervalo,  $F_{max}/F_{min}$ , de un mínimo a un máximo de frecuencia permitida, o una varianza de fluctuaciones de frecuencia de la red por debajo de un límite de varianza.
- 35 8. El procedimiento de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que el funcionamiento de la turbina eólica (1) se cambia de un modo de funcionamiento normal a un modo de fluctuación reducida en el que el límite de fluctuaciones (Límite  $\Delta P$ ) se activa o se reduce, en respuesta a la detección de una reducción en la estabilidad de la red más allá de un valor umbral de cambio de modo.
9. El procedimiento de una cualquiera de las reivindicaciones 3-5 o 6-8, cuando dependen de la reivindicación 3, en el que cuanto mayor sea la correlación entre la potencia suministrada a la red eléctrica y la frecuencia de la red más se limitan las fluctuaciones del suministro de potencia, Límite  $\Delta P$ .
- 40 10. El procedimiento de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que las fluctuaciones positivas del suministro de potencia por la turbina eólica (1) se limitan, Límite  $\Delta P$ , cortando los picos de salida altos.
- 45 11. El procedimiento de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en el que la turbina eólica (1) tiene un punto de trabajo óptimo, y en el que el funcionamiento de la turbina eólica con un límite de fluctuaciones, Límite  $\Delta P$ , o una reducción en el límite de fluctuaciones, comprende hacer funcionar la turbina eólica en un punto de trabajo no óptimo, y en el que las fluctuaciones negativas del suministro de potencia por la turbina eólica (1) se contrarrestan cambiando el punto de trabajo hacia el punto de trabajo óptimo.
- 50 12. El procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, usando una previsión de viento para reducir el límite de fluctuaciones, Límite  $\Delta P$ , o para elevar un valor umbral de la estabilidad de la red de cambio de modo que define el cambio de un modo de funcionamiento normal a un modo de fluctuación reducida, en respuesta a la previsión de viento que predice un incremento en las fluctuaciones de energía eólica.
13. El procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, que comprende además usar una expectativa de consumo de potencia en la red eléctrica para reducir el límite de fluctuaciones, Límite  $\Delta P$ , o para elevar un valor umbral de la estabilidad de la red de cambio de modo que define el cambio de un modo de funcionamiento normal a un modo de fluctuación reducida, en respuesta a la expectativa de consumo de potencia que da lugar a la expectativa de incremento en la fluctuación de frecuencia de la red.

14. Un sistema de control (13, 23) para controlar al menos una turbina eólica (1) que suministra potencia a una red eléctrica (20), estando dispuesto el sistema de control (13, 23) para llevar a cabo el procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13.
15. Un parque eólico (2) o turbina eólica (1) equipado con el sistema de control (13, 23) de la reivindicación 14.

Fig. 1

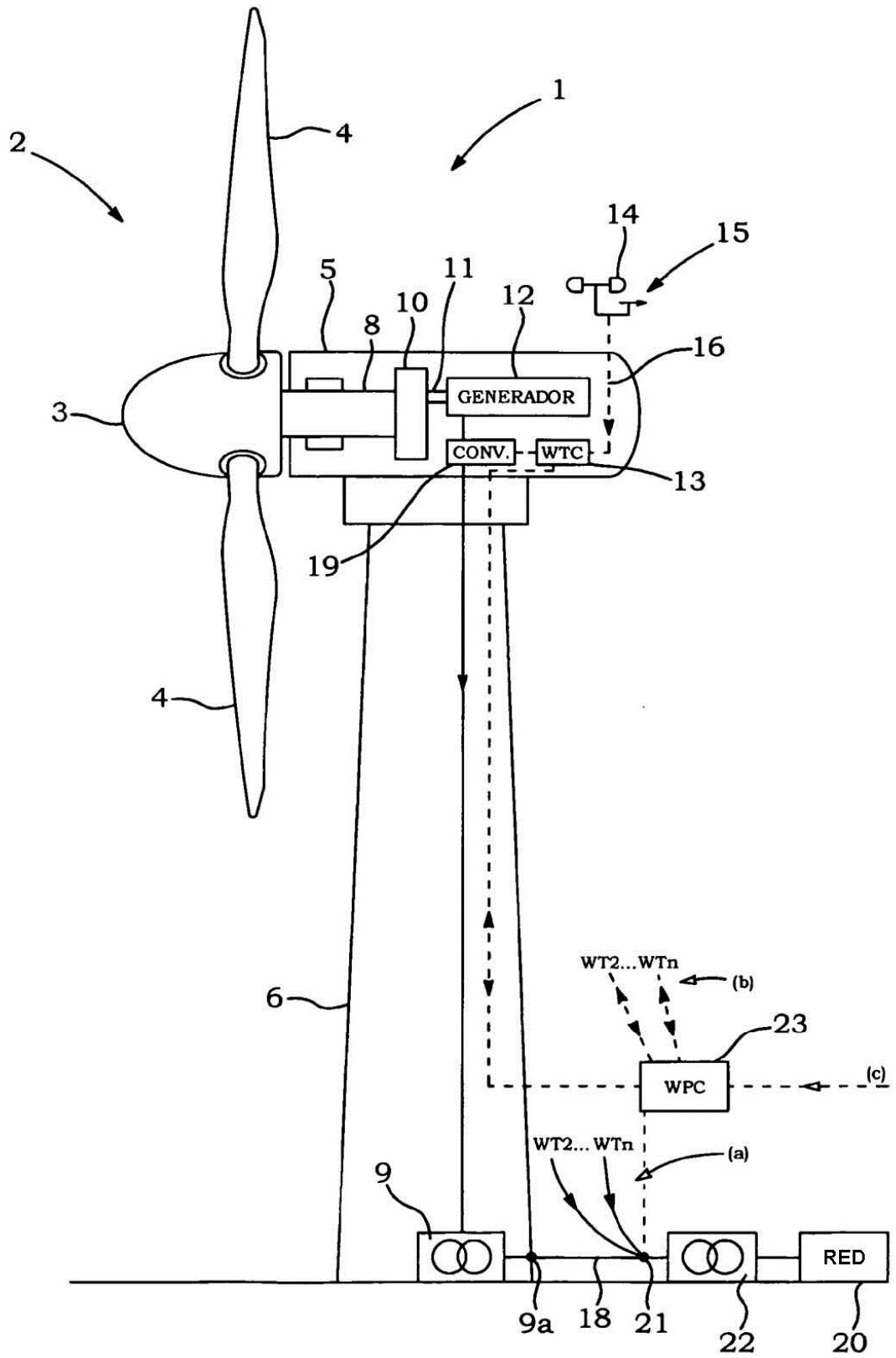
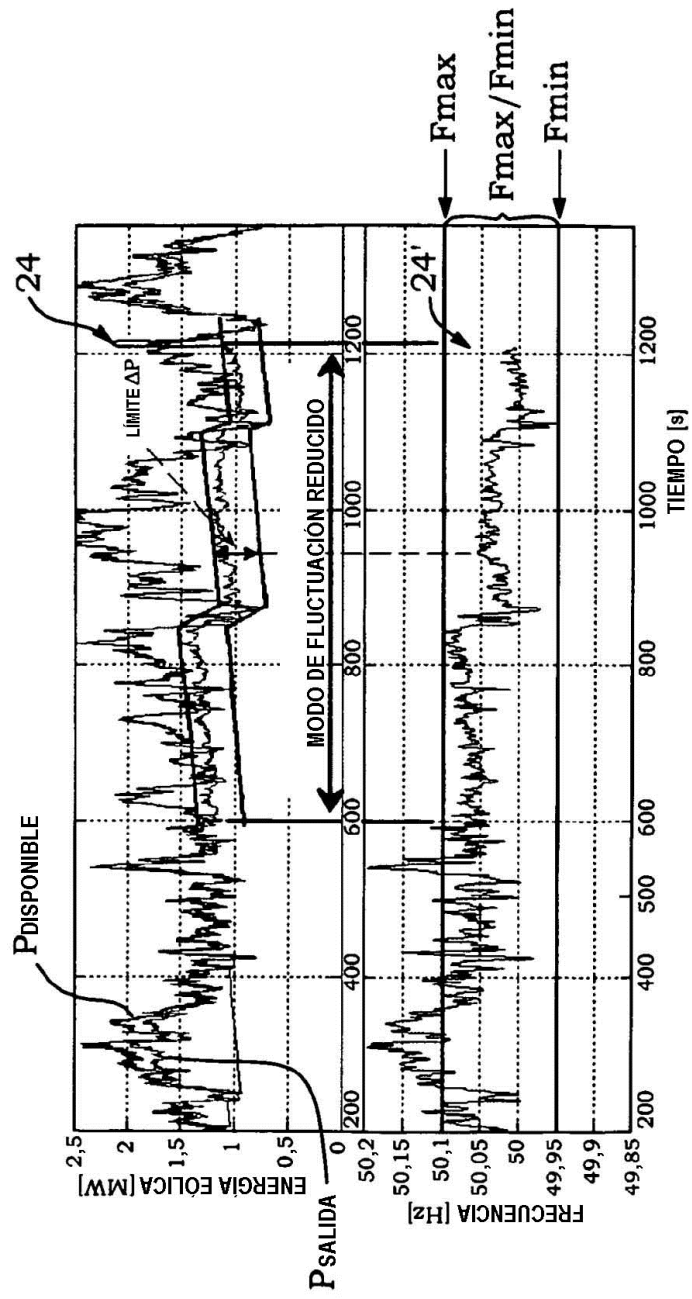


Fig. 2



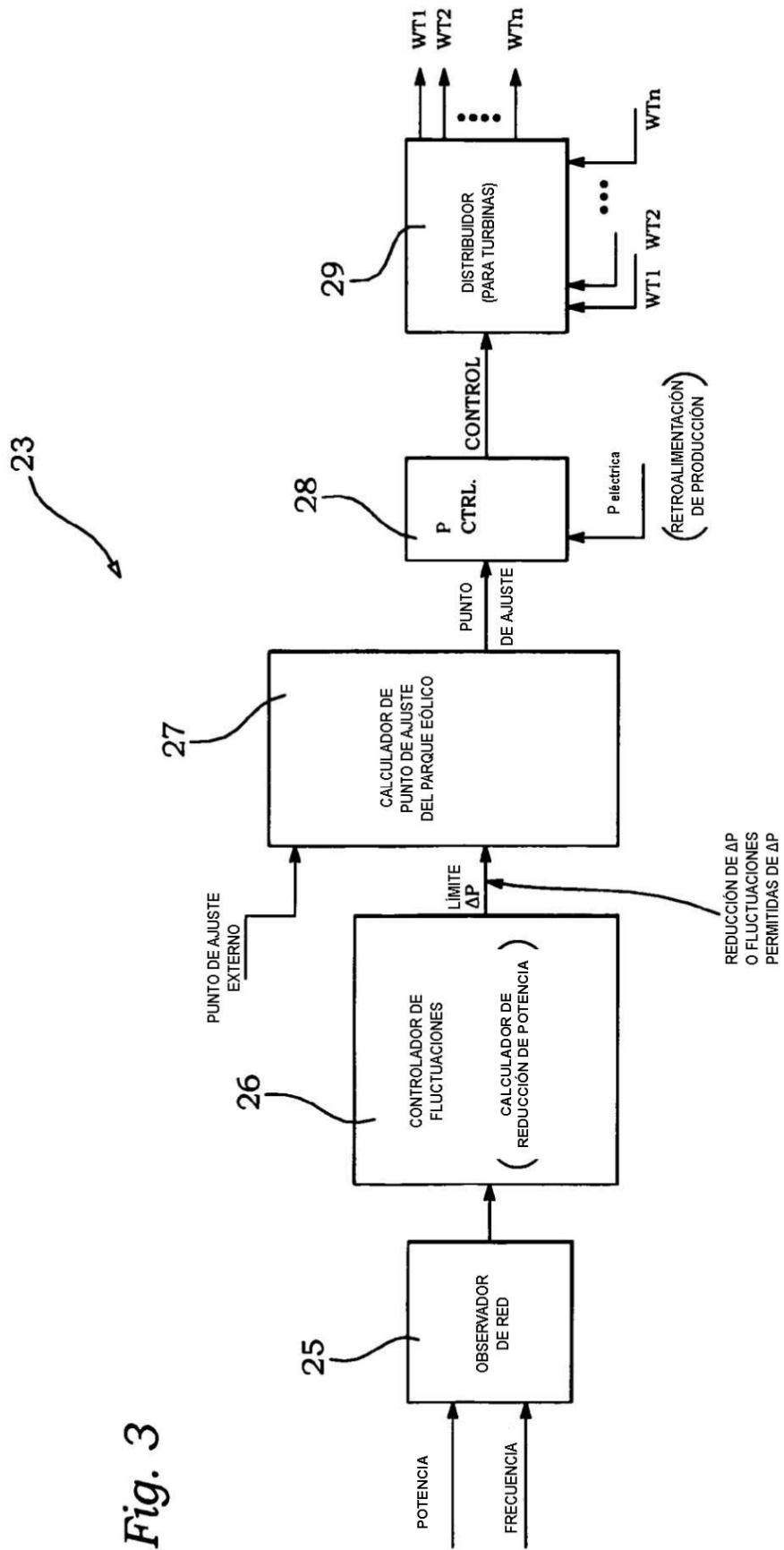


Fig. 3

Fig. 4

