

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 800 675**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/02**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.10.2015 PCT/DK2015/050321**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.04.2016 WO16058617**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.10.2015 E 15784561 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.06.2020 EP 3207247**

54 Título: **Control de turbinas eólicas**

30 Prioridad:

**17.10.2014 DK 201470643**

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

**04.01.2021**

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)  
Hedeager 42  
8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**SPRUCE, CHRIS y  
HALES, KELVIN**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 2 800 675 T3**

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

**DESCRIPCIÓN**

## Control de turbinas eólicas

5 Esta invención se refiere al control de turbinas eólicas y centrales de energía eólica y, en particular, a métodos y aparatos que tienen en cuenta la temperatura de cables de recogida de energía al tomar decisiones de control.

10 La potencia nominal de una turbina eólica se define en la norma IEC 61400 como la salida de potencia eléctrica continua máxima que una turbina eólica está diseñada para lograr en condiciones de funcionamiento y externas normales. Las grandes turbinas eólicas comerciales están diseñadas en general para una vida útil de 20 años y su salida de potencia nominal tiene en cuenta esa vida útil.

15 Las turbinas eólicas se hacen funcionar comúnmente como parte de una central de energía eólica que comprende una pluralidad de turbinas eólicas. El documento US-A-6.724.097 da a conocer el funcionamiento de una central eólica de este tipo. Se determina la salida de cada turbina y se controlan una o más turbinas, de modo que se reduce la potencia de salida de una o más turbinas si la salida total supera la salida nominal de la central. Una disposición de este tipo es útil cuando la suma de las potencias nominales individuales puede superar la salida nominal de la central de energía eólica, pero en cualquier momento no todas las turbinas pueden estar funcionando a plena capacidad; algunas pueden estar apagadas por mantenimiento y algunas pueden estar experimentando condiciones de viento inferiores a las ideales.

20 Aunque el enfoque adoptado en el documento US-A-6.724.097 trata de evitar la sobreproducción por una central de energía eólica, la salida total de la central puede no alcanzar la potencia de central nominal si algunas turbinas están apagadas, por ejemplo, por mantenimiento, o no están funcionando a su potencia nominal, por ejemplo, debido a que las condiciones eólicas locales en esas turbinas no permiten alcanzar una salida de potencia nominal. Por lo tanto, es económicamente deseable impulsar la salida de una o más de las turbinas para aumentar la salida total de la central de energía a su salida nominal.

25 El documento US 2013/270827 A1 describe que las turbinas eólicas de una central de energía eólica pueden sobrecargarse selectivamente midiendo la diferencia entre las salidas de central de energía nominal y real y derivando una señal de petición de sobrecarga basada en esa diferencia que se envía a cada turbina.

30 Normalmente, se utilizan uno o más cables de recogida de energía para transportar la energía generada a partir de una turbina eólica, o a partir de una pluralidad de turbinas eólicas, para exportar a la red. Los cables de energía están diseñados para funcionar dentro de un rango de temperatura definido por valores nominales de temperatura del cable publicados y superar este valor nominal de temperatura puede llevar a un fallo de cable debido a la degradación térmica del aislamiento que rodea el conductor de cable. Por ejemplo, las temperaturas permisibles máximas comunes en la superficie del conductor son 60, 75 y 90 °C. Se genera calor en función de la corriente eléctrica que pasa a través del núcleo de cable. Por tanto, la corriente portada por un cable de energía está normalmente limitada para evitar aumentar la temperatura del cable por encima de la temperatura de diseño.

35 Como resultado, las turbinas se controlan normalmente de manera que se impide el impulso de su salida donde hay un riesgo de que la corriente aumentada a partir de una sobreproducción pueda llevar a uno o más cables de recogida superando su temperatura de diseño.

40 La presente invención tiene como objetivo proporcionar mejores métodos y aparatos para controlar turbinas eólicas.

45 Según un primer aspecto de la invención, se proporciona un método para controlar una turbina eólica según la reivindicación 1, comprendiendo el método las etapas de generar y emitir una señal de control de sobrecarga a la turbina eólica, estableciendo la señal de control de sobrecarga una cantidad por la cual va a sobrecargarse la salida de potencia de la turbina eólica; medir valores de temperatura del cable para al menos un cable de recogida de energía conectado a la turbina eólica utilizando al menos un sensor de temperatura del cable, en el que se utiliza el al menos un cable de recogida para transportar la energía generada a partir de la turbina eólica para exportar a una red; determinar si los valores de temperatura del cable medidos superan un punto de ajuste de temperatura; y modificar la señal de control de sobrecarga para reducir la cantidad de sobrecarga si los valores de temperatura del cable medidos superan el punto de ajuste de temperatura.

50 Según un segundo aspecto de la invención, se proporciona un método según la reivindicación 2 para controlar una pluralidad de turbinas eólicas conectadas a un nodo común desde el cual se exporta energía generada por la pluralidad de turbinas por al menos un cable de recogida de energía, en el que el al menos un cable de recogida de energía se utiliza para transportar la energía generada desde la pluralidad de turbinas eólicas para exportar a una red, comprendiendo el método las etapas de generar y emitir una señal de control de sobrecarga a la pluralidad de turbinas eólicas, estableciendo la señal de control de sobrecarga una cantidad por la que se sobrecargará la salida de potencia de la pluralidad de turbinas eólicas; medir valores de temperatura del cable para el al menos un cable de recogida de energía utilizando al menos un sensor de temperatura del cable; determinar si los valores de temperatura del cable medidos superan un punto de ajuste de temperatura; y modificar la señal de control de sobrecarga de al menos una

de las turbinas eólicas para reducir la cantidad de sobrecarga si los valores de temperatura del cable medidos superan el punto de ajuste de temperatura.

5 Con métodos según la presente invención, la salida de potencia de una turbina eólica, o una pluralidad de turbinas eólicas, se modifica basándose en mediciones de temperatura del cable reales, en lugar de estimaciones de temperatura del cable que requieren márgenes de seguridad que van a tenerse en cuenta para posibles imprecisiones. Por ejemplo, pueden surgir imprecisiones en estimaciones de temperatura del cable a partir de incertidumbres sobre las propiedades térmicas de los cables y del entorno de instalación. Dado que no se requieren márgenes de seguridad con la presente invención, la salida de potencia puede aumentarse más de lo posible con estimaciones de temperatura del cable, al tiempo que se mantiene dentro de las limitaciones de valor nominal de temperatura del cable.

15 La etapa de modificar la señal de control de sobrecarga puede implicar reducir la cantidad de sobrecarga en cualquier cantidad adecuada con el fin de reducir la temperatura del cable. En determinadas realizaciones, la etapa de modificar la señal de control de sobrecarga comprende reducir la cantidad de sobrecarga a cero.

La etapa de modificar la señal de control de sobrecarga puede comprender reducir la cantidad de sobrecarga independientemente de la medida en que se supere el punto de ajuste de temperatura. Por ejemplo, la etapa de modificar la señal de control de sobrecarga puede comprender reducir la cantidad de sobrecarga según un régimen de control predeterminado. En determinadas realizaciones, la etapa de modificar la señal de control de sobrecarga comprende reducir progresivamente la cantidad de sobrecarga basándose en la medida en que se supera el punto de ajuste de temperatura.

25 Puede proporcionarse el al menos un sensor de temperatura del cable de manera independiente del al menos un cable de recogida de energía. Por ejemplo, el al menos un sensor de temperatura del cable puede ser un componente independiente que está fijado al exterior del al menos un cable de recogida de energía en una o más ubicaciones a lo largo de la longitud del cable. El al menos un sensor de temperatura del cable puede ser solidario con el al menos un cable de recogida de energía. En determinadas realizaciones, el al menos un sensor de temperatura del cable es un sensor de temperatura distribuido que se extiende a lo largo de una parte sustancial de la longitud del al menos un cable de recogida de energía.

30 Ahora se describirán realizaciones de la invención, solo a modo de ejemplo y con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

35 la figura 1 es una vista esquemática de un régimen de control de central de energía eólica conocido que utiliza un controlador de central de energía;

la figura 2 es una vista esquemática de una agrupación, o subconjunto, conocido de una central de energía eólica conocida;

40 la figura 3 es un gráfico de velocidad del viento frente a potencia que muestra una curva de potencia para una turbina eólica típica;

45 la figura 4 es una vista esquemática de un régimen de control de central de energía eólica conocido adicional que utiliza un controlador de central de energía;

la figura 5 es una vista similar a la figura 4 que muestra un perfeccionamiento del régimen de control;

50 la figura 6 es un gráfico que ilustra el control de corte de una cantidad de sobrecarga en respuesta a los cambios en temperatura del cable;

la figura 7 es un gráfico de temperatura del cable frente a la distancia a lo largo del cable;

la figura 8 es una vista esquemática de un régimen de control de central de energía eólica según la presente invención;

55 la figura 9 es un gráfico que ilustra el control proporcional de la cantidad de sobrecarga en respuesta a los cambios en temperatura del cable;

60 la figura 10 es un gráfico que ilustra un control no lineal de la cantidad de sobrecarga en respuesta a los cambios en temperatura del cable;

las figuras 11 y 12 son vistas transversales de cables para su uso con la presente invención.

65 La siguiente descripción aborda el control general de turbinas de una central de energía de turbina eólica, basándose en el control de salida de potencia de esas turbinas, y el ajuste de este control, en temperatura del cable. Describe regímenes de control que están ambos elaborados por un controlador de multiturbina y se envían como órdenes a turbinas individuales, y regímenes de control que se implementan por turbinas individuales y luego se comunican a un

controlador de multiturbina, como un controlador de central de energía.

La figura 1 muestra, esquemáticamente, una central de energía eólica convencional 10 que comprende una pluralidad de turbinas eólicas 20 cada una de las cuales se comunica con un controlador de central de energía PPC 30.

El PPC 30 puede comunicarse bidireccionalmente con cada turbina. Las turbinas emiten energía a un punto de conexión red 40 utilizando cables de recogida de energía 50, como se ilustra por la línea gruesa. Los cables de recogida 50 están normalmente enterrados, a lo largo de al menos una porción de su longitud, en una zanja que se ha excavado en el suelo y se ha vuelto a llenar, normalmente con tierra o arena.

En funcionamiento, y suponiendo que las condiciones de viento lo permitan, cada una de las turbinas eólicas emitirán la máxima energía activa hasta su punto de ajuste nominal. Esta es su potencia nominal según lo especificado por el fabricante. La energía que se emite al punto de conexión de red es simplemente la suma de las salidas de cada una de las turbinas.

Aunque las turbinas 20 se muestran esquemáticamente en la figura 1 dispuestas en serie, esta es solo una disposición de ejemplo. Por ejemplo, las turbinas 20 pueden disponerse en agrupaciones, o subconjuntos de turbinas, como se ilustra en la figura 2.

La figura 2 muestra, esquemáticamente, una agrupación de turbinas eólicas 15 que comprende una pluralidad de turbinas eólicas 20 que tiene cada una un cable de recogida de energía 50 que va a un nodo 25. La energía generada se transporta entonces por un cable de recogida de energía adicional 55 desde el nodo 25 hasta el punto de conexión de red (no mostrado), ya sea directamente o a través de un nodo adyacente. El cable de recogida 50 de cada turbina 20 debe tener una capacidad de corriente conducida, es decir, un valor nominal de corriente, que supere el nivel de corriente eléctrica generado por la turbina 20 mientras funciona a su salida de potencia nominal. Cuando el cable de recogida 55 que va desde el nodo 25 porta corriente desde cada una de las turbinas 20 en la agrupación 15, debe tener un valor nominal de corriente que sea correspondientemente mayor que la de los cables de recogida 50 que van desde cada turbina 20. Por ejemplo, cuando la agrupación 15 comprende cinco turbinas 20, cada una con una potencia nominal de 2MW, el cable de recogida 55 que va desde el nodo 25 tendrá normalmente un valor nominal de corriente de al menos 10MW para permitir que todas las turbinas funcionen simultáneamente a sus salidas de potencia nominal, sin restricciones de energía debido a una capacidad de corriente conducida de cable insuficiente.

La figura 3 ilustra una curva de potencia convencional  $P$  de una turbina eólica que representa la velocidad de viento en el eje  $x$  frente a la salida de potencia en el eje  $y$ . La curva  $P$  es la curva de potencia normal para la turbina eólica y define la salida de potencia por el generador de turbina eólica en función de la velocidad de viento. Como bien se conoce en la técnica, la turbina eólica comienza a generar energía en un corte en la velocidad de viento  $V_{\min}$ . La turbina funciona entonces en condiciones de carga parcial (también conocida como carga incompleta) hasta alcanzar la velocidad de viento nominal en el punto  $V_R$ . A la velocidad de viento nominal, en el punto  $V_R$ , se alcanza la potencia de generador nominal y la turbina está funcionando a plena carga. El corte en la velocidad de viento en una turbina eólica típica es de 3 m/s y la velocidad de viento nominal es de 12 m/s.

El punto  $V_{\max}$  es la velocidad de corte de viento que es la velocidad de viento más alta a la que la turbina eólica puede funcionar mientras entrega energía. A velocidades de viento iguales y superiores a la velocidad de corte del viento, la turbina eólica se apaga por razones de seguridad, en particular para reducir las cargas que actúan sobre la turbina eólica.

Como se ha descrito anteriormente, la potencia nominal de una turbina eólica se define en la norma IEC 61400 como la salida de potencia eléctrica continua máxima que una turbina eólica está diseñada para lograr en condiciones externas y de funcionamiento normales. Por tanto, una turbina eólica convencional está diseñada para funcionar a la potencia nominal de modo que no se superen las cargas de diseño de los componentes y no se supere la resistencia a la fatiga de los componentes.

Como se muestra en la figura 3, la turbina puede controlarse de manera que produce más energía que la potencia nominal, como se indica por el área sombreada  $A$ . Se entiende que el término "sobrecarga" significa producir más de la potencia activa nominal durante un funcionamiento a plena carga. Cuando la turbina se sobrecarga, la turbina funciona de manera más enérgica de lo normal y el generador tiene una salida de potencia que es superior a la potencia nominal para una velocidad de viento dada.

La sobrecarga se caracteriza por un comportamiento transitorio. Cuando una turbina se sobrecarga, puede ser durante unos pocos segundos o durante un período de tiempo prolongado si las condiciones del viento y la resistencia a la fatiga de los componentes son favorables a la sobrecarga.

El nivel de sobrecarga de energía puede ser hasta un 30 % superior a la salida de potencia nominal.

El PPC 30 se muestra esquemáticamente en la figura 1 para facilitar la ilustración. Se comunica con cada una de las turbinas y puede recibir datos de las turbinas, tales como datos referentes al ángulo de paso, la velocidad de rotor, la

salida de potencia, etc. y puede enviar órdenes a turbinas individuales, tales como puntos de ajuste para el ángulo de paso, la velocidad de rotor, la salida de potencia, etc. El PPC 30 también recibe órdenes de la red, por ejemplo, del operador de red para impulsar o reducir la salida de potencia activa o reactiva en respuesta a la demanda o a un fallo en la red. Aunque no se muestra en la figura esquemática, cada turbina eólica también tiene su propio controlador que es responsable del funcionamiento de la turbina y se comunica con el PPC 30.

El PPC 30 recibe datos de salida de potencia de cada una de las turbinas y, por tanto, es consciente de la salida de potencia activa y reactiva por cada turbina y por la central en su conjunto en el punto de conexión de red 40.

Si se requiere, el PPC 30 puede recibir un punto de ajuste de funcionamiento para la central de energía en su conjunto y dividirlo entre cada una de las turbinas de modo que la salida no supere el punto de ajuste asignado del operador. El punto de ajuste de central de energía activa puede estar en cualquier lugar desde 0 hasta la salida de potencia nominal para la central. La salida de "potencia nominal" para la central es la suma de la salida de potencia nominal de las turbinas individuales en la central. El punto de ajuste de central de energía puede incluso estar por encima de la salida de potencia nominal de la central, es decir, toda la central está sobrecargada. Además, esto se discute adicionalmente más adelante.

La figura 4 muestra una disposición en la que se proporciona una señal de sobrecarga a las turbinas 20. En este ejemplo, en lugar de recibir una entrada directamente desde el punto de conexión de red 40, el controlador de central de energía 30 recibe una señal que es una medida de la diferencia entre la salida de central de energía total y la salida de central de energía nominal. Esta diferencia se utiliza para proporcionar la base para la sobrecarga por turbinas individuales. La salida real del parque de energía se resta de la salida nominal del parque de energía en el sustractor 60. La diferencia, mostrada como señal de error  $e$  en la figura 4, se introduce a un integrador 70. La integración incluye saturación incorporada que evita el enrollado integral que es un problema conocido en controladores donde se produce un gran cambio en punto de ajuste y los términos integrales acumulan un error significativo durante el ascenso (enrollado), por tanto, sobrepasar y continuar aumentando este error acumulado se compensa mediante errores en el otro sentido (desenrollado).

La salida desde el integrador 70 se introduce a una ganancia  $G$  que escala la salida de integrador para proporcionar una cantidad de sobrecarga que luego se proporciona al PPC 30 y se envía por el PPC 30 a cada una de las turbinas 20. En teoría, solo una única turbina puede sobrecargarse, pero se prefiere sobrecargar una pluralidad de las turbinas, y lo más preferido es enviar la señal de sobrecarga a todas las turbinas. La señal de sobrecarga enviada a cada turbina no es un control fijo, sino una indicación de una cantidad máxima de sobrecarga que cada turbina puede realizar. Cada turbina tiene un controlador que determinará si la turbina puede responder a la señal de sobrecarga y, en caso afirmativo, en qué cantidad. Cuando los controladores de turbina determinen que las condiciones son favorables e implementen la señal de sobrecarga, la salida de la central de energía aumentará y, por tanto, disminuirá la señal de error producida por el sustractor 60. El integrador alcanzará el equilibrio cuando el error o bien llegue a cero o bien se sature el integrador. El controlador de turbina puede ubicarse en la turbina, en una agrupación de turbinas, o centralmente, como se describe a continuación.

Por tanto, en este ejemplo se genera una señal de sobrecarga que es indicativa de la cantidad de sobrecarga que puede realizarse por turbinas de la central de energía en su conjunto y es la misma para cada turbina. Cada turbina responde de manera individual a la señal de sobrecarga según su controlador. Si las condiciones son de manera que el control total da como resultado una sobrecarga que amenaza con superar la salida nominal de la central de energía, la diferencia se reducirá y los controladores individuales reducirán la cantidad de sobrecarga aplicada.

En el ejemplo anterior, la misma señal de punto de ajuste de sobrecarga se envía a cada turbina usando la salida de central de energía total para proporcionar una entrada de control. En la realización de la figura 5, a cada turbina se le da su propia cantidad de sobrecarga por un controlador de turbina central 110. Por tanto, en la figura 5, un controlador central 110 proporciona una entrada en el PPC 30. El controlador de central 110 recibe una entrada 120 desde cada turbina que indica la capacidad de sobrecarga de esa turbina. El controlador central 110 calcula entonces un valor de sobrecarga para cada turbina basándose en la capacidad de sobrecarga actual de esa turbina y comunica ese valor a cada turbina a través del PPC 30. Por supuesto, el PPC 30 tendrá en cuenta otros factores, como la necesidad de garantizar que la salida de potencia total no supere la salida nominal para la central de energía.

Por tanto, las figuras 4 y 5 ilustran las maneras en que la sobrecarga de cada turbina puede implementarse a través de un controlador de central de energía, o bien generando una orden común de sobrecarga para cada turbina o bien generando una orden individual de sobrecarga para cada turbina. En estos ejemplos, la salida de turbinas está sobrecargada cuando la salida total de la central de energía está por debajo de la salida nominal de la central. Esto podría ser por una variedad de motivos. Por ejemplo, si la salida nominal total de todas las turbinas es igual a la salida nominal de la central de energía, puede utilizarse la sobrecarga si algunas turbinas están apagadas por mantenimiento o no están funcionando a la potencia nominal, por ejemplo, porque las condiciones eólicas locales no lo permiten.

Alternativamente, la central de energía puede diseñarse para tener una salida de potencia nominal que sea más alta que la suma de salidas nominales de todas las turbinas. Esto es ventajoso ya que la sobrecarga entonces puede utilizarse incluso cuando todas las turbinas estén a la potencia nominal. Esto permite al operador de central aprovechar

5 fácilmente los cambios en el funcionamiento durante condiciones de mercado favorables utilizando la sobrecarga y así incrementar los ingresos generados por la central de energía. El operador puede optar por sobrecargar en cualquier momento cuando se requieran ingresos adicionales, aunque los datos del mercado o las tarifas no sean particularmente favorables en ese momento. Esto da al operador la capacidad de generar flujos de efectivo adicionales que pueden requerirse por una variedad de motivos comerciales.

Por tanto, la sobrecarga puede utilizarse para impulsar la salida de turbinas individuales en respuesta a un déficit detectado en la salida de la central de energía o en respuesta a condiciones económicas externas.

10 Sin embargo, la sobrecarga conlleva riesgos inherentes, en particular para la integridad de turbinas y componentes de centrales de energía, como los cables de recogida de energía, y es importante controlar la medida en que se utiliza la sobrecarga. Una manera en la que esto puede lograrse es que cada turbina se controle dentro de los límites de las restricciones duras y/o blandas programadas en el controlador de turbina, o el PPC, tal como se comenta más adelante.

15 Una turbina tiene restricciones duras definidas como el par máximo y mínimo y la velocidad a la que puede funcionar. Estas restricciones se imponen por el controlador y se dictan por factores tales como límites de ruido, lubricación de caja de cambios, vida útil de componentes, etc. Estas restricciones se denominan restricciones duras, ya que el controlador no puede infringirlas, excepto en el caso extremo de realizar un apagado. Aunque estas restricciones son rígidas, pueden variar con el tiempo.

20 El controlador también impone restricciones suaves que están destinadas a evitar que la turbina se apague durante la sobrecarga, normalmente a medida que se aproximan los límites térmicos o la velocidad máxima de generador. Se producirá un aumento de temperatura en los componentes clave durante la sobrecarga, por ejemplo, en todo el tren de accionamiento, y podría provocar que se desencadenase un apagado. Las restricciones blandas pueden ser menos que las restricciones duras, pero dan como resultado que el controlador reduzca la cantidad de sobrecarga en lugar de realizar un apagado. Por tanto, el controlador de turbina puede incluir valores de restricción blanda para parámetros relacionados con el tren de accionamiento y la velocidad del generador. Cuando el controlador detecta que un valor medido se acerca a un valor de restricción blanda, la señal de sobrecarga se reduce.

25 El controlador incluye restricciones blandas para valores de temperatura del cable para evitar daños a los cables de recogida provocados por superar su valor nominal de temperatura durante la sobrecarga. La temperatura del cable depende de varias variables, que incluyen la corriente que fluye a través del cable conductor, la resistencia eléctrica del conductor, la temperatura ambiente y la capacidad del cable para disipar calor, la última de las cuales depende de la geometría del cable y su entorno. El controlador hace suposiciones sobre estas variables para calcular valores de temperatura a lo largo de la longitud del cable usando un modelo de temperatura del cable.

30 Para permitir incertidumbres en el cálculo, el controlador está normalmente programado para añadir un margen de seguridad a los valores de temperatura calculados para garantizar que la temperatura del cable no se subestima. El controlador limita entonces la sobrecarga donde la temperatura del cable calculada es igual o supera el valor nominal de temperatura del cable.

35 La figura 6 muestra un gráfico que ilustra el control de corte de la cantidad de sobrecarga en respuesta a la temperatura calculada del cable. El eje x del gráfico indica la temperatura máxima a lo largo de la longitud del cable, calculada por el controlador y el eje y indica la salida de punto de ajuste de referencia de potencia por el controlador de sobrecarga, sobre la base del cual se controla la salida del generador. Un valor de  $P_{ref}$  de 1,0 corresponde a la potencia nominal y un valor de  $P_{ref}$  mayor de 1,0 indica un punto de ajuste de sobrecarga para el cual el controlador requiere que el generador produzca más de su potencia nominal. En este ejemplo, el valor para  $P_{ref}$  es de 1,1, lo que indica que el controlador requiere que el generador produzca un 10 % más que la potencia nominal. La sobrecarga está permitida hasta una temperatura máxima indicada por  $T_{corte}$ . Una vez que se calcula que la temperatura del cable ha alcanzado  $T_{corte}$  en cualquier punto a lo largo de la longitud de cable, el controlador cancela el modo de funcionamiento de sobrecarga y la salida de potencia se ajusta a la potencia nominal.

40 Como la temperatura del cable depende de factores externos que no son constantes a lo largo de la longitud del cable, tales como la temperatura ambiente y el entorno del cable, pueden producirse aumentos locales en la temperatura del cable a lo largo de la longitud de cable. Por ejemplo, pueden producirse aumentos locales de temperatura cuando un cable está situado cerca de otros cables de energía, o cuando una sección del cable está enterrada y rodeada de material con baja conductividad térmica, lo que inhibe la disipación del calor. Estos aumentos locales en la temperatura del cable se denominan "puntos críticos" y dictan la corriente máxima que puede portarse de manera segura por el cable. Tales puntos críticos pueden producirse en cualquier punto entre cualquiera de las turbinas eólicas y el punto de conexión de red. Por ejemplo, pueden producirse puntos críticos en un cable de recogida que va directamente desde una turbina eólica individual, o en un cable de recogida que va desde un nodo y que transporta energía generada por un número de turbinas eólicas.

65 Debido a los márgenes de seguridad requeridos para permitir imprecisiones en la temperatura del cable calculada, por ejemplo, para considerar una situación en la que el cable está enterrado y el material utilizado para rellenar la zanja

difiere de lo supuesto por el modelo de cable, puede haber diferencias significativas en las temperaturas de cable calculadas y reales, como se ilustra en la figura 7.

La figura 7 ilustra una variación de ejemplo en temperatura del cable a lo largo de la longitud de un cable de recogida en el que la temperatura del cable se traza en el eje y y la distancia a lo largo del cable se traza en el eje x. La temperatura del cable calculada por el controlador, incluyendo el margen de seguridad, se muestra como línea A y la temperatura del cable real se ilustra con la línea B. Como puede observarse, se producen dos puntos críticos de temperatura principales a lo largo de la longitud del cable. El primero de ellos se produce en aproximadamente un tercio del camino a lo largo del cable y el segundo en aproximadamente dos tercios a lo largo de la longitud del cable. Es evidente que en puntos a lo largo de la longitud del cable hay una diferencia significativa entre la temperatura del cable calculada y la temperatura del cable real. En particular, la temperatura en los puntos críticos se calcula para superar la temperatura del cable máxima,  $T_{\text{corte}}$ , mientras que la temperatura real no supera la temperatura del cable máxima. Por tanto, en este ejemplo, la sobrecarga de la turbina o turbinas que proporcionan energía a ese cable se cancelará por el controlador y la falta de información precisa sobre la temperatura del cable ha dado lugar a una reducción innecesaria de la salida de potencia.

La figura 8 muestra, esquemáticamente, una disposición según una primera realización de la presente invención. En esta realización, que es similar a las disposiciones mostradas en las figuras 2 y 5, los cables de recogida comprenden uno o más sensores de temperatura del cable solidarios (no mostrados). Los sensores monitorizan la temperatura en la superficie de los conductores de los cables de recogida 50, 55 y proporcionan esta información al controlador 110. El controlador 110 utiliza entonces las lecturas de temperatura del cable para determinar el grado en que las turbinas pueden sobrecargarse. En particular, el controlador 110 está programado con uno o más puntos de ajuste de temperatura del cable, o umbrales, y reduce la cantidad de sobrecarga si la temperatura del cable medida supera el/los punto(s) de ajuste de temperatura programado(s).

Por ejemplo, si los sensores de temperatura indican que la temperatura en cualquier punto a lo largo de la longitud de un cable de recogida 50, 55 es igual a o supera la temperatura máxima permitida,  $T_{\text{corte}}$ , el controlador 110 puede cancelar el control de sobrecarga de una turbina eólica 20 alimentando energía a ese cable 50, 55 de la manera mostrada en la figura 6. En este ejemplo, si la temperatura medida supera o es igual al punto de ajuste de temperatura  $T_{\text{corte}}$  el controlador 110 envía una señal de control de sobrecarga con un punto de ajuste de referencia de potencia que tiene un valor de  $P_{\text{ref}}=1,0$ . Por tanto, el controlador 110 ajusta la señal de control de sobrecarga para evitar la sobrecarga y, en su lugar, da instrucciones a la turbina para emitir potencia a su potencia nominal. Esto restringe la corriente portada por los cables de recogida 50, 55 para evitar daños provocados por temperaturas de cable por encima de la temperatura nominal del cable.

Alternativamente, el controlador 110 puede ajustar la cantidad de sobrecarga de la manera ilustrada en la figura 9. En la figura 9, se define un punto de ajuste de temperatura límite inferior S1. Por debajo de la temperatura S1, el control de sobrecarga está totalmente activado y el punto de ajuste de referencia de potencia se encuentra en su valor máximo de 1,1. A temperaturas superiores a la temperatura S1, el controlador reduce el punto de ajuste de referencia de potencia linealmente de 1,1 a 1,0 a medida que aumenta la temperatura. En el límite de temperatura superior, S2, la cantidad de sobrecarga se establece en cero. En un ejemplo, el control se implementa por un solo punto de ajuste S1 y un control de bucle cerrado asociado reduce proporcionalmente la referencia de potencia sobre el rango predeterminado de temperaturas (S1 a S2). En este ejemplo, el controlador solo requiere almacenar un único punto de ajuste nuevo S1 y los parámetros para implementar el control de bucle cerrado. En otro ejemplo, ambos límites de temperatura S1 y S2 pueden almacenarse como puntos de ajuste.

El funcionamiento de controlador de sobrecarga ilustrado en la figura 9 proporciona un control más suave en las condiciones de funcionamiento marginales que el control de la figura 8. Además, un sistema de este tipo permite que el controlador se acerque al nivel máximo de potencia en el que la turbina puede generar a un nivel sostenible. En otras palabras, tal como se ilustra en la figura 9, el punto de ajuste S2 se encuentra en el margen de seguridad anterior de la figura 8, lo que significa que la sobrecarga puede tener lugar en un rango más amplio de temperaturas, pero a niveles reducidos respecto al caso anterior.

Un generador de turbina eólica que funciona durante la mitad del tiempo en  $P_{\text{ref}} = 1,1$  y la mitad del tiempo en  $P_{\text{ref}} = 1,0$ , controlado según el método control de sobrecarga de la figura 8, produciría una salida de potencia media del 105 % de potencia nominal. Por el contrario, un generador controlado según el método de control de sobrecarga de la figura 9 puede estabilizarse a un valor constante aproximadamente de  $P_{\text{ref}} = 1,07$ , produciendo una salida de potencia media del 107 % de potencia nominal. Esto es particularmente útil dado que la relación entre la potencia y el calentamiento del cable es no lineal. Es decir, la mayor parte del aumento de temperatura durante la sobrecarga se produce cerca de la potencia de sobrecarga máxima ( $P_{\text{ref}} = 1,1$ ).

En ejemplos alternativos, puede ser preferible utilizar una relación no lineal de control entre la temperatura del cable y el punto de ajuste de referencia de potencia, como ilustra el gráfico en la figura 10.

Cuando los sensores de temperatura indiquen que la temperatura de un cable de recogida de energía 55 que va desde un nodo 25 es igual a o supera la  $T_{\text{corte}}$  para ese cable, el controlador 110 puede ajustar la señal de control de

sobrecarga para una o más de las turbinas eólicas conectadas al nodo 25.

5 La señal de control de sobrecarga puede ajustarse de la manera descrita anteriormente en relación con cualquiera de las figuras 6, 9 o 10. Esto restringe la salida de potencia de la agrupación 15 de turbinas 20 en el nodo 25 para evitar que la temperatura del cable de recogida de energía 55 que va desde el nodo supere el valor nominal de temperatura del cable.

10 Además de restringir la salida de potencia donde se igualan o se superan determinados límites de temperatura, la sobrecarga puede reducirse mediante el controlador 110, donde es necesario limitar la cantidad de producción sobrecargada, por ejemplo, debido a condiciones de red externas. Por ejemplo, puede ser necesario limitar la cantidad de producción sobrecargada a 1,02 veces la potencia nominal en un momento en que las turbinas individuales son capaces de suministrar entre 1,0 y 1,1 veces la potencia nominal. El controlador 110 puede utilizar la información de temperatura de los diversos sensores temperatura del cable por toda la central de energía eólica para restringir selectivamente la producción de potencia de las partes más cargadas de la central de energía para prolongar la vida útil del cable, incluso cuando no se superen los límites de temperatura del cable. En cambio, el nivel de producción requerido puede lograrse distribuyendo la generación de energía a partes menos cargadas de la central de energía eólica.

15 En una realización alternativa (no mostrada), el controlador 110 se subdivide en varios controladores, cada uno dispuesto para controlar un grupo de turbinas eólicas que suministran el mismo cable. Aunque la disposición es ligeramente diferente, los principios de funcionamiento son los mismos que los descritos anteriormente. Como una alternativa adicional, el controlador 110 podría subdividirse además para formar parte del controlador individual de cada turbina.

20 Los sensores de temperatura del cable pueden ser de cualquier tipo adecuado. Preferiblemente, los sensores son sensores de temperatura distribuidos, tales como Linear Power Series, disponibles en AP Sensing GmbH de Böblingen, Alemania. Se trata de fibras de detección óptica pasiva que utilizan el efecto RAMAN para proporcionar temperatura distribuida continua monitorizada a lo largo de la longitud del cable. Los sensores 90 pueden estar incrustados en el aislamiento 91 del cable 50 y, por ejemplo, adyacentes al conductor de cable 92, como se muestra en la figura 11. Alternativamente, los sensores 90 pueden unirse e ir junto al aislamiento 91 del cable 50, como se muestra en la figura 12. Como una alternativa adicional, uno o más sensores (no mostrados) pueden estar unidos al cable 50 en ubicaciones específicas a lo largo de la longitud del cable. Sin embargo, esto es generalmente adecuado solo cuando ya se conoce la ubicación exacta de los puntos críticos.

25 Las realizaciones de la invención permiten modificar la cantidad de sobrecarga basándose en mediciones de temperatura del cable reales.

30 Dado que se conoce la temperatura del cable real, las realizaciones de la invención permiten hacer funcionar una turbina eólica dentro de las limitaciones de valor nominal de temperatura del cable sin necesidad de márgenes de seguridad adicionales relacionados con la temperatura del cable. En consecuencia, puede aumentarse la salida de potencia.

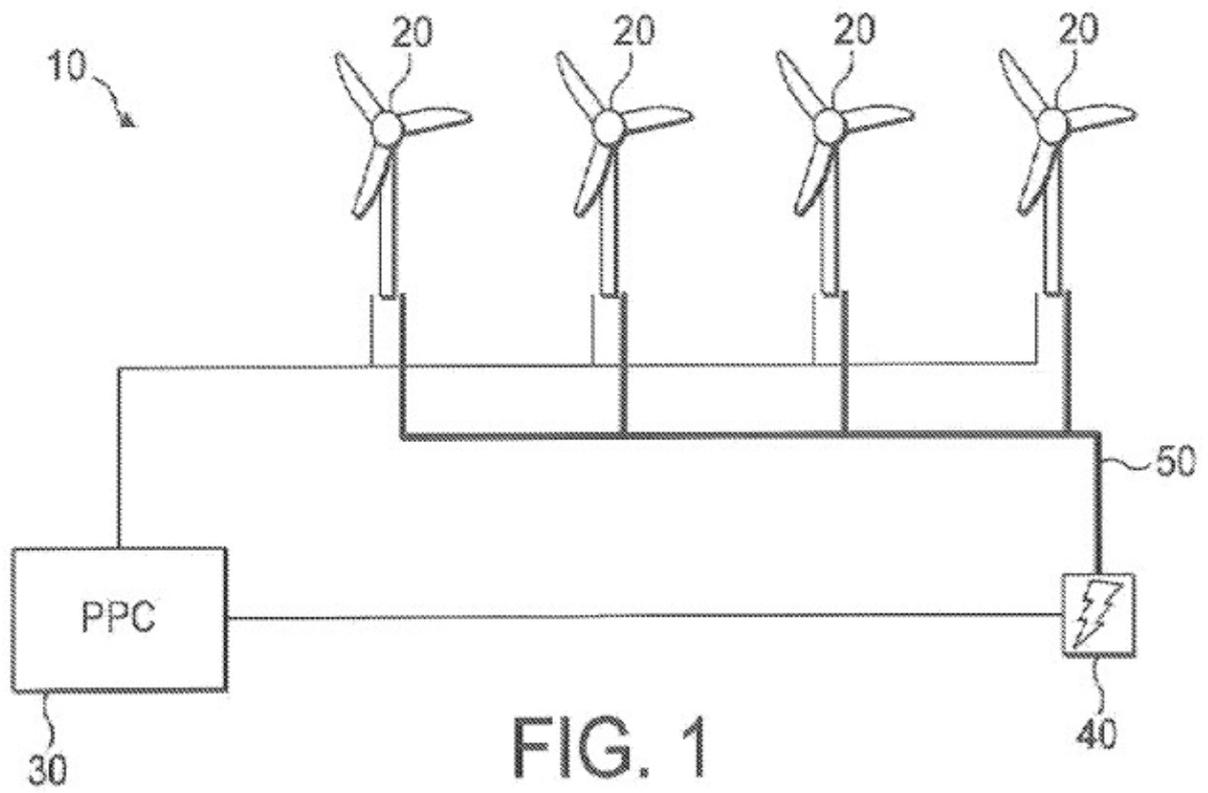
35 Son posibles muchas alternativas a las realizaciones descritas y se les ocurrirá a los expertos en la técnica sin apartarse del alcance de la invención, que se define por las siguientes reivindicaciones.

40

45

**REIVINDICACIONES**

1. Un método para controlar una turbina eólica (20), comprendiendo el método las etapas de:
- 5 generar y emitir una señal de control de sobrecarga a la turbina eólica (20), estableciendo la señal de control de sobrecarga una cantidad por la que va a sobrecargarse la salida de potencia de la turbina eólica (20); caracterizado por:
- 10 medir valores de temperatura del cable para al menos un cable de recogida de energía (50, 55) conectado a la turbina eólica (20) utilizando al menos un sensor de temperatura del cable (90), en el que se utiliza el al menos un cable de recogida de energía (50, 55) para transportar la energía generada a partir de la turbina eólica (20) para exportar a una red (40);
- 15 determinar si los valores de temperatura del cable medidos superan un punto de ajuste de temperatura; y
- 20 modificar la señal de control de sobrecarga para reducir la cantidad de sobrecarga si los valores de temperatura del cable medidos superan el punto de ajuste de temperatura.
2. Un método para controlar una pluralidad de turbinas eólicas (15) conectadas a un nodo común (25) desde el cual se exporta energía generada por la pluralidad de turbinas (15) por al menos un cable de recogida de energía (50, 55), en el que se utiliza el al menos un cable de recogida de energía (50, 55) para transportar la energía generada a partir de la pluralidad de turbinas eólicas (15) para exportar a una red (40), comprendiendo el método las etapas de:
- 25 generar y emitir una señal de control de sobrecarga a la pluralidad de turbinas eólicas (15), estableciendo la señal de control de sobrecarga una cantidad por la que va a sobrecargarse la salida de potencia de la pluralidad de turbinas eólicas (15); caracterizado por:
- 30 medir valores de temperatura del cable para el al menos un cable de recogida de energía utilizando al menos un sensor de temperatura del cable (90);
- 35 determinar si los valores de temperatura del cable medidos superan un punto de ajuste de temperatura; y
- 40 modificar la señal de control de sobrecarga de al menos una de las turbinas eólicas (20) para reducir la cantidad de sobrecarga si los valores de temperatura del cable medidos superan el punto de ajuste de temperatura.
3. El método según la reivindicación 1 o 2, en el que la etapa de modificar la señal de control de sobrecarga comprende reducir la cantidad de sobrecarga a cero.
4. El método según la reivindicación 1 o 2, en el que la etapa de modificar la señal de control de sobrecarga comprende reducir progresivamente la cantidad de sobrecarga basándose en la medida en que se supera el punto de ajuste de temperatura.
- 45 5. El método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el al menos un sensor de temperatura del cable (90) es solidario con el al menos un cable de recogida de energía (50, 55).
- 50 6. El método según la reivindicación 5, en el que el al menos un sensor de temperatura del cable (90) es un sensor de temperatura distribuido que se extiende a lo largo de una parte sustancial de la longitud del al menos un cable de recogida de energía (50, 55).



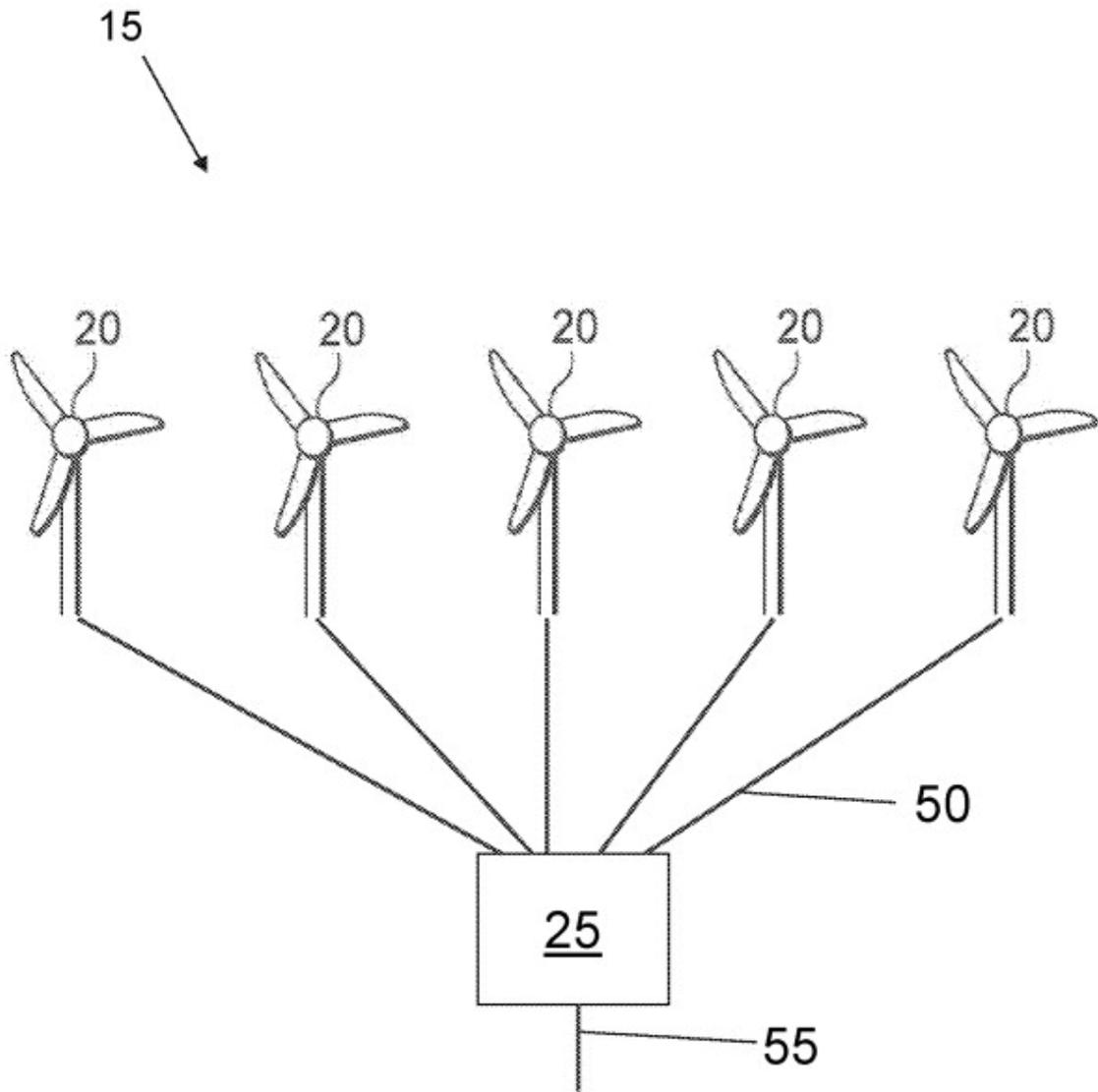


FIG.2

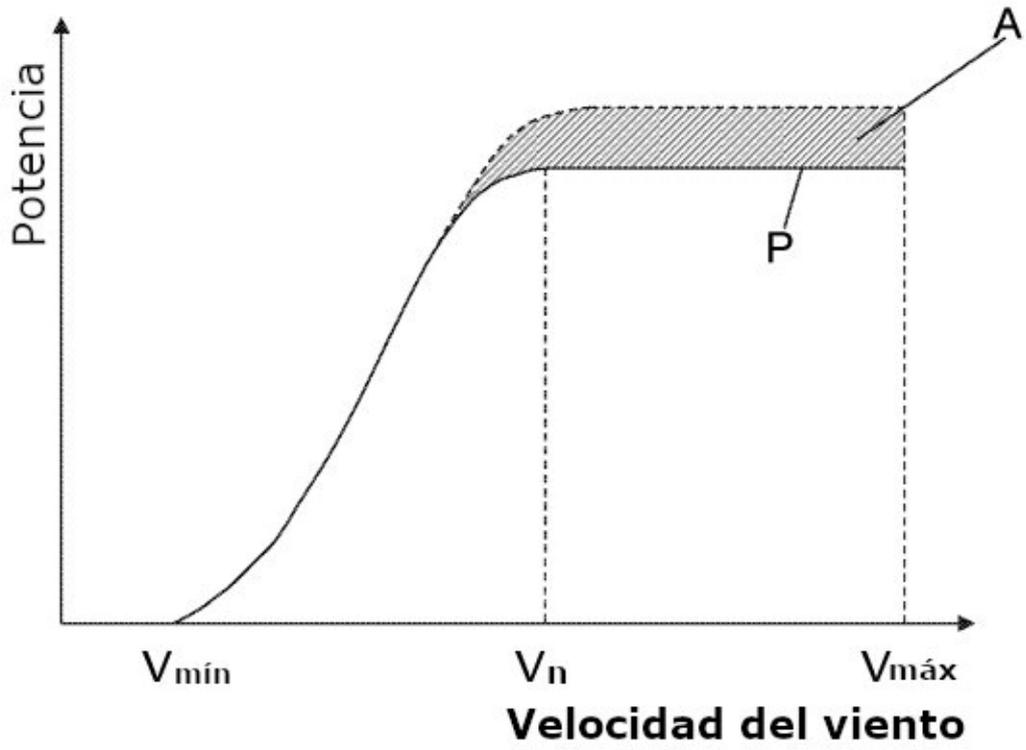


FIG. 3

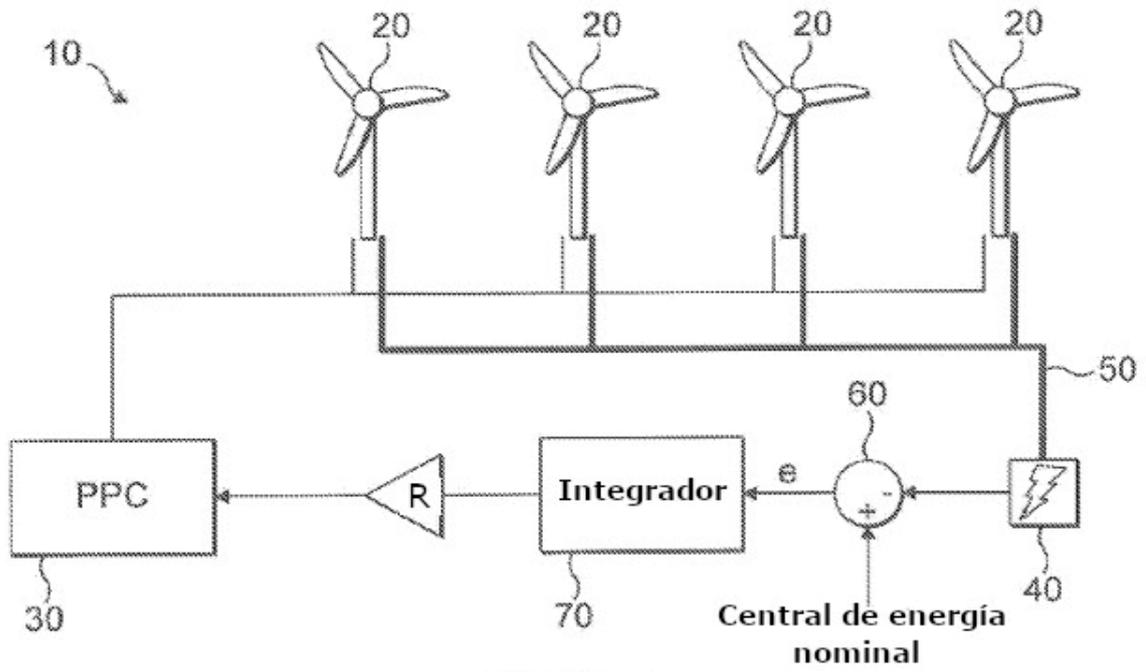


FIG. 4

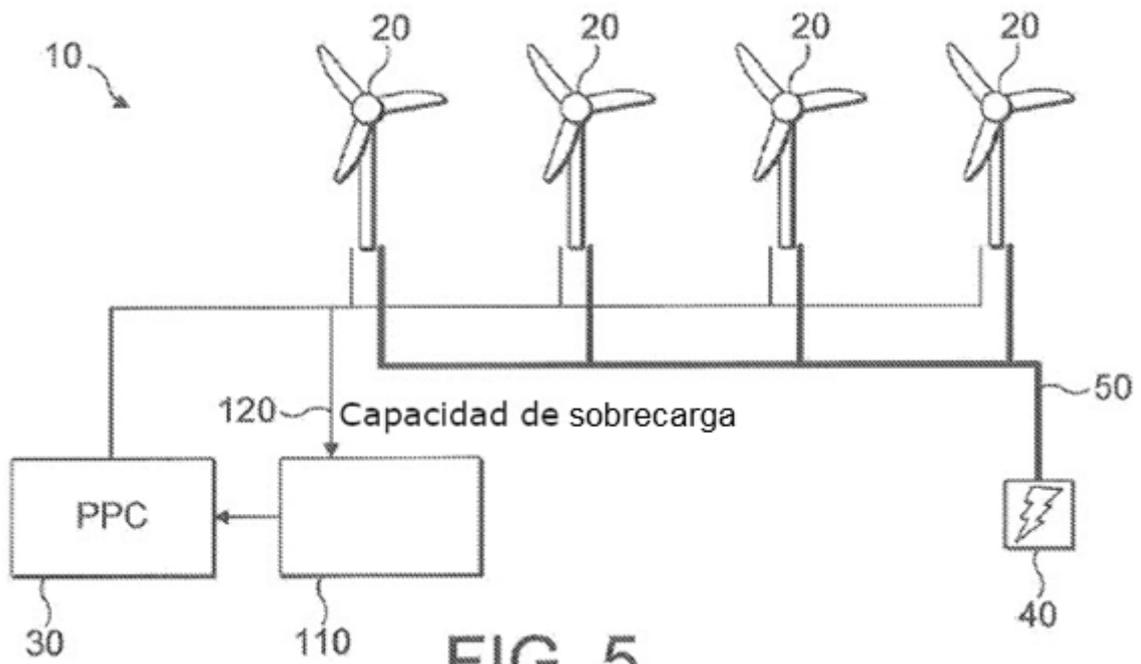


FIG. 5

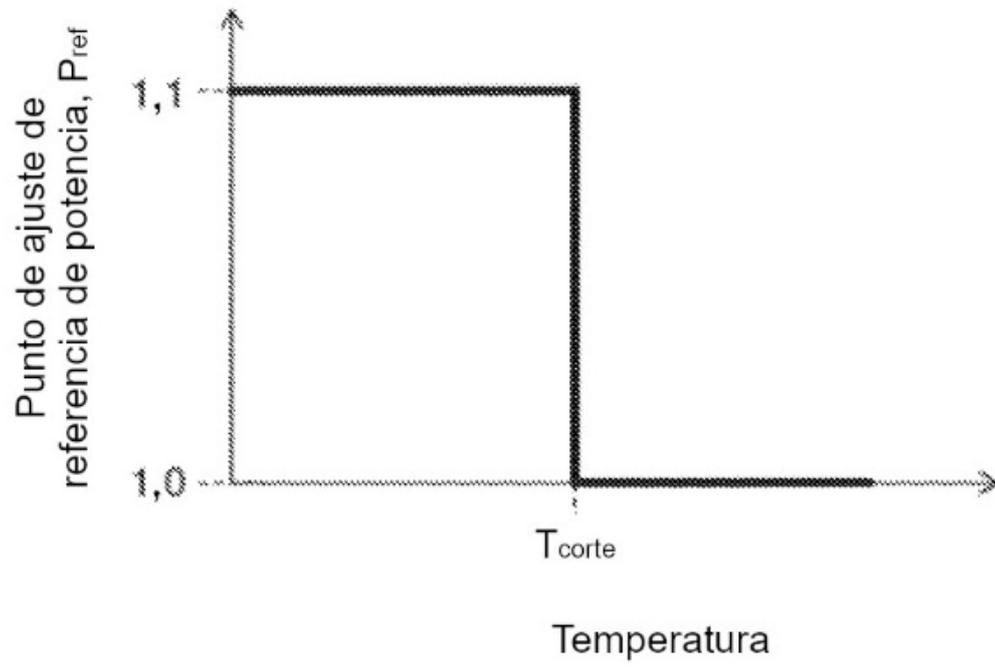


FIG.6

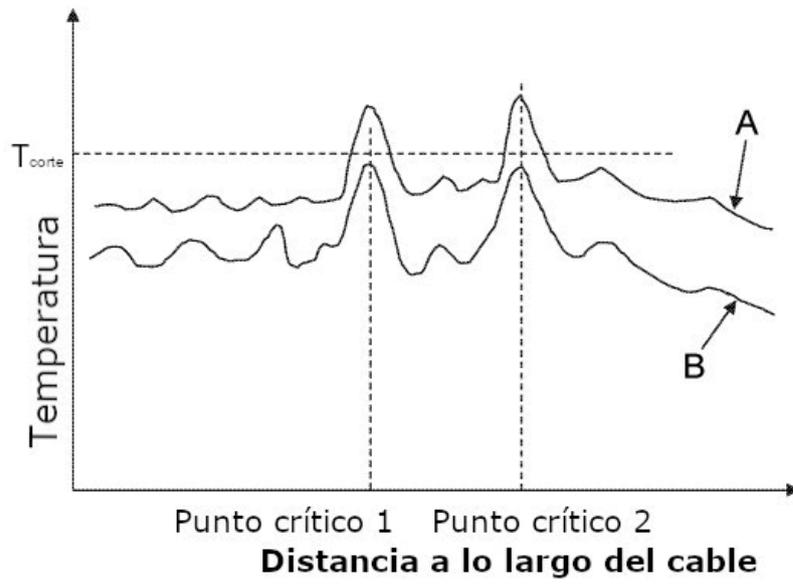


FIG.7

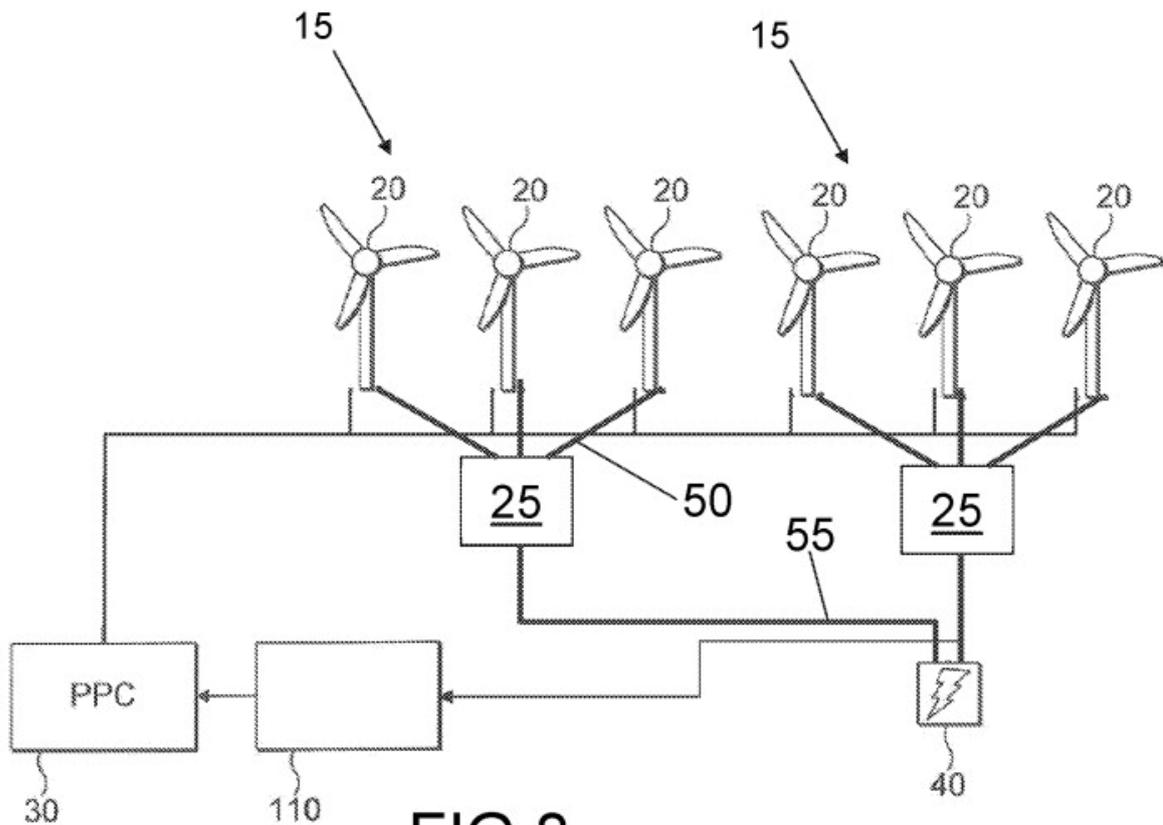


FIG.8

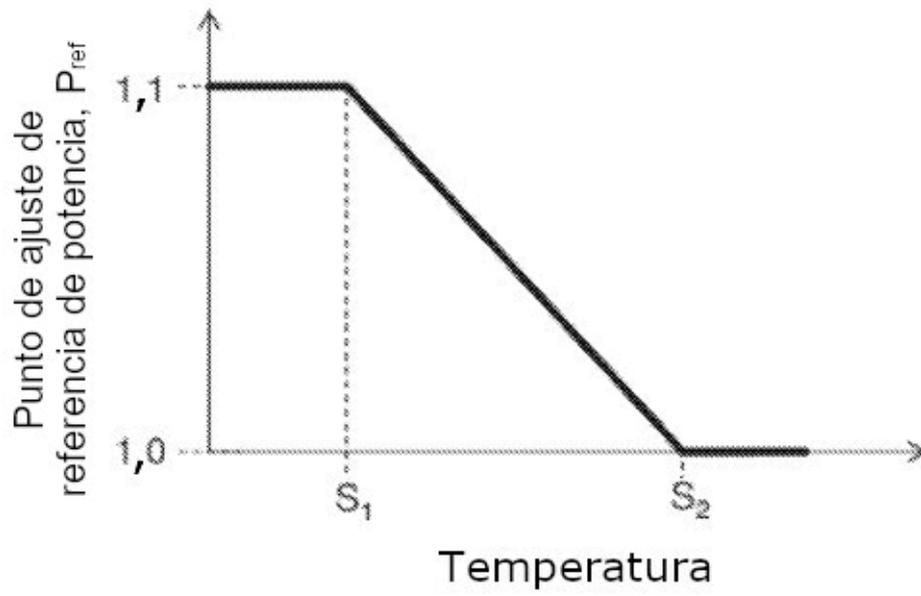


FIG.9

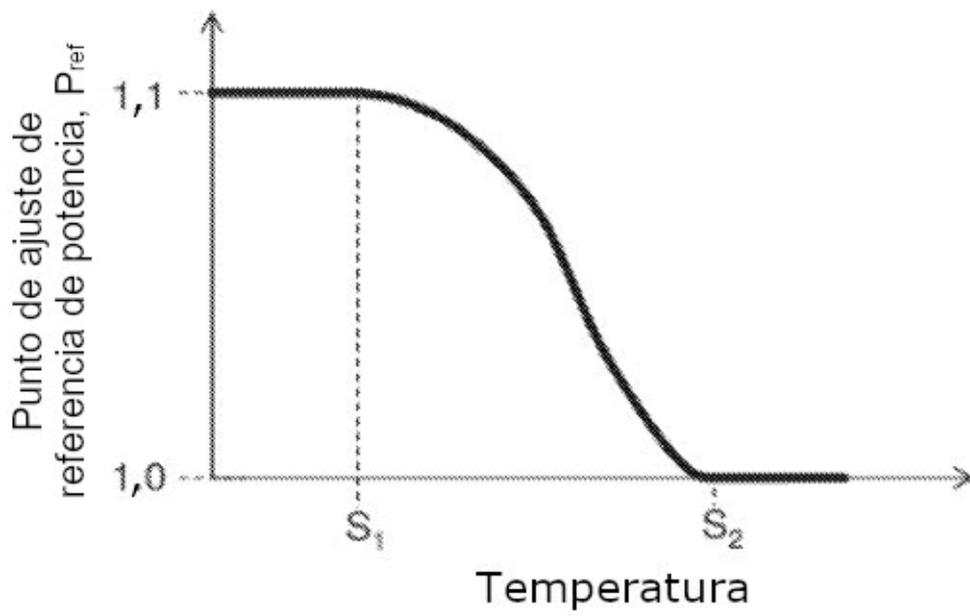


FIG.10

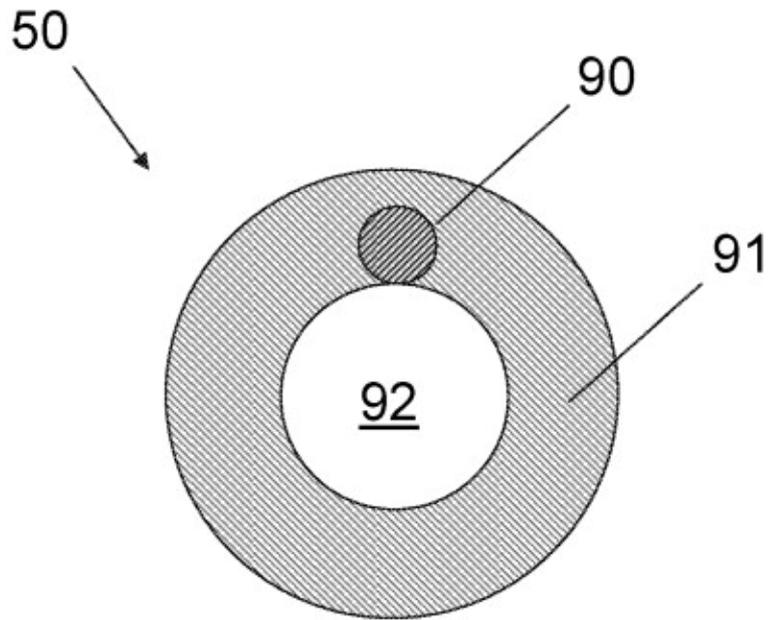


FIG. 11

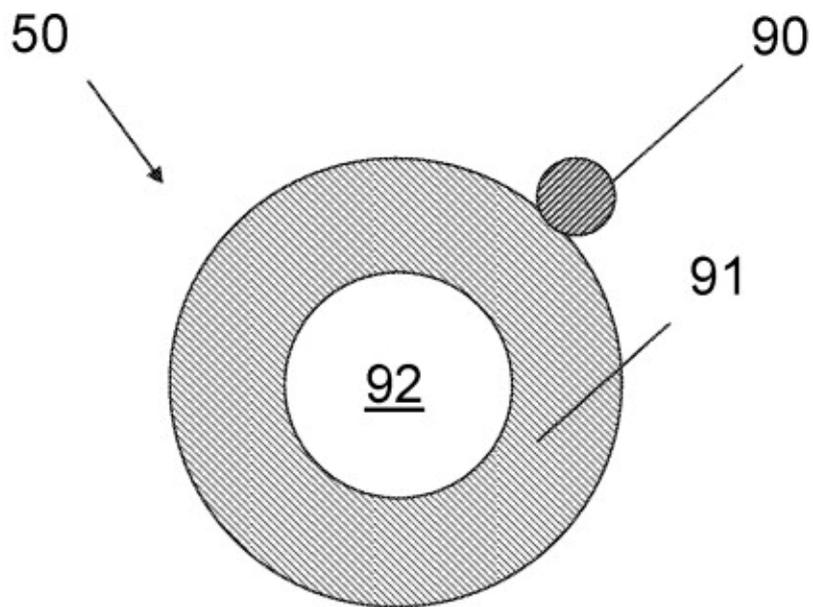


FIG. 12