

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 812 511**

51 Int. Cl.:

**H02J 3/38** (2006.01)  
**F03D 7/02** (2006.01)  
**F03D 7/04** (2006.01)  
**F03D 9/00** (2006.01)  
**F03D 9/25** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.12.2008 E 13172491 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.07.2020 EP 2642626**

54 Título: **Aparato y procedimiento para hacer funcionar una turbina eólica en condiciones de voltaje de red de suministro bajo**

30 Prioridad:

**28.12.2007 US 9594 P**  
**28.02.2008 DK 200800289**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**17.03.2021**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**JØRGENSEN, ALLAN HOLM;**  
**HELLE, LARS y**  
**SCHAIER, LEONARD**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 2 812 511 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**

Aparato y procedimiento para hacer funcionar una turbina eólica en condiciones de voltaje de red de suministro bajo

**Campo de la invención**

5 La presente invención se refiere al control de la corriente de salida desde una turbina eólica a una red de energía eléctrica, y, más en particular, a un aparato y procedimiento para el control de la corriente en condiciones de variaciones en el voltaje de la red debidas al cambio en las condiciones de la red como en el caso, por ejemplo, en el que una turbina eólica experimenta y se recupera de una falla.

**Antecedentes de la invención**

10 Una turbina eólica es un dispositivo de conversión de energía que convierte la energía cinética en el viento en energía eléctrica para su uso por los consumidores conectados a una red de suministro eléctrico. Típicamente, este tipo de conversión de energía implica el uso de viento para que las palas de la turbina, a su vez, giren el rotor de un generador eléctrico de corriente alterna (AC), directamente o bien por medio de una caja de engranajes.

15 La salida eléctrica primaria de un generador AC es desde su estator. La salida del estator puede estar conectada directamente a la red o pasar a través de un convertidor de energía. Un generador común de los sistemas de la técnica anterior es el generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) en el que la salida desde el estator está controlada por la corriente en su rotor. El estator en dicho sistema puede estar conectado directamente a la red debido a que el voltaje y la frecuencia del estator, que están controlados por el rotor, pueden estar obligados a coincidir con el voltaje y la frecuencia de la red.

20 También se puede usar un generador diferente de DFIG tal como una máquina de generador sincrónico o de generador de inducción de jaula como generador eléctrico en un sistema de turbina eólica que proporciona energía reactiva y real controlada. Cuando se usan estos tipos de máquinas en una configuración de velocidad variable, se utiliza un convertidor completo entre la salida del estator y una red de suministro puesto que la frecuencia de salida del generador no está controlada. Un convertidor completo rectifica la salida AC del estator a DC, y a continuación invierte la DC de nuevo a AC a niveles que coincidan con el voltaje y la frecuencia de red.

25 La energía eléctrica disponible a partir de una turbina eólica y suministrada a una red de suministro es una función de la velocidad del viento, las características del rotor de la turbina eólica, eficacia de la turbina eólica y equipo asociado, pérdidas en la red y las características del sistema de distribución y cargas conectadas a ella. Debido a que la velocidad del viento y las cargas fluctúan, los niveles de voltaje en la red pueden variar. Asimismo, puesto que la mayoría de los componentes de transmisión de energía eléctrica tienen un componente reactivo significativo, los voltajes en la red también son función de las características reactivas de cargas y componentes conectados a la red.

30 Para evitar el daño al equipo, se debe mantener el voltaje de la red dentro de determinadas tolerancias y cuando se exceden estos límites, se deben tomar medidas. Para variaciones del orden de voltajes nominales de un +/-5 % o así, se usan abastecedores o absorbedores de cantidades variables de energía reactiva para compensar los cambios de voltaje debidos a la naturaleza reactiva de la red.

35 Cuando se produce una falla en la red del tipo cortocircuito, los voltajes de la red pueden caer por debajo del nivel normal, lo que podría dañar potencialmente el equipo generador de energía debido a, entre otras cosas, corrientes en exceso y tensiones mecánicas. Como es bien reconocido, la energía es igual al voltaje multiplicado por la corriente. Por lo tanto, si se produce una caída en el voltaje y la energía no se reduce, la corriente aumentará drásticamente.

40 Para proteger contra el daño, si la caída de voltaje se da durante un periodo de tiempo significativo, los interruptores o dispositivos como fusibles aíslan esa parte de la red que contiene la falla de la fuente de energía. El aislamiento de la parte de la red que contiene la falla se denomina "despeje".

45 Las turbinas eólicas y/o los parques eólicos que usan controladores de energía constante (energía tanto real como reactiva) son particularmente susceptibles a daño por corrientes en exceso. Si el bucle de control de energía no puede responder lo suficientemente rápido, la corriente de salida aumentará hasta mantener un nivel fijo de energía y compensar la bajada del voltaje. Para proteger contra corrientes altas, muchos sistemas de la técnica anterior limitan la corriente de salida durante una falla en la corriente a un valor preestablecido máximo, minimizando así el daño potencial debido a una corriente alta.

Los documentos US 2004/145188 y EP 1 561 946 dan a conocer generadores de turbina eólica según el preámbulo de la reivindicación 1.

50 La presente invención usa un concepto de control descrito comúnmente como fuente de corriente constante o de corriente controlada para protección. Como se usa en esta memoria descriptiva, los términos "corriente constante" o "corriente controlada" se interpretarán con el significado de que la corriente constante o controlada está relacionada con un comando o referencia por un factor de proporcionalidad sustancialmente fijo y sustancialmente independiente del voltaje en el que se alimenta la corriente.

La salida de energía de la turbina eólica que funciona como una fuente de corriente constante o controlada varía en proporción directa con el voltaje de la red. Por lo tanto, el voltaje durante una falla pasa por dos fases de energía de salida variable. Cuando el voltaje cae en respuesta a la falla, la energía de salida está en un mínimo, habiendo pasado por una transición sustancialmente pronunciada desde energía máxima a un nivel mucho menor. Después de que se despeje la falla, el voltaje de red aumenta, lo que demanda un incremento en la cantidad de energía de salida de la(s) turbina(s) eólica(s) hasta que la energía se restablece en los niveles previos a la falla.

En el pasado, era más común proteger las turbinas afectadas por la falla desconectándolas de la red. Sin embargo, como ha crecido el número de turbinas eólicas que se usan para generar electricidad, incrementando su contribución relativa a la energía global de la red, la práctica emergente es la de requerir que las turbinas eólicas permanezcan conectadas para ayudar a soportar la red tanto durante una falla como mientras la red se recupera de la falla, esto es proporcionar, según se necesite, corriente reactiva o bien real.

En general, el requisito de soporte se refiere a contrarrestar el efecto de una falla intentando elevar los voltajes del sistema y minimizar la cantidad de tiempo requerida para volver a situar la turbina eólica en línea para generar energía. Además, aunque parezca contradictorio, es ventajoso que las turbinas eólicas afectadas continúen proporcionando corriente de salida sustancialmente en la misma magnitud que estaba presente antes de la falla y no reducirla. Una corriente de salida normativa está más capacitada para accionar los dispositivos protectores y por lo tanto, acortar potencialmente el tiempo para aislar la falla.

Una motivación adicional para mantener una turbina eólica conectada y que proporcione energía durante una falla es reducir el tiempo necesario para devolver una turbina desconectada a la línea después de que se despeje la falla. Si el rotor de la turbina eólica se puede mantener en funcionamiento a o casi a la velocidad previa a la falla, el tiempo para devolver totalmente a la línea se puede acortar enormemente. A la inversa, si se reduce la carga, como en una condición de falla, se provocaría que las palas de la turbina aceleraran rápidamente, y a menos que se tomen algunas medidas para solucionar el problema, se producirá un daño.

Los códigos de la red en todo el mundo requieren un comportamiento diferente durante una falla en la red de voltaje bajo. Algunos códigos de red requieren una corriente reactiva total y tanta corriente activa como sea posible durante la perturbación de la red. Otros códigos de red priorizan la corriente activa. Aunque sería deseable poder maximizar la corriente real y reactiva al mismo tiempo, el calentamiento de los componentes, ya sea el rotor de un DFIG o los elementos que transportan la corriente de un convertidor parcial o total, es una función de ambos componentes real y reactivo de la corriente que se transporta. Por lo tanto, si se desea maximizar la corriente real, entonces se debe minimizar el componente de corriente reactiva. Asimismo, si se va a maximizar la corriente reactiva, entonces se debe minimizar el componente de corriente real del total.

La presente invención está dirigida a solucionar el problema mencionado anteriormente de poder maximizar ambos componentes de corriente reactiva y real disponibles de una turbina eólica o agrupamiento de turbinas eólicas, proporcionando un suministro de energía reactiva por separado para manejar los requisitos de corriente reactiva durante una falla y requiriendo que las propias turbinas eólicas maximicen la energía real.

Como es conocido por los expertos en la técnica, una turbina eólica de velocidad variable extrae lo máximo que puede del viento cuando la proporción de velocidad de la punta de la pala con respecto a la velocidad del viento es una constante en o casi en el valor de diseño particular para el diseño de turbina eólica particular. Sin embargo, debido a las restricciones de velocidad del generador, no es posible hacer funcionar una turbina eólica a su proporción óptima de velocidad de punta de pala - viento sobre el intervalo completo de velocidad del viento. Dicho de otro modo, a medida que se incrementa la velocidad del viento, se incrementa la velocidad rotacional del generador y se acerca al límite de velocidad superior del rotor y del generador.

En el intervalo de velocidad de media a alta, que es el intervalo en el que la turbina eólica es más eficaz, la proporción de velocidad de la punta de la pala con respecto al viento se mantiene constante equilibrando la salida de energía del sistema con la disponible del viento. Esto es, la energía impuesta por la turbina eólica se deriva del conocimiento de la velocidad del viento y se fija a ese valor.

A velocidades del viento mayores, no se puede permitir que la turbina eólica funcione a su proporción óptima de velocidad de la punta de la pala con respecto al viento, conocida como la proporción de velocidad de la punta (típicamente en el intervalo de aproximadamente 6 a 10) debido a que mantener la proporción constante requeriría una velocidad rotacional para el generador que excedería sus límites. Por lo tanto, cuando la velocidad del viento se incrementa hasta su velocidad nominal, y otros incrementos puedan dar lugar a que el generador entre en un intervalo de velocidad no seguro, se fija una referencia de la velocidad del generador al punto de velocidad nominal. Si la velocidad del viento se incrementa adicionalmente, la salida de energía impuesta se limita a un valor fijo y el paso de la pala se varía para mantener la energía tomada del viento igual a la energía necesaria para mantener el rotor de la turbina eólica, y por tanto el generador, a la velocidad nominal del generador. El control del paso de la pala se usa porque, aun cuando hay más energía disponible para extraer el viento a velocidades del viento altas, el rotor de la turbina eólica se vuelve menos eficaz en la extracción de energía extra.

En el caso de una velocidad del viento mayor (así como en el caso del intervalo de velocidad menor), debe existir un

equilibrio entre energía capturada por el sistema de rotor y la energía que sale de la turbina más pérdidas en los distintos sistemas de turbina eólica. Sin embargo, una diferencia entre el funcionamiento en estos intervalos es que en el intervalo de velocidad óptimo, la pala se ajusta para extraer tanta energía como esté disponible, mientras que en el intervalo de velocidad mayor el paso de la pala se ajusta para coger solo la energía suficiente para cumplir el valor impuesto para energía total que es menor que el que está realmente disponible en el viento.

Cuando se perturba un equilibrio, como en el caso de una falla de voltaje bajo repentina, a menudo los sistemas de la técnica anterior han usado un cambio rápido en el paso de la pala a una posición de no energía seguido de una desconexión para evitar el daño en el equipo debido a condiciones de exceso de corriente y de velocidad.

En general, la energía capturada por un sistema de pala de rotor de turbina eólica se deriva de:

$$P_{el} = \frac{\eta \rho}{2} \pi R^2 c_p v^3, \quad [\text{Ec. 1}]$$

donde  $\eta$  es un factor de eficacia, dependiente de la eficacia del generador, caja de engranajes, etc. y  $\rho$  es la densidad del aire, que es de aproximadamente  $1,225 \text{ kg/m}^3$  al nivel del mar;  $R$  es el radio del rotor en metros,  $c_p$  es la fracción de energía extraída del viento, y  $v$  es la velocidad del viento en metros/segundo.

En la fig. 1 se muestra un conjunto de la técnica anterior de curvas de  $c_p$  en función de los ángulos del paso de la pala y la proporción de la velocidad de la punta de la pala con respecto al viento ( $\lambda$ ). Como se ilustra en la fig. 1, cada curva de ángulo de paso de la pala tiene una proporción de velocidad de la punta de la pala con respecto al viento diferente en la que  $c_p$  es un máximo. Por lo tanto, una curva del ángulo de paso de la pala frente a la proporción de velocidad de la punta de la pala con respecto al viento en cada uno de los puntos de  $c_p$  máximos proporciona el ángulo de paso de la pala que permitirá la extracción de la energía máxima disponible en cada  $\lambda$ . Como un experto en la técnica reconocerá a partir del ejemplo en la fig. 1, la energía máxima en el viento se extraerá si la proporción de la velocidad de la punta con respecto al viento está en proporción de aproximadamente 6 a 10.

Para un diseño de turbina eólica dado, la Ec. 1 calcula la salida eléctrica real de una turbina eólica cuando se conocen tanto  $c_p$ , que es una función del ángulo de paso de la pala, como  $v$ .

Asimismo, se pueden usar los mismos constituyentes de la Ec. 1 para calcular  $c_p$  en lugar de  $P_{el}$ , como sigue:

$$c_p = \frac{2P_{el}}{\eta \rho \pi R^2 v^3}, \quad [\text{Ec. 2}]$$

Por lo tanto, la Ec. 2 proporciona el valor del coeficiente de energía necesario para extraer del viento a una velocidad  $v$ , un valor eléctrico de  $P_{el}$ , como función de  $\lambda$ .

La presente invención utiliza la información en la fig. 1, Ec. 1 y Ec. 2 para determinar un ángulo de paso de la pala que extraerá del viento la energía impuesta en una turbina eólica durante y después de una falla y por lo tanto que mantendrá la velocidad del rotor del generador sustancialmente constante durante y después de una falla.

Un beneficio adicional de la presente invención es que mejora las características de recuperación proporcionando valores de corriente controlados mientras que se toleran los voltajes variables que resultan de una falla. Esto se compara de forma favorable con los sistemas de la técnica anterior, en los que la energía suministrada a la carga durante una falla es una función transitoria del cambio de voltaje y corriente.

### Descripción de la invención

La presente invención protege una turbina eólica durante una falla de voltaje bajo y proporciona soporte de red suministrando realimentación de corriente negativa para forzar que el equipo que genera energía funcione como una fuente de corriente constante/controlada esto es sustancialmente independiente del voltaje de red, protege contra el exceso de velocidad por cambio en el ángulo de paso de la pala para igualar la energía de salida real durante la falla y la recuperación de la falla, y proporciona una corriente reactiva y real máxima, en un modo de realización preferente, separando la funcionalidad requerida para proporcionar corrientes reales y reactivas.

La velocidad del rotor se controla durante y después de la falla controlando el ángulo de paso de la pala de modo que la energía proporcionada por el viento y absorbida por el rotor se iguale sustancialmente con la salida de energía de la turbina eólica. En este modo de realización preferente, la presente invención consigue una velocidad sustancialmente constante usando una o más tablas de consulta que relacionan el paso de la pala con la salida de energía como función de  $\lambda$ . En un modo de realización alternativo, se usan expresiones matemáticas para hallar el ángulo de paso de la palas.

En un primer aspecto, la presente invención se refiere a un generador de turbina eólica que incluye un rotor que tiene palas de paso variable conectadas de forma funcional a él, un generador AC para suministrar electricidad de corriente de salida, y sensores de energía de salida y corriente de salida para proporcionar señales que dependen de la energía

y la corriente de salida, respectivamente, comprendiendo dicho generador de turbina eólica;

- un sistema de control de realimentación de corriente para recibir una señal de corriente de salida que indica la corriente de salida y que mantiene el nivel de corriente de salida de la turbina eólica sustancialmente al mismo nivel durante una condición de voltaje bajo que su nivel durante una condiciones normales; y

5 - un sistema de control de paso de pala para recibir señales de energía de salida que indican la energía de salida para variar el paso de las palas para mantener una velocidad de rotor que es sustancialmente la misma antes y durante una condición de voltaje bajo.

El generador de turbina eólica puede comprender además un suministro de energía que no puede interrumpirse.

10 En un segundo aspecto, la presente invención se refiere a un procedimiento para hacer funcionar un generador de turbina eólica que incluye un rotor que tiene palas de paso variable conectadas de forma funcional a él, un generador AC para suministrar electricidad de corriente de salida, y sensores de energía de salida y corriente de salida para proporcionar señales que dependen de la energía y la corriente de salida, respectivamente, comprendiendo dicho procedimiento las etapas de;

15 - recibir una señal de corriente de salida que indica la corriente de salida y que mantiene el nivel de corriente de salida de la turbina eólica sustancialmente al mismo nivel durante una condición de voltaje bajo que su nivel durante una condición normales usando un sistema de control de realimentación de corriente; y

- recibir señales de energía de salida que indican la energía de salida para variar el paso de las palas para mantener una velocidad de rotor que es sustancialmente la misma antes y durante una condición de voltaje bajo usando un sistema de control de paso de pala.

20 En un modo de realización, la velocidad de rotor sustancialmente constante se consigue usando una o más tablas de consulta que relacionan el paso de la pala con la salida de energía como función de  $\lambda$ . En otro modo de realización se usan expresiones matemáticas para hallar los ángulos de paso de la pala.

25 Como se destaca, los códigos de red establecen requisitos variables para turbinas eólicas durante una falla de red de voltaje bajo. La presente invención puede satisfacer todos estos códigos de red, por medio de su capacidad para suministrar corriente reactiva total y/o corriente activa total o cualquier subconjunto de las mismas para resolver la condición de falla. A su vez, esto permite un diseño de turbina mundial uniforme, reduciendo sustancialmente los costes, en particular durante periodos tales como en este momento en el que existe una demanda significativa de turbinas eólicas.

### Breve descripción de los dibujos

30 En referencia a las figuras, los números similares se refieren a elementos similares:

La fig. 1 es una gráfica que ilustra la salida de energía de una turbina eólica de la técnica anterior como función de la proporción de velocidad de la punta de la pala con respecto al viento ( $\lambda$ ) y la velocidad del viento.

35 La fig. 2 es una gráfica que ilustra el ángulo óptimo de paso de la pala de una turbina eólica de la técnica anterior como función de la proporción de velocidad de la punta de la pala con respecto al viento ( $\lambda$ ) y la velocidad del viento.

La fig. 3 es una ilustración esquemática de los principales elementos de una turbina eólica de la técnica anterior.

La fig. 4 es una ilustración esquemática de un parque eólico que tiene múltiples turbinas eólicas y un compensador de energía reactiva, de acuerdo con la presente invención.

40 La fig. 5 ilustra un diagrama de bloque de los sistemas de control de generación de referencia de energía y del ángulo de paso de la pala de la presente invención.

La fig. 6 proporciona un diagrama de bloque que muestra los principales sistemas de control de la turbina eólica de la presente invención.

45 Aunque la invención es susceptible a varias modificaciones y formas alternativas, se han mostrado modos de realización específicos a modo de ejemplo en los dibujos y se describirán en detalle en el presente documento. Se debe entender, sin embargo, que no se pretende que la invención se limite a las formas particulares divulgadas. En cambio, la invención cubre todas las modificaciones, equivalentes y alternativas que entran dentro del espíritu y alcance de la invención, como se define por las reivindicaciones adjuntas.

### Descripción detallada de los dibujos

50 Como se muestra gráficamente en la fig. 3, una turbina eólica 10 está soportada sobre una torre 20 y una góndola de turbina eólica 30 está situada sobre la parte superior de la torre.

El rotor de turbina eólica 23 ilustrado tiene tres palas de turbina eólica 25 conectadas al buje 24 por medio de mecanismos de paso 26. Cada mecanismo de paso 26 incluye un medio de accionamiento de cojinete y paso de pala lo que permite el paso de la pala. El procedimiento de paso está controlado por un controlador de paso. Los detalles del medio de accionamiento de cojinete y paso de la pala y del controlador de paso (no mostrado) son bien conocidos en la técnica.

En referencia a la fig. 4, varias turbinas eólicas 10 están situadas en un parque eólico 100 que tiene una subestación 110, un compensador estático de potencia reactiva 115 para proporcionar energía reactiva para soportar el control del voltaje de red. La subestación 110 también incluye un detector de falla de voltaje bajo 120, sensor de voltaje 125 y controlador de energía reactiva 117. En condiciones normales, el controlador de energía reactiva 117 funciona en un modo de energía reactiva impuesta en el que la salida de energía reactiva responde al sensor de voltaje 125 y a las condiciones de voltaje de red sobre el voltaje nominal así como a la energía reactiva (o factor de energía) impuesta desde un operador del sistema.

Una falla de voltaje bajo para la presente invención es un voltaje que falla por debajo de aproximadamente 0,85 por unidad y permanece por debajo de ese valor durante más de aproximadamente 40 -100 milisegundos. Cuando una falla es detectada por el detector de falla de voltaje bajo 120, se envía una señal a S/H 215 (fig. 6) y S/H 315 de la fig. 5 para mantener tanto la corriente del estator como lambda en sus valores previos a la falla. Asimismo, el controlador de energía reactiva 117 cambia el compensador estático de potencia reactiva 115 desde un modo de energía reactiva controlada a un modo de corriente constante/controlada.

En una condición de falla, ambas corrientes real y reactiva del parque 100 están controladas preferentemente para valores fijos. El sistema de control 200 de la fig. 6 controla la corriente de salida real para un valor establecido antes de la falla y el compensador estático de potencia reactiva 115 controla la corriente reactiva para su valor preestablecido. De forma alternativa, el compensador estático de potencia reactiva 115 controla su corriente reactiva de salida como una función predeterminada del voltaje en PCC.

En el modo de realización preferente, el detector de falla de voltaje bajo 120 funciona de forma independiente del detector de falla de voltaje bajo 265 (véase la fig. 6), aunque si la comunicación entre la subestación y la turbina individual es lo suficientemente rápida, el detector de falla de voltaje bajo 120 puede proporcionar un comando por medio de la interfaz de comunicación 127 a cada turbina eólica 10 para que entre en un modo de falla de voltaje bajo.

Para una velocidad del viento particular, y sus variables de velocidad asociadas, el objetivo es el de hacer funcionar el rotor de la turbina en un ángulo de paso de la pala que maximice  $c_p$ , la fracción de energía recuperada del viento. Además, durante el tiempo en que la velocidad del viento sea constante y el ángulo de paso de la pala sea invariable, el rotor permanecerá en el punto  $c_p$  mientras la energía disponible del rotor sea absorbida por la carga de red.

En referencia a la fig. 5, el bloque de generador de referencia del rotor 300 proporciona el ángulo de paso de la pala bajo condiciones de carga parcial, carga total así como de velocidad del viento alta y falla. El bloque de generador de referencia del rotor 300 recibe una señal de la velocidad del viento, una señal de velocidad del eje del generador, una señal de energía de salida y señales del nivel de energía de salida y del control del paso de la pala. En general, la velocidad rotacional del eje del generador es operable asociada con el rotor por una caja de engranajes que aumenta la velocidad rotacional del rotor hasta la necesaria por el generador 245. El bloque de generador de referencia del rotor 300 también recibe un nivel lógico del detector de falla de voltaje bajo 265 de la fig. 6 cuando se produce una falla y los valores previos a la falla son para que se mantengan a pesar de, y se recuperen de, una falla.

En referencia a la fig. 5, una señal de velocidad del viento entra en el escalador\_1 305 que emite una velocidad del generador óptima (referencia de la velocidad del generador (punto de referencia)) para la velocidad del viento de entrada dada y el ángulo de paso de la pala en la curva ilustrativa de la fig. 2. Esta señal de velocidad del generador óptima se compara con la velocidad del generador real en el detector de error 310 y la diferencia se modifica por el escalador\_2 325 para representar una referencia de carga parcial (punto de referencia). Este es el nivel de energía que la turbina eólica tendría que proporcionar para mantener la velocidad del generador real igual a la velocidad del generador de referencia para una velocidad del viento particular. El nivel de energía de referencia de carga parcial se alimenta al interruptor 330 que selecciona un valor de referencia de carga parcial o bien un nivel de referencia de energía clasificada (nominal). El valor se selecciona basándose en si el valor calculado de la energía de referencia es mayor que el de la referencia de energía clasificada. Dicho de otro modo, si el nivel de energía basado en la velocidad del viento es igual a o mayor que la energía clasificada (nominal), entonces el interruptor 330 selecciona el valor de energía clasificada ya que el valor basado en la velocidad del viento podría exceder la clasificación de la turbina. La salida del interruptor 330 alimenta el muestreo y retención (S/H) 205 (mostrado en oscuro en esta fig. 5).

De nuevo con referencia a la fig. 5, la señal de velocidad del generador real junto con la señal de velocidad del viento también se alimentan al bloque de cálculo lambda 320 donde continuamente se calcula una lambda. La salida del bloque de cálculo lambda 320 se alimenta al muestreo y retención (S/H) 315 que pasa continuamente el valor lambda hasta que se recibe un comando de mantenimiento desde el detector de falla de voltaje bajo 265 de la fig. 6

El valor previo a la falla mantenido junto con el valor de  $c_p$  calculado en el bloque de cálculo 360 se usa con tablas de índices prealmacenadas que presentan la información en la fig. 1. Estas tablas se introducen con lambda y se calcula

$c_p$  para proporcionar un ángulo de paso de la pala que extraerá del viento solo la energía suficiente para proporcionar la energía de salida requerida por la red (del sentido de energía 275 en la fig. 6) en cualquier punto particular en el ciclo de falla.

5 El ángulo de paso de la pala determinado se alimenta al interruptor 350 que selecciona los ángulos de paso bajo condiciones de falla o bien bajo condiciones sin falla. Asimismo, los valores sin falla se seleccionan por el interruptor 345 que selecciona entre un ángulo de paso de la pala óptimo (basado sólo en la velocidad del viento) durante la carga parcial como se muestra en la fig. 2 o un ángulo de paso de la pala durante la carga clasificada donde la carga se fija y la velocidad de la pala se controla para condiciones por debajo de un exceso de velocidad. El ángulo seleccionado se alimenta al controlador del paso de la pala 355.

10 En referencia al sistema de control 200 en la fig. 6, el rotor de turbina eólica 23 (mostrado en la fig. 3) acciona mecánicamente el generador 245, un DFIG a través de una caja de engranajes (no mostrado). La energía eléctrica del generador 245 se proporciona a una red de suministro desde el estator 245a del generador 245 a todas las velocidades del generador productoras de energía, y también desde el rotor 245b (por medio de un convertidor) para velocidades del generador por encima de la velocidad síncrona que es preferente 1800 rpm, con una máquina de 4 polos para una frecuencia de la red de suministro de 60 hertzios, o 1500 rpm para una frecuencia de la red de suministro de 50 hertzios. Se pueden usar máquinas con otro número de polos y la velocidad síncrona cambiará en consecuencia.

15 El sistema de control 200 se configura usando un control escalar que mantiene una energía de salida de la turbina eólica que representa la energía en el viento sobre un intervalo de velocidad amplio hasta el punto en el que la velocidad del generador exceda su valor nominal que en un modo de realización preferente es de 1860 rpm. A velocidades del viento que accionarían la velocidad del generador por encima de 1860 rpm, la referencia de energía se fija para proporcionar una energía de salida de la turbina eólica nominal y el ángulo de paso de la pala se varía para mantener la velocidad del generador sustancialmente a 1860 rpm.

20 Aunque la presente invención usa el control escalar para controlar el generador 245 y el inversor de red lateral 235 para obtener el beneficio de controlar corrientes de fase individuales, también se puede usar un control orientado al campo.

25 La salida del estator 245a y el inversor de red lateral 235 se combinan corriente abajo del transformador 260 mostrado en la fig. 6. Como se destaca, el uso del compensador estático de potencia reactiva 115 para proporcionar las necesidades de energía reactiva permite que el generador 245 funcione a una energía real máxima y no se vea limitado por los efectos de calentamiento del rotor o del estator que pueden estar presentes cuando se produce o se absorbe energía reactiva. En un modo de realización alternativo, se usa un dispositivo STATCOM para el soporte de energía reactiva del parque y la red de suministro.

30 Aunque las salidas de energía real del estator 245a y del rotor 245b (por medio del inversor de red lateral 235) se controlen por separado, ambas actúan como fuentes de corriente constante o controlada de corriente real. Esto es, sus corrientes de salida son funciones escaladas de un valor de referencia que es una función de energía en el viento y no están influenciadas significativamente por la carga. Por lo tanto, si por ejemplo, el estator 245a de la turbina eólica estaba suministrando 1000 amperios AC a la red antes de una falla, se suministrarían 1000 amperios a la red durante la falla aun cuando el voltaje de red esté cambiando. Asimismo, si las condiciones del viento fueran tales que una corriente de salida antes de la falla era de 500 amperios, entonces se suministrarían 500 amperios por el estator 245 durante la falla.

35 Tanto el estator 245a como el inversor de red lateral 235 actúan como fuentes de corriente constante o controlada de corriente real en virtud de la realimentación de corriente, como será evidente para un experto en la técnica a partir del análisis de la configuración del sistema de control 200 dado a continuación.

40 La referencia de energía (punto de referencia) del interruptor 330 es la entrada de referencia al sistema de control 200 y define la energía real que se va a emitir desde el sistema de control 200. No están presentes comandos de entrada de energía reactiva en un modo de realización preferente del sistema de control 200 puesto que toda la energía reactiva para o desde el parque eólico 100 viene del compensador estático de potencia reactiva 115 de la fig. 4 o de otras fuentes distintas a una turbina eólica.

45 La señal de referencia de energía se alimenta al muestreo y retención (S/H) 215 donde la señal pasa a través sin cambiar, o bajo comando desde el detector de falla de voltaje bajo 265, mantiene su salida fija de modo que el último valor antes de la falla se emite durante un intervalo de falla. La salida de S/H 215 se alimenta al convertidor de energía a corriente (P/I) 223 en el controlador del inversor de rotor 220 y después al procesador de corriente del rotor 222 donde se usa para formar una magnitud de las tres corrientes del rotor. En modos de realización alternativos, sólo se usan dos de las tres corrientes del rotor, puesto que, en un sistema de tres fases sin neutra, la tercera corriente lineal y por tanto la tercera corriente de rotor se deriva de inmediato de las otras dos.

55 El control de realimentación de las corrientes del rotor se lleva a cabo comparando las corrientes de rotor deseadas (referencias de corrientes de rotor) con las corrientes de rotor reales. En la presente invención, las referencias de corrientes de rotor AC se forman teniendo cada una una magnitud igual al valor establecido desde el convertidor de energía a corriente (P/I) 223 y a un ángulo que represente una forma de onda de corriente que gire en el espacio a

una velocidad del rotor más velocidad de deslizamiento y un ángulo de desplazamiento fijo con relación al voltaje de red. Este último ángulo representa un ángulo de factor de energía que en el modo de realización preferente será cero.

Las referencias de corriente del rotor se comparan con las muestras de corriente del rotor de realimentación y cualquier diferencia se alimenta a PWM 224. La salida de PWM 224 se alimenta al inversor lateral del rotor 225 donde las corrientes de rotor reales se forman y se alimentan al rotor 245b. El efecto neto del control así descrito es que las corrientes del rotor tendrán una magnitud que es sustancialmente proporcional a la energía en el viento y sustancialmente independiente de las características del rotor. Además, puesto que los bobinados del estator 245a para DFIG 245 "parecen" el secundario de un transformador con un rotor 245b como su primario, la salida del estator 245a se "parecerá" a una fuente de corriente controlada y la energía de salida del estator 245a será el valor de corriente controlada por un valor de voltaje variable y tendrá un componente de energía reactiva sustancialmente igual a cero.

En un modo de realización alternativo, la segunda entrada del inversor del rotor 225 se deriva de un detector de error (similar al detector de error 215) que compara una salida de energía deseada y real y alimenta la diferencia al controlador del inversor de rotor 220 donde el error resultante se amplifica y se convierte en señales que controlan el inversor lateral del rotor 225. De este modo, tanto la energía real como la reactiva se pueden controlar durante el funcionamiento normal, pero la referencia de energía reactiva se pueden ajustar a cero o a algún otro valor durante condiciones de falla de voltaje bajo.

Cuando el generador 245 está girando sobre velocidad síncrona, la energía de frecuencia variable está disponible en el rotor 245b del generador 245, se rectifica en el inversor lateral del rotor 225 y carga capacitores en el enlace DC 230 donde se reduce la ondulación y la energía está disponible para oscilaciones a corto plazo. La energía disponible del rotor 245b se transfiere a la salida del inversor de red lateral 235 a través del funcionamiento de un sistema de control de realimentación que ajusta la carga en la capacitancia en el sistema de control del enlace DC 230 que mantiene el voltaje DC en el enlace DC 230 en un valor fijo. Esto es, cualquier tendencia de incremento del voltaje del enlace DC sobre un valor preferente de 860 voltios se contrarresta por un incremento en la corriente de carga de la capacitancia.

El voltaje en la capacitancia del enlace DC 230 se compara con la referencia de enlace DC en el detector de error 240 y la salida se vuelve la entrada de referencia para el detector de error 277. Esta última señal representa la corriente deseada para mantener el voltaje DC a la capacitancia del enlace DC en su valor fijo preferente. De manera similar a la usada para controlar corrientes de rotor del generador 245, el valores de referencia basado en el error del detector de error 277 se vuelve la amplitud de tres formas de onda de referencia de corrientes que giran a la frecuencia de red y se comparan con los valores de realimentación de corriente del sentido de corriente 255 para formar un valor de corriente controlada con ningún componente de energía reactiva.

De forma importante, incluso si el inversor lateral del rotor 225 y la realimentación asociada perdieran el control durante un periodo de tiempo corto debido a una desmagnetización, el inversor de red lateral continuaría funcionando. Además, el voltaje en aumento del enlace DC 230 debido a voltajes de rotor algo se contrarrestaría por un incremento de corriente de carga impuesta por el detector de error 260. Por este funcionamiento en la presente invención, el inversor de red lateral 235 reduce los requisitos para que los elementos de disipación de energía traten con voltajes de enlace DC altos debido a una falla grave. Cuando los voltajes de rotor exceden los límites de seguridad, la protección sobre el exceso de voltaje (OVP) 229 en la fig. 6 funciona para limitar el aumento de voltaje del rotor y o evita que corrientes de rotor excesivas pasen a través de inversor lateral del rotor 225.

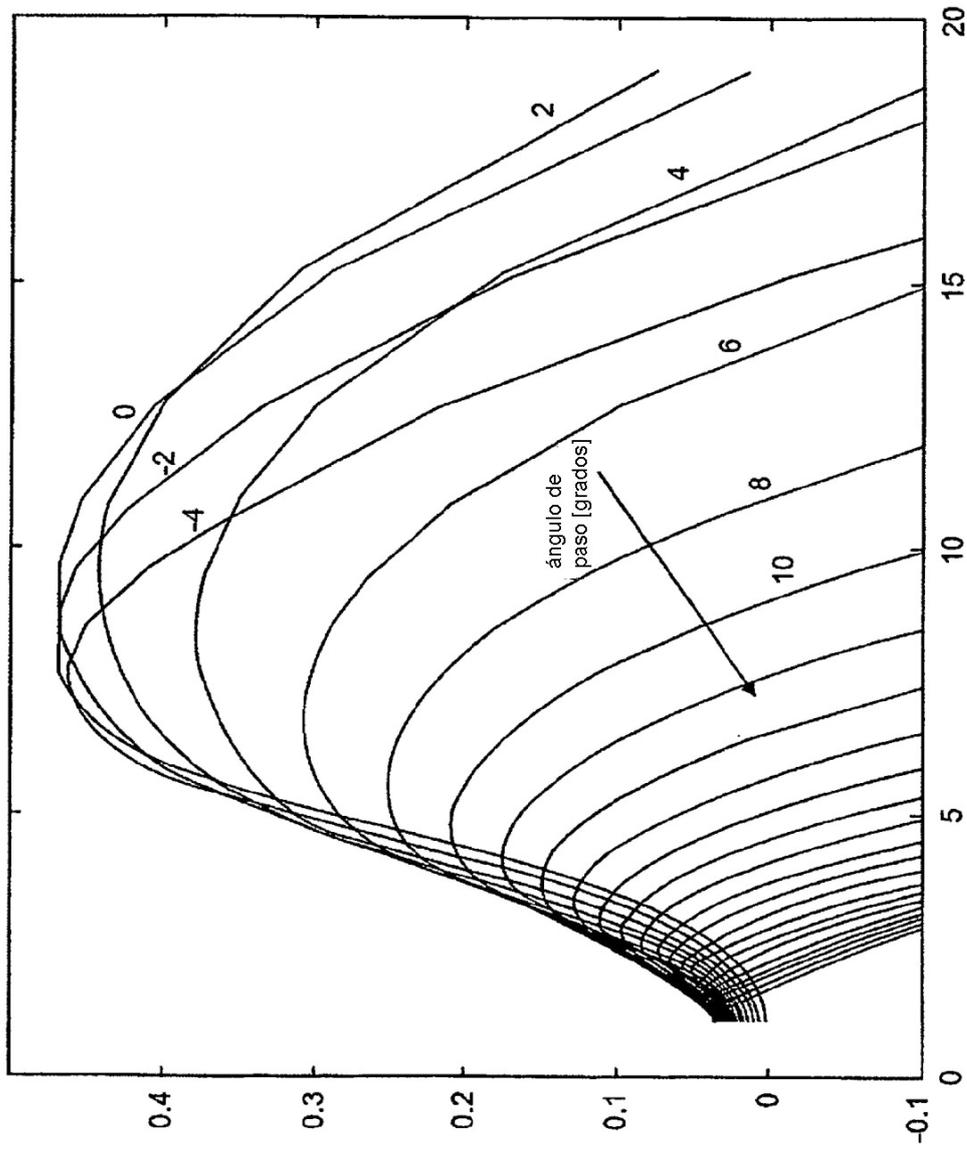
Un modo de realización preferente de la presente invención también incluye un UPS (no mostrado) para garantizar que los circuitos que se basan en el estator o red de suministro para el funcionamiento con energía tengan energía suficiente para el funcionamiento durante una falla.

Como reconocerá un experto en la técnica, la presente invención es aplicable a sistemas de turbina eólica que tienen generadores seguidos de convertidores totales donde toda la energía para la red pasa a través del convertidor total, sistemas de turbina eólica que tienen convertidores parciales donde la energía para una red se puede tomar de un estator y un rotor, y turbinas eólicas que no incluyen un inversor de red lateral para suministrar electricidad a una red.

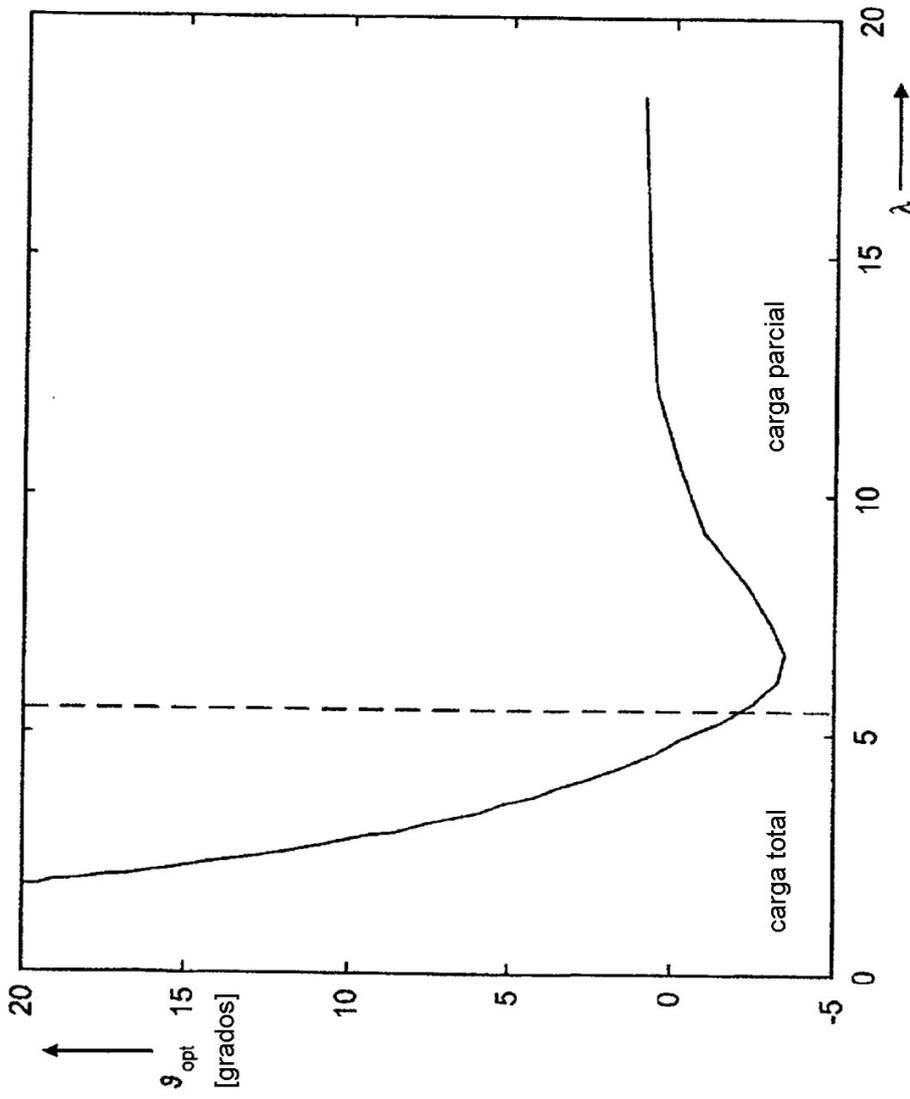
Aunque la invención se ha descrito por referencia a determinados modos de realización y turbinas eólicas de la técnica anterior, la invención no está limitada a los modos de realización descritos. A los expertos en la técnica se les pueden ocurrir modificaciones y variaciones a la vista de las enseñanzas. El alcance de la invención se define con referencia a las siguientes reivindicaciones.

**REIVINDICACIONES**

1. Generador de turbina eólica que incluye un rotor que tiene palas de paso variable conectadas de forma funcional a él, un generador AC (245) para suministrar electricidad de corriente de salida, y sensores de energía de salida y corriente de salida (267, 255) para proporcionar señales que dependen de la energía y la corriente de salida, respectivamente, comprendiendo dicho generador de turbina eólica;
- 5
- un sistema de control de realimentación de corriente para recibir una señal de corriente de salida indicativa de la corriente de salida y mantener el nivel de corriente de salida de la turbina eólica sustancialmente al mismo nivel durante una condición de voltaje bajo que su nivel durante unas condiciones normales; y
- caracterizado porque dicho generador de turbina eólica comprende además:
- 10
- un sistema de control de paso de pala para recibir señales de energía de salida indicativas de la energía de salida para variar el paso de las palas para mantener una velocidad de rotor que es sustancialmente la misma antes y durante una condición de voltaje bajo.
2. Generador de turbina eólica según la reivindicación 1, que comprende además un suministro de energía que no puede interrumpirse.
- 15
3. Procedimiento para hacer funcionar un generador de turbina eólica que incluye un rotor que tiene palas de paso variable conectadas de forma funcional a él, un generador AC (245) para suministrar electricidad de corriente de salida, y sensores de energía de salida y corriente de salida (267, 255) para proporcionar señales que dependen de la energía y la corriente de salida, respectivamente, comprendiendo dicho procedimiento las etapas de;
- 20
- recibir una señal de corriente de salida indicativa de la corriente de salida y mantener el nivel de corriente de salida de la turbina eólica sustancialmente al mismo nivel durante una condición de voltaje bajo que su nivel durante unas condiciones normales usando un sistema de control de realimentación de corriente; y
- recibir señales de energía de salida indicativas de energía de salida para variar el paso de las palas para mantener una velocidad de rotor que es sustancialmente la misma antes y durante una condición de voltaje bajo usando un sistema de control de paso de pala.
- 25
4. Procedimiento según la reivindicación 3, en el que la velocidad de rotor sustancialmente constante se consigue usando una o más tablas de consulta que relacionan el paso de la pala con la salida de energía como función de  $\lambda$ .
5. Procedimiento según la reivindicación 3, en el que se usan expresiones matemáticas para hallar los ángulos de paso de la pala.
- 30



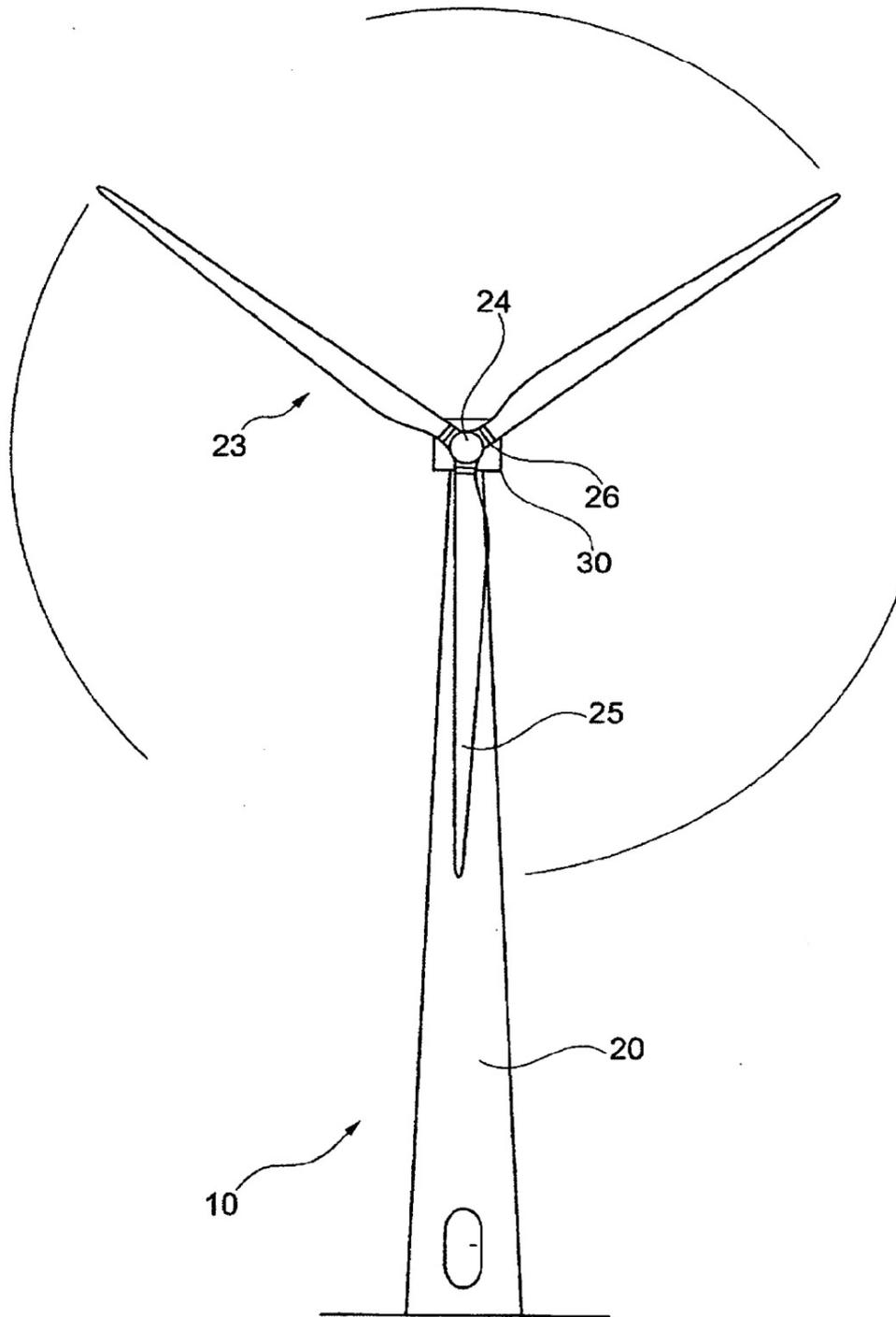
Lambda  
Fig. 1  
(técnica anterior)



Velocidad del viento

Fig. 2

(técnica anterior)



**Fig. 3**  
(técnica anterior)

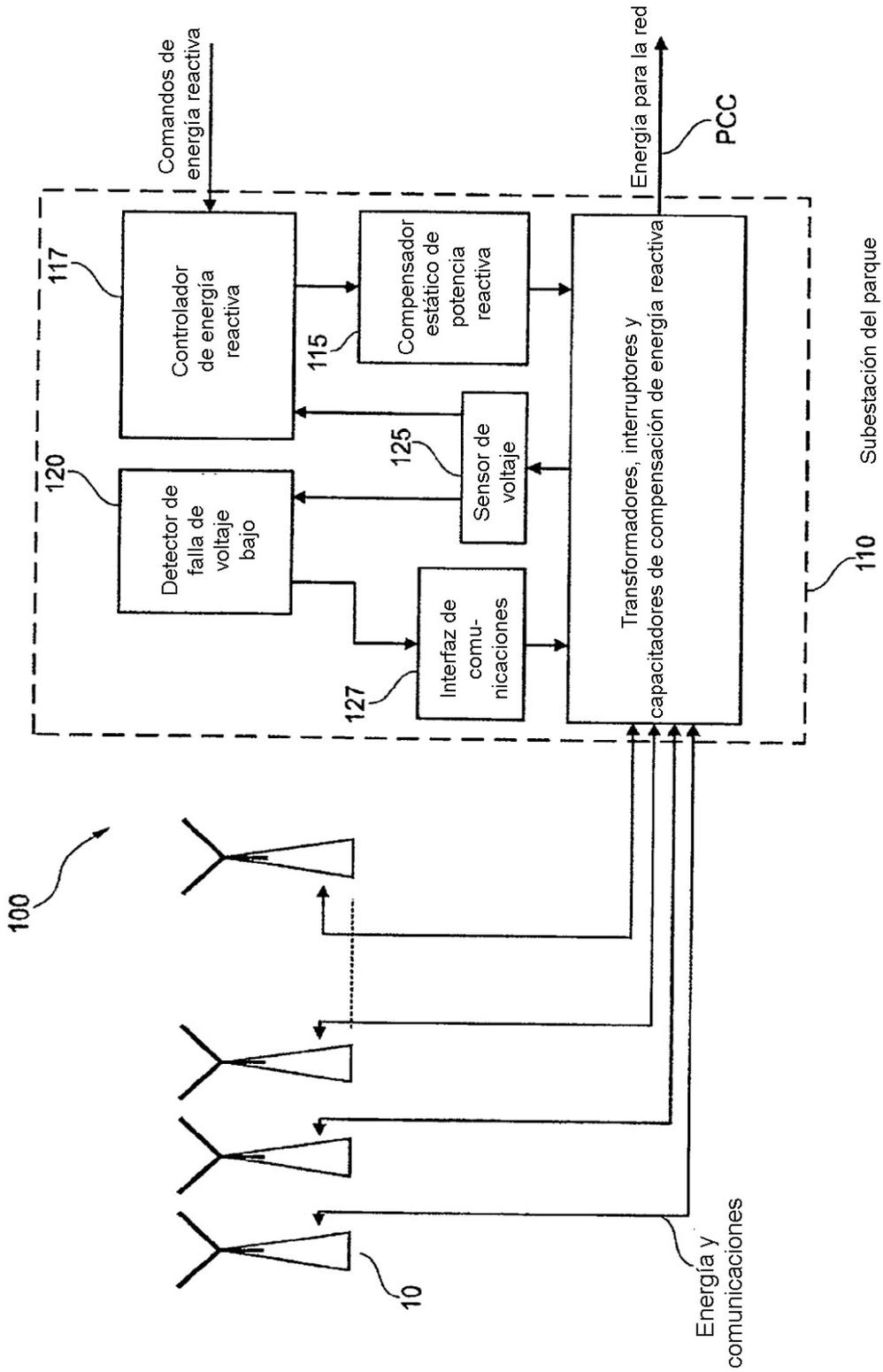
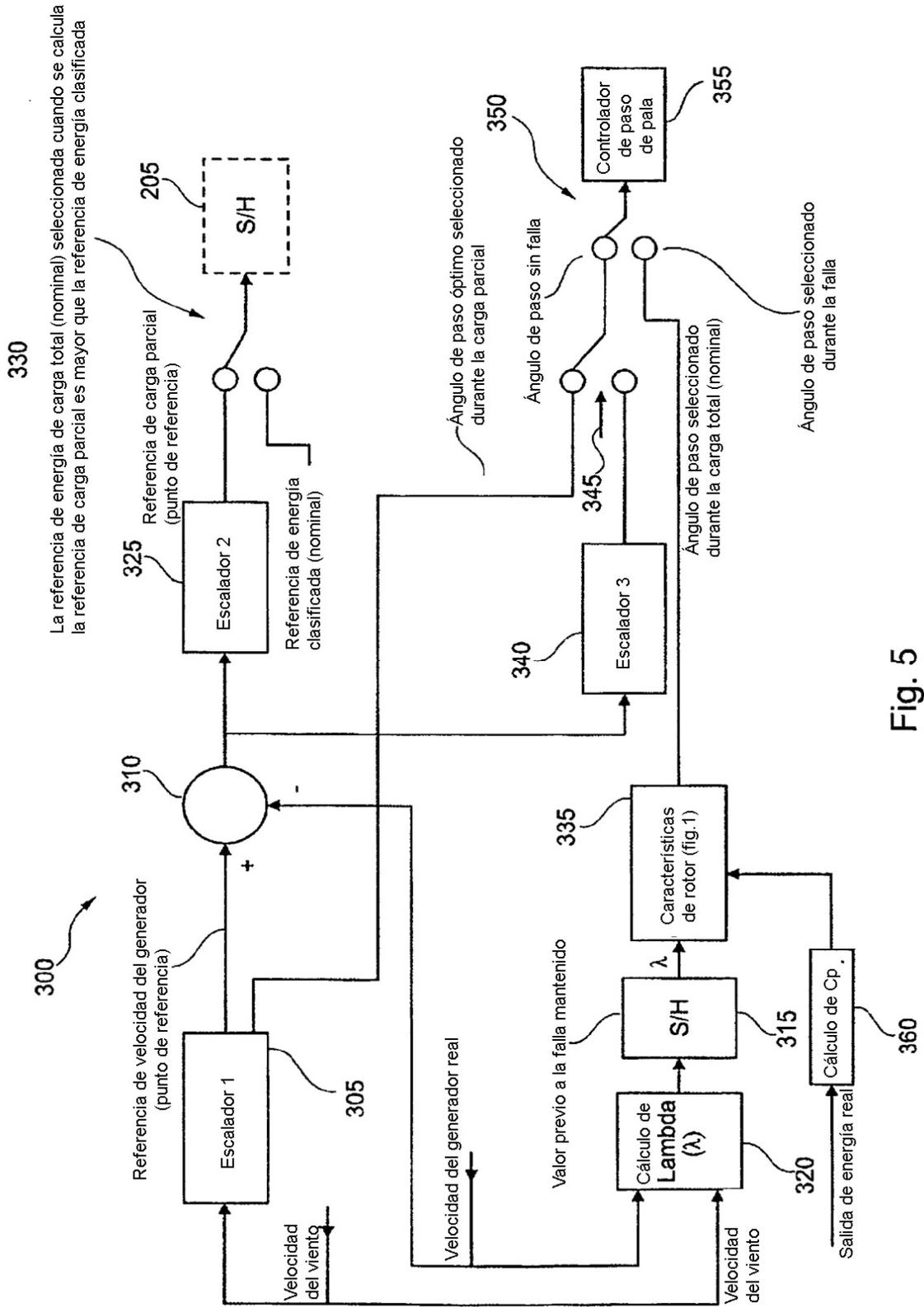


Fig. 4



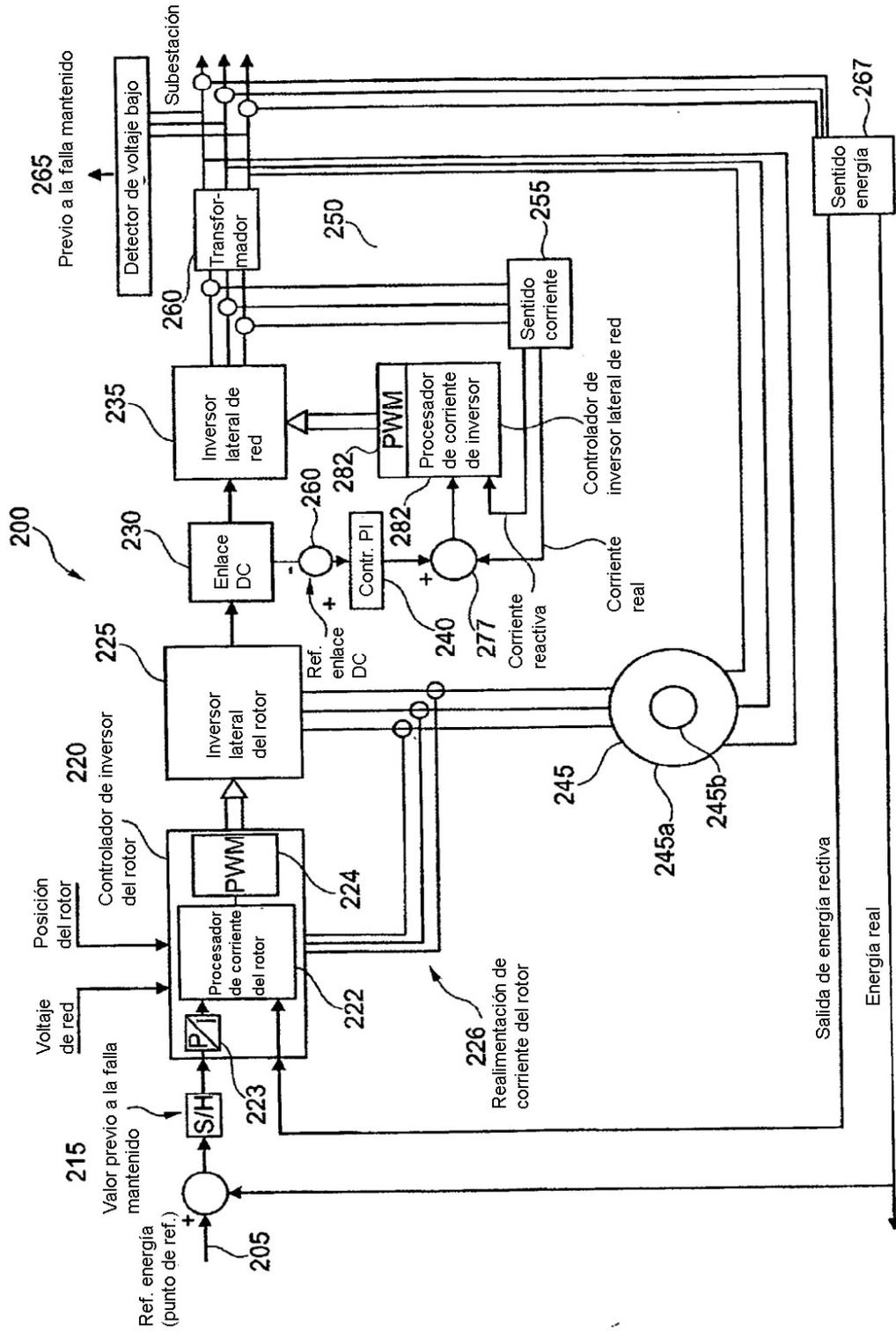


Fig. 6