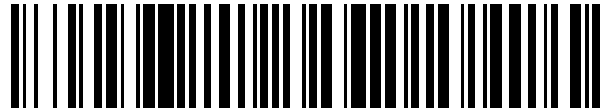


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 930 429**

51 Int. Cl.:

**H02J 3/38** (2006.01)  
**F03D 7/02** (2006.01)  
**H02J 3/50** (2006.01)  
**H02J 13/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.05.2020 E 20177165 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.08.2022 EP 3745553**

54 Título: **Sistema y procedimiento para operar un parque eólico durante bajas velocidades del viento**

30 Prioridad:

**28.05.2019 US 201916423599**

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

**12.12.2022**

73 Titular/es:

**GENERAL ELECTRIC COMPANY (100.0%)  
1 River Road  
Schenectady, NY 12345, US**

72 Inventor/es:

**VENKITANARAYANAN, VAIDHYA NATH;  
HART, PATRICK HAMMEL;  
MOOSVI, ALINA FATIMA;  
KOSUTH, CHARLES JOSEPH;  
UBBEN, ENNO y  
AKBULUT, ALEV**

74 Agente/Representante:

**DE ROOIJ , Mathieu Julien**

ES 2 930 429 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**

Sistema y procedimiento para operar un parque eólico durante bajas velocidades del viento

5 **Campo**

[0001] La presente divulgación se refiere, en general, a turbinas eólicas y, más en particular, a un sistema y procedimiento para operar un parque eólico que tiene una o más turbinas eólicas durante bajas velocidades del viento para mejorar la eficacia.

10

**Antecedentes**

[0002] En general, durante la operación de una turbina eólica, el viento impacta en las palas de rotor y las palas transforman la energía del viento en un par de torsión rotatorio mecánico que acciona un eje de baja velocidad. El eje de baja velocidad acciona una caja de engranajes que, posteriormente, aumenta la baja velocidad de rotación del eje de baja velocidad para accionar un eje de alta velocidad a una velocidad de rotación incrementada, en el que el eje de alta velocidad acciona de forma rotatoria un rotor de generador. En muchas configuraciones de turbina eólica convencionales, el generador está acoplado eléctricamente a un convertidor de potencia bidireccional que incluye un convertidor de lado de rotor (RSC) unido a un convertidor de lado de línea (LSC) por medio de un enlace de CC regulado. El LSC convierte la potencia de CC del enlace de CC en potencia de salida de CA que se combina con la potencia del estátor de generador para proporcionar potencia multifásica que tiene una frecuencia mantenida sustancialmente a la frecuencia del bus de red eléctrica (por ejemplo, 50 Hz o 60 Hz).

[0003] El sistema anterior se denomina, en general, sistema de generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), cuyos principios de operación incluyen que los devanados de rotor están conectados a la red por medio de anillos colectores y el convertidor de potencia controla la corriente y el voltaje del rotor. El control del voltaje y la corriente del rotor posibilita que el generador permanezca sincronizado con la frecuencia de red mientras varía la velocidad de la turbina eólica (por ejemplo, la frecuencia de rotor puede diferir de la frecuencia de red). Además, la fuente principal de potencia reactiva del sistema DFIG es desde el RSC por medio del generador (potencia reactiva de lado de estátor de generador) y el LSC (potencia reactiva de lado de línea de generador). El uso del convertidor de potencia, en particular del RSC, para controlar la corriente/voltaje del rotor hace posible ajustar la potencia reactiva (y la potencia real) alimentada a la red desde el RSC independientemente de la velocidad de rotación del generador. Además, el generador puede importar o exportar potencia reactiva, lo que permite que el sistema respalde a la red durante fluctuaciones de voltaje extremas en la red.

[0004] Típicamente, la cantidad de potencia reactiva que va a suministrar un parque eólico a la red durante condiciones transitorias y de estado estable se establece mediante un requisito de código dictaminado por el operario de la red, en el que un controlador de parque eólico determina la demanda de potencia reactiva establecida en cada turbina eólica dentro del parque eólico. Un controlador local en cada turbina eólica recibe y asigna la demanda de potencia reactiva entre las fuentes de generador (por ejemplo, entre la potencia reactiva de lado de generador y la potencia reactiva de lado de línea).

[0005] En general, la velocidad mínima (es decir, la velocidad de conexión) del DFIG se decide en base al límite de voltaje impuesto por el RSC (también denominado en el presente documento voltaje de rotor). Reducir o aumentar la velocidad mínima de la turbina incrementa el deslizamiento operativo del DFIG, lo que obliga al RSC a operar a un mayor voltaje. Por lo tanto, el límite superior del voltaje de rotor a menudo determina la velocidad de conexión de rotor más baja posible.

[0006] Además de la velocidad mínima de la turbina, el requisito de potencia reactiva del DFIG también afecta al voltaje en los terminales del RSC. Además, como se ha mencionado, la mayoría de los códigos de red ("grid codes") requieren un soporte de potencia reactiva nominal durante toda la operación de la turbina eólica, es decir, desde la velocidad de conexión hasta la velocidad nominal. Proporcionar la potencia reactiva nominal a la velocidad mínima de la turbina obliga aún más al RSC a operar a un mayor voltaje.

[0007] Un procedimiento para disminuir el voltaje de rotor es disminuir la cantidad de potencia reactiva sobreexcitada (o capacitiva) y, si es posible, incrementar la cantidad de potencia reactiva subexcitada (o inductiva) producida por el generador. Además, la mayoría de los códigos de red permiten que los parques eólicos produzcan una potencia reactiva inferior a la carga completa cuando las velocidades del viento se aproximan a la velocidad de conexión. Por ejemplo, el Consejo de Fiabilidad Eléctrica de Texas (ERCOT) permite, en general, una capacidad de potencia reactiva de cero cuando el parque está operando por debajo del 10 % de su potencia de salida nominal. Por el contrario, los requisitos de la Comisión Federal Reguladora de Energía (FERC) para el resto de los EE. UU. requieren capacidad de potencia reactiva solo en proporción a la potencia activa que produce el parque eólico.

[0008] El documento US 9780710B2 describe un control de potencia reactiva para generadores de turbina eólica.

65

[0009] Por lo tanto, un sistema y procedimiento mejorados para operar un sistema de potencia de turbina eólica durante bajas velocidades del viento para aprovechar la atenuación de los requisitos de potencia reactiva a bajas velocidades del viento serían bienvenidos en la técnica. En consecuencia, la presente divulgación está dirigida a un sistema y procedimiento para operar un sistema de potencia de turbina eólica durante bajas velocidades del viento, pero que también cumplen los requisitos reactivos establecidos por los códigos de red de ese nivel de potencia de salida.

#### Breve descripción

[0010] Aspectos y ventajas de la invención se expondrán, en parte, en la siguiente descripción, o pueden resultar evidentes a partir de la descripción o se pueden aprender a través de la puesta en práctica de la invención.

[0011] La invención se define por las reivindicaciones independientes. Las reivindicaciones dependientes definen otros modos de realización de la invención.

[0012] En un aspecto, la presente divulgación está dirigida a un procedimiento para operar un parque eólico conectado a una red eléctrica que requiere un requisito de potencia reactiva que varía con la potencia activa. El parque eólico tiene una pluralidad de turbinas eólicas, incluyendo cada una un generador acoplado a un convertidor de potencia. El procedimiento incluye monitorizar una velocidad del viento en cada una de la pluralidad de turbinas eólicas del parque eólico. Cuando la velocidad del viento está dentro de un intervalo de velocidad de conexión, el procedimiento incluye determinar, por medio de un controlador del parque eólico, un margen de potencia reactiva del parque eólico en base al requisito de potencia reactiva en una salida de potencia activa correspondiente a la velocidad del viento y una disponibilidad de potencia reactiva de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas a la velocidad del viento. El procedimiento también incluye determinar, por medio del controlador, la velocidad de conexión de rotor más baja posible para cada una de la pluralidad de turbinas eólicas que satisface el margen de potencia reactiva. Además, el procedimiento incluye dar instrucciones, por medio del controlador, para que cada una de la pluralidad de turbinas eólicas se conecte y comience a producir potencia a la velocidad de conexión de rotor más baja posible que satisfaga el margen de potencia reactiva.

[0013] En un modo de realización, el intervalo de velocidad de conexión puede incluir velocidades del viento de hasta aproximadamente 5 metros/segundo (m/s).

[0014] En un modo de realización, determinar el margen de potencia reactiva del parque eólico en base al requisito de potencia reactiva en la salida de potencia activa correspondiente a la velocidad del viento y la disponibilidad de potencia reactiva de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas a la velocidad del viento puede incluir determinar una diferencia entre el requisito de potencia reactiva y una suma de la disponibilidad de potencia reactiva de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas y determinar la velocidad de conexión de rotor más baja posible para cada una de la pluralidad de turbinas eólicas en base a la diferencia.

[0015] En otro modo de realización, el procedimiento puede incluir además almacenar la disponibilidad de potencia reactiva de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas a diferentes velocidades de conexión en el controlador. De forma adicional o alternativa, el procedimiento puede incluir enviar dinámicamente, por medio de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas, la disponibilidad de potencia reactiva de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas a diferentes velocidades de conexión en tiempo real al controlador.

[0016] En varios modos de realización, el procedimiento puede incluir determinar la velocidad de conexión de rotor más baja posible para cada una de la pluralidad de turbinas eólicas que satisfaga el margen de potencia reactiva en tiempo real.

[0017] En modos de realización adicionales, cuando la salida de potencia activa se ha incrementado más allá del 10 % de la potencia nominal, el procedimiento puede incluir operar cada una de la pluralidad de turbinas eólicas del parque eólico de acuerdo con su respectiva curva estándar de potencia-velocidad.

[0018] Aún en otro modo de realización, durante un periodo de entrenamiento del parque eólico, el procedimiento puede incluir operar, por medio del controlador, el parque eólico a diferentes consignas de potencia reactiva y consignas de voltaje. Además, el procedimiento puede incluir determinar, por medio del controlador, una caída de voltaje y un cambio en la potencia reactiva entre terminales de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas y un punto de interconexión del parque eólico. Además, el procedimiento puede incluir convertir, por medio del controlador, la caída de voltaje y el cambio en la potencia reactiva entre terminales de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas y el punto de interconexión del parque eólico en cantidades que se puedan comparar con un circuito equivalente de un sistema colector del parque eólico. Además, el procedimiento puede incluir adaptar, por medio del controlador, las cantidades al circuito equivalente del sistema colector del parque eólico.

[0019] En modos de realización alternativos, durante un periodo de entrenamiento del parque eólico, el procedimiento puede incluir calcular, por medio del controlador, las cantidades de una caída de voltaje y un cambio en la potencia reactiva entre terminales de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas y un punto de interconexión

del parque eólico. El procedimiento también puede incluir adaptar, por medio del controlador, las cantidades a un circuito equivalente del sistema colector del parque eólico.

5 [0020] Aún en otro modo de realización, durante un periodo de entrenamiento del parque eólico, el procedimiento puede incluir almacenar, en el controlador, cantidades de una caída de voltaje y un cambio en la potencia reactiva entre terminales de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas y un punto de interconexión del parque eólico en una tabla de consulta y adaptar, por medio del controlador, las cantidades a un circuito equivalente del sistema colector del parque eólico.

10 [0021] En modos de realización particulares, el generador puede ser un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG).

15 [0022] En otro aspecto, la presente divulgación está dirigida a un parque eólico conectado a una red eléctrica. El parque eólico incluye una pluralidad de turbinas eólicas, incluyendo cada una un generador acoplado a un convertidor de potencia y un controlador de turbina y un controlador acoplado de forma comunicativa a los controladores de turbina. El controlador está configurado para operar el parque eólico de acuerdo con los procedimientos de la presente divulgación.

20 [0023] Debería entenderse que los procedimientos y parques eólicos pueden incluir además cualquier combinación de los rasgos característicos y/o etapas adicionales como se describe en el presente documento.

25 [0024] Estos y otros rasgos característicos, aspectos y ventajas de la presente invención se entenderán mejor con referencia a la siguiente descripción y reivindicaciones adjuntas. Los dibujos adjuntos, que se incorporan a y forman parte de esta memoria descriptiva, ilustran modos de realización de la invención y, junto con la descripción, sirven para explicar los principios de la invención.

### Breve descripción de los dibujos

30 [0025] En la memoria descriptiva se expone una divulgación completa y suficiente de la presente invención, incluyendo el mejor modo de la misma, dirigida a un experto en la técnica, que hace referencia a las figuras adjuntas, en las que:

35 la FIG. 1 ilustra una vista en perspectiva de un modo de realización de una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación;

la FIG. 2 ilustra una vista esquemática de un modo de realización de un sistema de potencia eléctrica de turbina eólica adecuado para su uso con la turbina eólica mostrada en la FIG. 1;

40 la FIG. 3 ilustra un diagrama esquemático de un modo de realización de un convertidor de potencia de una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación;

la FIG. 4 ilustra una configuración de sistema de un modo de realización de un parque eólico de acuerdo con la presente divulgación;

45 la FIG. 5 ilustra un diagrama de flujo de un modo de realización de un procedimiento para operar un parque eólico conectado a una red eléctrica que requiere un requisito de potencia reactiva que varía con la salida de potencia activa de acuerdo con la presente divulgación;

50 la FIG. 6 ilustra un diagrama de flujo de un modo de realización de un procedimiento para adaptar los requisitos de potencia reactiva en el punto de interconexión del parque eólico a la disponibilidad de potencia reactiva en los terminales de turbina de acuerdo con la presente divulgación;

55 la FIG. 7 ilustra un diagrama de flujo de otro modo de realización de un procedimiento para adaptar los requisitos de potencia reactiva en el punto de interconexión del parque eólico a la disponibilidad de potencia reactiva en los terminales de turbina de acuerdo con la presente divulgación; y

60 la FIG. 8 ilustra un diagrama de flujo de otro modo de realización de un procedimiento para operar un parque eólico conectado a una red eléctrica que requiere un requisito de potencia reactiva que varía con la potencia activa de acuerdo con la presente divulgación.

### Descripción detallada

65 [0026] Se hará ahora referencia en detalle a modos de realización de la invención, uno o más ejemplos de los cuales se ilustran en los dibujos. Cada ejemplo se proporciona a modo de explicación de la invención, no de limitación de la invención. De hecho, resultará evidente para los expertos en la técnica que se pueden realizar diversas modificaciones y variaciones en la presente invención sin apartarse del alcance de la invención. Por

ejemplo, se pueden usar los rasgos característicos ilustrados o descritos como parte de un modo de realización con otro modo de realización para proporcionar todavía otro modo de realización. Por tanto, se pretende que la presente invención cubra dichas modificaciones y variaciones que entren dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas y de sus equivalentes.

5 [0027] La velocidad de conexión de rotor mínima de las turbinas eólicas se determina, en general, como la velocidad a la que la turbina eólica puede generar potencia activa al tiempo que también puede generar/absorber toda la potencia reactiva en un intervalo específico de voltaje de terminal, tal como el voltaje máximo. El requisito de generar toda la potencia reactiva sobreexcitada (o capacitiva) en el extremo superior del voltaje de terminal define el máximo para el voltaje de rotor y, por lo tanto, el mínimo para la velocidad de conexión de rotor. Esto da como resultado RPM muy altas para la conexión, lo que da como resultado coeficientes de potencia ( $C_p$ ) deficientes a bajas velocidades del viento.

10 [0028] La mayoría de los códigos de red especifican requisitos de potencia reactiva en el punto de interconexión (POI) de un parque eólico que tiene una pluralidad de turbinas eólicas. Por lo tanto, la presente divulgación está dirigida a un sistema y procedimiento que pueden predecir la potencia reactiva y las caídas de voltaje entre los terminales de turbina y el POI en tiempo real para permitir que las turbinas eólicas se conecten y permanezcan en las velocidades de rotor más bajas (por ejemplo, RPM) que permitan suficiente margen para que la potencia reactiva cumpla con el requisito en el POI para el código de red.

15 [0029] En consecuencia, la presente divulgación está dirigida a un sistema y procedimiento para operar un parque eólico conectado a una red eléctrica que requiere un requisito de potencia reactiva que varía con la potencia activa. Más específicamente, los sistemas y procedimientos de la presente divulgación incluyen determinar la velocidad de rotor (por ejemplo, en RPM) a la que las turbinas eólicas individuales se conectarán y generarán potencia activa. Las RPM de conexión serán las RPM mínimas a las que la turbina eólica, junto con todas las demás turbinas eólicas que ya estén en línea, tendrán suficiente margen de potencia reactiva inmediatamente después de la conexión para cumplir con los requisitos de potencia reactiva/voltaje en el punto de interconexión (POI) del parque eólico.

20 [0030] Después de la conexión, durante una salida de baja potencia, los sistemas y procedimientos de la presente divulgación también están configurados para garantizar que las turbinas eólicas operen a RPM suficientes para producir suficiente potencia reactiva para cumplir con los requisitos del parque eólico. La presente divulgación logra este objetivo estableciendo un límite inferior de RPM en base a la disponibilidad de potencia reactiva. Típicamente, cuando las turbinas eólicas producen más de aproximadamente el 10 % de su salida de potencia, la velocidad de rotación es naturalmente lo bastante alta como para garantizar que el voltaje de rotor ya no sea el factor limitante en la producción de potencia reactiva. Más allá de este punto, la presente divulgación puede renunciar a o inhabilitar este aspecto de su control.

25 [0031] En referencia ahora a los dibujos, la FIG. 1 ilustra una vista en perspectiva de un modo de realización de una turbina eólica 10. Como se muestra, la turbina eólica 10 incluye, en general, una torre 12 que se extiende desde una superficie de soporte 14, una góndola 16 montada en la torre 12 y un rotor 18 acoplado a la góndola 16. El rotor 18 incluye un buje rotatorio 20 y al menos una pala de rotor 22 acoplada a y que se extiende hacia fuera del buje 20. Por ejemplo, en el modo de realización ilustrado, el rotor 18 incluye tres palas de rotor 22. Sin embargo, en un modo de realización alternativo, el rotor 18 puede incluir un número mayor o menor que tres palas de rotor 22. Cada pala de rotor 22 puede estar espaciada alrededor del buje 20 para facilitar la rotación del rotor 18 para permitir que la energía cinética del viento se convierta en energía mecánica utilizable y, posteriormente, en energía eléctrica. Por ejemplo, como se describirá a continuación, el rotor 18 se puede acoplar de forma rotatoria a un generador eléctrico 120 (FIG. 2) para la producción de energía eléctrica. Una o más condiciones del viento, tal como la velocidad del viento y/o la dirección del viento, también se pueden monitorizar por medio de un sensor de viento 24, tal como un anemómetro, localizado en la góndola 16 o en cualquier otra localización adecuada cerca de la turbina eólica 10.

30 [0032] La generación de potencia eólica es proporcionada típicamente por un parque eólico que tiene un gran número (a menudo 100 o más) de turbinas eólicas 10 con generadores de turbina eólica 120 asociados (FIG. 2), en el que cada turbina eólica 10 individual experimenta típicamente una fuerza del viento única. En consecuencia, la potencia de salida para cada generador de turbina eólica 120 individual puede variar de una turbina eólica 10 a otra turbina eólica 10 dentro del parque eólico.

35 [0033] Como se entiende en general, la potencia activa y la potencia reactiva se proporcionan por cada generador de turbina eólica 120. En algunos modos de realización, un controlador a nivel de parque proporciona instrucciones de potencia reactiva ( $Q_{cmd}$ ) a los generadores de turbina eólica 120 en base a las necesidades de la red de transmisión (que pueden estar dictaminadas por el operario de red o determinadas en base al voltaje de red). La demanda de potencia reactiva puede ser idéntica para cada generador de turbina eólica. En una metodología de control alternativa, las instrucciones de potencia reactiva se pueden adaptar individualmente a los generadores de turbina eólica 120 del parque eólico en base a las diferentes características de generación de potencia de los respectivos generadores de turbina eólica 120. Se debe apreciar que la presente invención no se limita a la manera

o metodología en la que se genera la instrucción de potencia reactiva para un generador de turbina eólica 120 individual.

5 **[0034]** En referencia ahora a la FIG. 2, se ilustra un diagrama esquemático de un modo de realización de un sistema de potencia de DFIG de turbina eólica 100 ("sistema de turbina eólica") de acuerdo con aspectos de la presente divulgación. Aunque la presente divulgación se describirá, en general, en el presente documento con referencia al sistema 100 mostrado en la FIG. 2, los expertos en la técnica que usen las divulgaciones proporcionadas en el presente documento deben entender que los aspectos de la presente divulgación también se pueden aplicar a otros sistemas de generación de potencia y, como se mencionó anteriormente, que la invención no se limita a sistemas de turbina eólica.

10 **[0035]** En el modo de realización de la FIG. 2, el rotor 18 de la turbina eólica 10 (FIG. 1) puede estar acoplado, opcionalmente, a una caja de engranajes 118 que, a su vez, está acoplada al generador 120, que puede ser un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG). Como se muestra, el DFIG 120 se puede conectar a un bus de estátor 154. Además, como se muestra, un convertidor de potencia 162 se puede conectar al DFIG 120 por medio de un bus de rotor 156 y al bus de estátor 154 por medio de un bus de lado de línea 188. Como tal, el bus de estátor 154 puede proporcionar una potencia multifásica de salida (por ejemplo, potencia trifásica) desde un estátor del DFIG 120, y el bus de rotor 156 puede proporcionar una potencia multifásica de salida (por ejemplo, potencia trifásica) desde un rotor del DFIG 120. El convertidor de potencia 162 también puede incluir un convertidor de lado de rotor (RSC) 166 y un convertidor de lado de línea (LSC) 168. El DFIG 120 está acoplado por medio del bus de rotor 156 al convertidor de lado de rotor 166. Adicionalmente, el RSC 166 está acoplado al LSC 168 por medio de un enlace de CC 136 a través del cual hay un condensador de enlace de CC 138. El LSC 168 está acoplado, a su vez, a un bus de lado de línea 188.

25 **[0036]** El RSC 166 y el LSC 168 se pueden configurar para el modo de operación normal en una disposición trifásica de modulación por ancho de pulso (PWM) usando elementos de conmutación de transistor bipolar de puerta aislada (IGBT), como se analizará con más detalle con respecto a la FIG. 3.

30 **[0037]** Además, el convertidor de potencia 162 se puede acoplar a un controlador 174 para controlar la operación del convertidor de lado de rotor 166 y del convertidor de lado de línea 168. Cabe destacar que el controlador de convertidor 174 se puede configurar como una interfaz entre el convertidor de potencia 162 y un sistema de controlador de turbina eólica local 176 y puede incluir un número cualquiera de dispositivos de control. En un modo de realización, el controlador 174 puede incluir un dispositivo de procesamiento (por ejemplo, microprocesador, microcontrolador, etc.) que ejecuta instrucciones legibles por ordenador almacenadas en un medio legible por ordenador. Las instrucciones, cuando se ejecutan por el dispositivo de procesamiento, pueden hacer que el dispositivo de procesamiento realice operaciones, incluyendo proporcionar instrucciones de control (por ejemplo, instrucciones de frecuencia de conmutación) a los elementos de conmutación del convertidor de potencia 162.

40 **[0038]** En configuraciones típicas, también se pueden incluir diversos contactores de línea y disyuntores de circuito que incluyen, por ejemplo, un disyuntor de red 182, para aislar los diversos componentes como sea necesario para la operación normal del DFIG 120 durante la conexión a y la desconexión de una carga, tal como la red eléctrica 184. Por ejemplo, un disyuntor de circuito de sistema 178 puede acoplar el bus de sistema 160 a un transformador 180, que se puede acoplar a la red eléctrica 184 por medio del disyuntor de red 182. En modos de realización alternativos, los fusibles pueden reemplazar algunos o todos los disyuntores de circuito.

45 **[0039]** En operación, la potencia de corriente alterna generada en el DFIG 120 al rotar el rotor 18 se proporciona a la red eléctrica 184 por medio de rutas dobles definidas por el bus de estátor 154 y el bus de rotor 156. En el lado de bus de rotor 156, se proporciona potencia de corriente alterna (CA) multifásica (por ejemplo, trifásica) sinusoidal al convertidor de potencia 162. El convertidor de potencia de lado de rotor 166 convierte la potencia de CA proporcionada desde el bus de rotor 156 en potencia de corriente continua (CC) y proporciona la potencia de CC al enlace de CC 136. Como se entiende en general, los elementos de conmutación (por ejemplo, IGBT) usados en los circuitos de puente del convertidor de potencia del lado de rotor 166 se pueden modular para convertir la potencia de CA proporcionada desde el bus de rotor 156 en potencia de CC adecuada para el enlace de CC 136.

50 **[0040]** Además, el convertidor LSC 168 convierte la potencia de CC del enlace de CC 136 en potencia de salida de CA adecuada para la red eléctrica 184. En particular, los elementos de conmutación (por ejemplo, IGBT) usados en los circuitos de puente del LSC 168 se pueden modular para convertir la potencia de CC del enlace de CC 136 en potencia de CA en el bus de lado de línea 188. La potencia de CA del convertidor de potencia 162 se puede combinar con la potencia del estátor del DFIG 120 para proporcionar potencia multifásica (por ejemplo, potencia trifásica) que tiene una frecuencia mantenida sustancialmente a la frecuencia de la red eléctrica 184 (por ejemplo, 50 Hz o 60 Hz). En determinados casos, como se ha mencionado, para un sistema de potencia de turbina eólica de DFIG individual 100, la potencia reactiva puede suministrarse principalmente por el RSC 166 por medio del generador 120 y el LSC 168.

65 **[0041]** Adicionalmente, diversos disyuntores de circuito y conmutadores, tales como el disyuntor de red 182, el disyuntor de sistema 178, un conmutador de sincronización de estátor 158, un disyuntor de convertidor 186 y un

contactor de línea 172 se pueden incluir en el sistema de potencia de turbina eólica 100 para conectar o desconectar buses correspondientes, por ejemplo, cuando el flujo de corriente es excesivo y puede dañar componentes del sistema de potencia de turbina eólica 100 o por otras consideraciones operativas. También se pueden incluir componentes de protección adicionales en el sistema de potencia de turbina eólica 100.

**[0042]** Asimismo, el convertidor de potencia 162 puede recibir señales de control desde, por ejemplo, el sistema de control local 176 (también denominado en el presente documento controlador de turbina) por medio del controlador de convertidor 174. Las señales de control pueden basarse, entre otras cosas, en estados detectados o características operativas del sistema de potencia de turbina eólica 100. Típicamente, las señales de control proporcionan el control de la operación del convertidor de potencia 162. Por ejemplo, se puede usar realimentación en forma de velocidad detectada del DFIG 120 para controlar la conversión de la potencia de salida del bus de rotor 156 para mantener un suministro de potencia multifásica (por ejemplo, trifásica) apropiado y equilibrado. El controlador 174 o el sistema de control 176 también puede usar otra realimentación de otros sensores para controlar el convertidor de potencia 162, que incluye, por ejemplo, los voltajes de bus de estátor y de rotor y las realimentaciones de corriente. Usando las diversas formas de información de realimentación, se pueden generar señales de control de conmutación (por ejemplo, instrucciones de temporización de puerta para los IGBT), señales de control de sincronización de estátor y señales de disyuntor de circuito.

**[0043]** El convertidor de potencia 162 también compensa o ajusta la frecuencia de la potencia trifásica del rotor por cambios, por ejemplo, en la velocidad del viento en el buje 20 y las palas 22. Por lo tanto, las frecuencias de rotor mecánicas y eléctricas se desacoplan y la adaptación de frecuencia eléctrica de estátor y rotor se facilita de forma sustancialmente independiente de la velocidad mecánica de rotor.

**[0044]** En algunos estados, las características bidireccionales del convertidor de potencia 162 y, específicamente, las características bidireccionales del LSC 168 y el RSC 166, facilitan la realimentación de al menos parte de la potencia eléctrica generada al rotor de generador 120. Más específicamente, la potencia eléctrica puede transmitirse desde el bus de estátor 154 al bus de lado de línea 188 y, posteriormente, a través del contactor de línea 172 y hacia el convertidor de potencia 162, específicamente el LSC 168, que actúa como un rectificador y rectifica la potencia de CA trifásica sinusoidal a potencia de CC. La potencia de CC se transmite al enlace de CC 136. El condensador 138 facilita la mitigación de las variaciones de amplitud de voltaje de enlace de CC facilitando la mitigación de una ondulación de CC asociada a veces con la rectificación de CA trifásica.

**[0045]** La potencia de CC se transmite posteriormente al RSC 166, que convierte la potencia eléctrica de CC en una potencia eléctrica de CA trifásica sinusoidal ajustando voltajes, corrientes y frecuencias. Esta conversión se monitoriza y controla por medio del controlador de convertidor 174. La potencia de CA convertida se transmite desde el RSC 166 por medio del bus de rotor 156 al rotor de generador. De esta manera, el control de potencia reactiva de generador se facilita controlando la corriente y el voltaje de rotor.

**[0046]** En referencia ahora a la FIG. 3, se ilustra un diagrama esquemático detallado de un modo de realización del convertidor de potencia 162 mostrado en la FIG. 2, de acuerdo con aspectos de la presente divulgación. Como se muestra, el RSC 166 incluye una pluralidad de circuitos de puente ("bridge circuits") (por ejemplo, circuitos de puente H), estando cada fase de la entrada del bus de rotor 156 al convertidor de lado de rotor 166 acoplada a un único circuito de puente. Además, el LSC 168 también puede incluir una pluralidad de circuitos de puente. Similar al convertidor de lado de rotor 166, el convertidor de lado de línea 168 también incluye un único circuito de puente para cada fase de salida del convertidor de lado línea 168. En otros modos de realización, el convertidor de lado de línea 168, el convertidor de lado de rotor 166 o tanto el convertidor de lado de línea 168 como el convertidor de lado de rotor 166 pueden incluir circuitos de puente paralelos sin desviarse del alcance de la presente divulgación.

**[0047]** Cada circuito de puente puede incluir, en general, una pluralidad de elementos de conmutación (por ejemplo, IGBT) acoplados en serie entre sí. Por ejemplo, como se muestra en la FIG. 3, cada circuito de puente incluye un IGBT superior (por ejemplo, IGBT 212) y un IGBT inferior (por ejemplo, IGBT 214). Además, se puede acoplar un diodo en paralelo con cada uno de los IGBT. En modos de realización alternativos, se pueden usar diodos e IGBT paralelos para incrementar la corriente nominal del convertidor. Como se entiende en general, el convertidor de lado de línea 168 y el convertidor de lado de rotor 166 se pueden controlar, por ejemplo, proporcionando instrucciones de control, usando un circuito de accionamiento adecuado, a las puertas de los IGBT. Por ejemplo, el controlador de convertidor 174 puede proporcionar instrucciones de temporización de puerta adecuadas a las puertas de los IGBT de los circuitos de puente. Las instrucciones de control pueden controlar la frecuencia de conmutación de los IGBT para proporcionar una salida deseada. Se debe apreciar por los expertos en la técnica que, como alternativa a los IGBT, el convertidor de potencia 162 puede incluir cualquier otro elemento de conmutación adecuado.

**[0048]** En referencia general a la FIG. 4, se ilustra un diagrama de bloques de un parque eólico 175 que tiene múltiples sistemas de turbina eólica 100 acoplados a una red de transmisión 184 (también denominada en el presente documento red eléctrica). Por ejemplo, como se muestra, cada sistema de turbina eólica 100 puede incluir un controlador de turbina local 176 que responde a los estados del generador de turbina eólica que se está controlando. En un modo de realización, el controlador local 176 solo detecta el voltaje y la corriente de terminal

(por medio de transformadores de corriente y potencial), que son usados por el controlador local 176 para proporcionar una respuesta adecuada para hacer que el generador de turbina eólica 120 proporcione la potencia reactiva o factor de potencia y voltaje deseados.

5 **[0049]** Cada sistema de turbina eólica 100 se puede acoplar a un bus colector 183 a través de un transformador de conexión de generador 180 para proporcionar una potencia real y una potencia reactiva (etiquetadas como  $P_{wg}$  y  $Q_{wg}$ , respectivamente) al bus colector 183. Los transformadores de conexión de generador y los buses colectores son conocidos en la técnica.

10 **[0050]** El parque eólico 175 proporciona una salida de potencia real y una salida de potencia reactiva (etiquetadas como  $P_{wf}$  y  $Q_{wf}$ , respectivamente) a nivel de parque por medio de un transformador principal de parque eólico 179. Un controlador a nivel de parque 190 detecta la salida del parque eólico, así como el voltaje en un punto de acoplamiento común 181 (también denominado en el presente documento punto de interconexión) con la red 184 para proporcionar una instrucción de potencia reactiva a nivel de parque ( $Q\_Cmd$  a nivel de parque).

15 **[0051]** Se genera una instrucción de potencia reactiva local (Operador  $Q\_Cmd$ ) y se transmite a cada sistema de turbina eólica individual 100 del parque eólico 175. En un modo de realización, la demanda de potencia reactiva total ( $Q_{wf}$ ) establecida en el parque eólico 175 se puede dividir esencialmente en partes iguales entre los sistemas de turbina eólica 100 de modo que la instrucción Operador  $Q\_Cmd$  local es la misma para todos los sistemas de  
 20 turbina eólica 100. En un modo de realización alternativo, la instrucción Operador  $Q\_Cmd$  local se puede basar en un valor de potencia reactiva disponible para ese generador de turbina eólica 120. Por ejemplo, los generadores de turbina eólica individuales 120 que proporcionan relativamente más potencia real ( $P_{wg}$ ) pueden recibir instrucciones Operador  $Q\_Cmd$  individualizadas relativamente más pequeñas, y los generadores de turbina eólica individuales 120 que proporcionan relativamente menos potencia real ( $P_{wg}$ ) pueden recibir instrucciones Operador  
 25  $Q\_Cmd$  individualizadas relativamente más grandes. Esto mitiga la restricción de generadores de turbina eólica individuales 120 que están proporcionando relativamente más potencia real, incrementando por tanto la potencia real ( $P_{wf}$ ) producida por el parque eólico 175 en relación con instrucciones de potencia reactiva incrementada a nivel de parque ( $Q_{wf}$ ).

30 **[0052]** Se debe apreciar que los controladores de convertidor 174, los controladores de turbina eólica locales 176 y el controlador a nivel de parque 190 pueden corresponder cada uno a cualquier dispositivo informático adecuado y/o cualquier combinación de dispositivos informáticos. Por ejemplo, un controlador puede incluir uno o más procesadores y dispositivos de memoria asociados configurados para realizar una variedad de funciones implementadas por ordenador. Como se usa en el presente documento, el término "procesador" no solo se refiere a  
 35 circuitos integrados a los que se hace referencia en la técnica como que se incluyen en un ordenador, sino que también se refiere a un controlador, un microcontrolador, un microordenador, un controlador de lógica programable (PLC), un circuito integrado específico de la aplicación y otros circuitos programables. Adicionalmente, el/los dispositivo(s) de memoria puede(n) comprender, en general, elemento(s) de memoria, incluyendo, pero sin limitarse a, medios legibles por ordenador (por ejemplo, una memoria de acceso aleatorio (RAM)), medios no  
 40 volátiles legibles por ordenador (por ejemplo, una memoria flash), un disco flexible, una memoria de solo lectura en disco compacto (CD-ROM), un disco magnetoóptico (MOD), un disco versátil digital (DVD) y/u otros elementos de memoria adecuados. Dicho(s) dispositivo(s) de memoria se puede(n) configurar, en general, para almacenar instrucciones legibles por ordenador adecuadas que, cuando se implementan por el/los procesador(es), configuran el controlador para realizar diversas funciones, tales como las etapas divulgadas en el presente documento.

45 **[0053]** En referencia ahora a la FIG. 5, de acuerdo con aspectos de la presente divulgación, se ilustra un diagrama de flujo de un modo de realización de un procedimiento 300 para operar un parque eólico conectado a una red eléctrica que requiere un requisito de potencia reactiva que varía con la potencia activa. En general, la implementación del procedimiento 300 se describe en el presente documento usando, por ejemplo, el sistema de  
 50 potencia de turbina eólica 100 descrito anteriormente. Sin embargo, se debe apreciar que el procedimiento divulgado 300 se puede implementar usando cualquier otro sistema de generación de potencia eólica adecuado que esté configurado para suministrar potencia, incluida potencia reactiva, para aplicarla a una carga, tal como una red eléctrica. Además, aunque la FIG. 5 representa las etapas realizadas en un orden particular con fines de ilustración y análisis, los procedimientos descritos en el presente documento no se limitan a ningún orden o  
 55 disposición particular. Un experto en la técnica, usando las divulgaciones proporcionadas en el presente documento, apreciará que se pueden omitir, reorganizar, combinar y/o adaptar diversas etapas de los procedimientos de diversas maneras.

60 **[0054]** Como se muestra en (302), el procedimiento 300 incluye monitorizar una velocidad del viento en cada una de la pluralidad de turbinas eólicas del parque eólico 175. Como se muestra en (304), el procedimiento 300 incluye determinar si la velocidad del viento está dentro de un intervalo de velocidad de conexión. Más específicamente, en un modo de realización, el intervalo de velocidad de conexión puede incluir velocidades del viento de hasta aproximadamente 5 metros/segundo (m/s). En general, sin embargo, la velocidad de conexión o el  
 65 intervalo de velocidad de conexión se refiere, en general, a las velocidades del viento que permiten que la turbina eólica comience a generar potencia activa.

5 [0055] Si la velocidad del viento está dentro del intervalo de velocidad de conexión, como se muestra en (306), el procedimiento 300 incluye determinar, por ejemplo, por medio del controlador a nivel de parque 190 del parque eólico 175, un margen de potencia reactiva del parque eólico 175 en base al requisito de potencia reactiva en una salida de potencia activa correspondiente a la velocidad del viento y en base a una disponibilidad de potencia reactiva de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas a la velocidad del viento.

10 [0056] Por tanto, como se muestra en (308), el procedimiento 300 incluye determinar, por medio del controlador a nivel de parque 190, la velocidad de conexión de rotor más baja posible para cada una de la pluralidad de turbinas eólicas que satisfaga el margen de potencia reactiva. En un modo de realización, por ejemplo, el controlador a nivel de parque 190 puede determinar la velocidad de conexión de rotor más baja posible determinando una diferencia entre el requisito de potencia reactiva y una suma de la disponibilidad de potencia reactiva de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas y determinando la velocidad de conexión de rotor más baja posible para cada una de la pluralidad de turbinas eólicas en base a la diferencia. Más específicamente, en un modo de realización, el controlador a nivel de parque 190 se puede configurar para monitorizar la diferencia entre el requisito de potencia reactiva y la disponibilidad de potencia reactiva en tiempo real.

20 [0057] En otro modo de realización, el controlador a nivel de parque 190 puede almacenar la disponibilidad de potencia reactiva de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas a diferentes velocidades de conexión en el controlador a nivel de parque 190. En un modo de realización alternativo, el controlador a nivel de parque 190 puede recibir dinámicamente la disponibilidad de potencia reactiva de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas en tiempo real desde cada una de la pluralidad de turbinas eólicas.

25 [0058] En referencia todavía a la FIG. 5, como se muestra en (310), el procedimiento 300 también incluye dar instrucciones, por medio del controlador a nivel de parque, para que cada una de la pluralidad de turbinas eólicas se conecte y comience a producir potencia a la velocidad de conexión de rotor más baja posible que satisfaga el margen de potencia reactiva. En un modo de realización, el controlador a nivel de parque 190 también puede dar instrucciones a las turbinas eólicas en tiempo real para que cambien su velocidad de rotor (RPM) según sea necesario.

30 [0059] Generalmente, si la velocidad del viento continúa incrementándose después del intervalo de velocidad de conexión (y, por lo tanto, la salida de potencia activa para el parque eólico 175 se incrementa más allá del 10 % de la potencia nominal), se espera que las velocidades de rotor de las turbinas eólicas se hayan incrementado naturalmente hasta el punto donde el voltaje de rotor ya no es el límite. Por tanto, más allá de este punto, el controlador a nivel de parque 190 puede renunciar a este aspecto de control y permitir que las turbinas eólicas del parque eólico 175 sigan sus curvas estándar de potencia-velocidad.

40 [0060] En referencia ahora a la FIG. 6, de acuerdo con aspectos de la presente divulgación, se ilustra un diagrama de flujo de un modo de realización de un procedimiento 400 para adaptar los requisitos de potencia reactiva en el punto de interconexión 181 del parque eólico 175 a la disponibilidad de potencia reactiva en los terminales de turbina. El enfoque convencional para adaptar los requisitos de potencia reactiva en el punto de interconexión a la disponibilidad de potencia reactiva en los terminales de turbina sería convertir matemáticamente la disponibilidad de potencia reactiva de los terminales de turbina al punto de interconexión a través del circuito equivalente del sistema colector. Sin embargo, en la práctica es difícil adquirir el circuito equivalente del sistema colector. Por lo tanto, el procedimiento 400 de la FIG. 6 proporciona un enfoque de "entrenar y aprender" ("train and learn").

50 [0061] En general, la implementación del procedimiento 400 se describe en el presente documento usando, por ejemplo, el sistema de potencia de turbina eólica 100 descrito anteriormente. Sin embargo, se debe apreciar que el procedimiento divulgado 400 se puede implementar usando cualquier otro sistema de generación de potencia adecuado que esté configurado para suministrar potencia, incluida potencia reactiva, para aplicarla a una carga, tal como una red eléctrica. Además, aunque la FIG. 6 representa las etapas realizadas en un orden particular con fines de ilustración y análisis, los procedimientos descritos en el presente documento no se limitan a ningún orden o disposición particular. Un experto en la técnica, usando las divulgaciones proporcionadas en el presente documento, apreciará que se pueden omitir, reorganizar, combinar y/o adaptar diversas etapas de los procedimientos de diversas maneras.

60 [0062] Como se muestra en (402), durante un periodo de entrenamiento o puesta en marcha del parque eólico 175, el procedimiento 400 puede incluir operar, por medio del controlador a nivel de parque 190, el parque eólico 175 a diferentes consignas de voltaje y potencia reactiva para un intervalo bajo de velocidades del viento. Como se muestra en (404), durante la operación del parque eólico 175, el procedimiento 400 puede incluir determinar o registrar, por medio del controlador a nivel de parque 190, una caída de voltaje y un cambio (por ejemplo, una pérdida o ganancia) en la potencia reactiva entre terminales de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas y el punto de interconexión 181 del parque eólico 175.

65 [0063] Además, como se muestra en (406), el procedimiento 400 puede incluir convertir, por medio del controlador a nivel de parque 190, la caída de voltaje y el cambio en la potencia reactiva entre terminales de cada

una de la pluralidad de turbinas eólicas y el punto de interconexión 181 del parque eólico 175 en cantidades que pueden compararse con el circuito equivalente de un sistema colector del parque eólico 175 (es decir, el mismo punto en el sistema). En otras palabras, como se muestra en (408), el procedimiento 400 puede incluir adaptar, por medio del controlador a nivel de parque 190, las cantidades al circuito equivalente del sistema colector del parque eólico 175.

**[0064]** En modos de realización alternativos, el controlador a nivel de parque 190 puede programarse para calcular los parámetros del circuito equivalente del sistema colector del parque eólico 175 con una cantidad de entrenamiento relativamente limitada.

**[0065]** En un modo de realización alternativo, como se muestra en la FIG. 7, de acuerdo con aspectos de la presente divulgación, se ilustra un diagrama de flujo de otro modo de realización de un procedimiento 450 para adaptar los requisitos de potencia reactiva en el punto de interconexión 181 del parque eólico 175 a la disponibilidad de potencia reactiva en los terminales de turbina. En general, la implementación del procedimiento 450 se describe en el presente documento usando, por ejemplo, el sistema de potencia de turbina eólica 100 descrito anteriormente. Sin embargo, se debe apreciar que el procedimiento divulgado 450 se puede implementar usando cualquier otro sistema de generación de potencia adecuado que esté configurado para suministrar potencia, incluida potencia reactiva, para aplicarla a una carga, tal como una red eléctrica. Además, aunque la FIG. 7 representa las etapas realizadas en un orden particular con fines de ilustración y análisis, los procedimientos descritos en el presente documento no se limitan a ningún orden o disposición particular. Un experto en la técnica, usando las divulgaciones proporcionadas en el presente documento, apreciará que se pueden omitir, reorganizar, combinar y/o adaptar diversas etapas de los procedimientos de diversas maneras.

**[0066]** Como se muestra en (452), durante un periodo de entrenamiento o puesta en marcha del parque eólico 175, el procedimiento 450 puede incluir operar, por medio del controlador a nivel de parque 190, el parque eólico 175 a diferentes consignas de voltaje y potencia reactiva para un intervalo bajo de velocidades del viento. Como se muestra en (454), durante la operación del parque eólico 175, el procedimiento 450 puede incluir determinar o registrar, por medio del controlador a nivel de parque 190, una caída de voltaje y un cambio (por ejemplo, una pérdida o ganancia) en la potencia reactiva entre terminales de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas y el punto de interconexión 181 del parque eólico 175.

**[0067]** Además, como se muestra en (456), el controlador a nivel de parque 190 puede crear una tabla de consulta de  $\Delta V$  ( $V_{poi}-V_{term}$ ) y  $\Delta Q$  ( $Q_{poi}-Q_{term}$ ) para diferentes condiciones operativas del parque eólico 175 (por ejemplo, para un intervalo de puntos de operación P, Q y V). Además, como se muestra en (458), el controlador a nivel de parque 190 puede usar entonces la tabla de consulta de valores  $\Delta V$  y  $\Delta Q$  directamente para convertir cantidades de POI en cantidades de turbina para el punto de operación (por ejemplo, sin tener que ajustarlo a los parámetros R, X y B de un sistema colector).

**[0068]** En referencia ahora a la FIG. 8, de acuerdo con aspectos de la presente divulgación, se ilustra un diagrama de flujo de otro modo de realización de un procedimiento 500 para operar un parque eólico conectado a una red eléctrica que requiere un requisito de potencia reactiva que varía con la potencia activa. En general, la implementación del procedimiento 500 se describe en el presente documento usando, por ejemplo, el sistema de potencia de turbina eólica 100 descrito anteriormente. Sin embargo, se debe apreciar que el procedimiento divulgado 500 se puede implementar usando cualquier otro sistema de generación de potencia eólica adecuado que esté configurado para suministrar potencia, incluida potencia reactiva, para aplicarla a una carga, tal como una red eléctrica. Además, aunque la FIG. 8 representa las etapas realizadas en un orden particular con fines de ilustración y análisis, los procedimientos descritos en el presente documento no se limitan a ningún orden o disposición particular. Un experto en la técnica, usando las divulgaciones proporcionadas en el presente documento, apreciará que se pueden omitir, reorganizar, combinar y/o adaptar diversas etapas de los procedimientos de diversas maneras.

**[0069]** Como se muestra en (502), el procedimiento 500 comienza. Como se muestra en (504), el procedimiento 500 incluye monitorizar una salida de potencia activa del parque eólico 175 y comparar la salida de potencia activa con un umbral de potencia (por ejemplo,  $P_{lim}$ ). Por ejemplo, en un modo de realización, el umbral de potencia puede ser igual o inferior al 10 % de la potencia nominal, que es, en general, el umbral por encima del cual el voltaje de rotor no es limitante.

**[0070]** Como se muestra en (530) y (532), si la salida de potencia activa del parque eólico 175 está por encima del umbral de potencia, el controlador a nivel de parque 190 puede renunciar al control del algoritmo de gestión de velocidad de la presente divulgación y el algoritmo finaliza. En otras palabras, si la salida de potencia activa del parque eólico 175 está por encima del umbral de potencia, el controlador a nivel de parque 190 puede prohibir que las turbinas eólicas se conecten a la velocidad de conexión de rotor más baja posible. En dichos modos de realización, cuando la salida de potencia activa se ha incrementado más allá del umbral de potencia, el controlador a nivel de parque 190 puede incluir operar las turbinas eólicas individuales del parque eólico 175 de acuerdo con una o más curvas de potencia estándar.

**[0071]** Sin embargo, cuando la salida de potencia activa es igual o inferior al umbral de potencia, como se muestra en (506), el procedimiento 500 incluye calcular un requisito de potencia reactiva Q del parque eólico 175 en el punto de interconexión 181. Además, como se muestra en (508), el cálculo en (506) puede basarse en la salida de potencia activa y en una curva de potencia activa-potencia reactiva (P-Q) especificada por la red eléctrica. Como se muestra en (510), el procedimiento 500 puede incluir además calcular una disponibilidad de potencia reactiva en el punto de interconexión 181 del parque eólico 175 en base a la disponibilidad de turbina y pérdidas de BoP (balance de planta). Más específicamente, como se muestra en (512), el cálculo en (510) se puede completar usando una base de datos de disponibilidad Q de turbina para cada velocidad (RPM) (por ejemplo, la máxima disponibilidad de potencia reactiva sobreexcitada de cada turbina eólica para el intervalo de velocidades desde la velocidad de conexión mínima (rpm) hasta las rpm en las que el voltaje de rotor ya no limita la disponibilidad de potencia reactiva). De forma alternativa o adicional, como se muestra en (514), el cálculo en (510) se puede completar usando una base de datos aprendida de  $\Delta Q$  y  $\Delta V$  (es decir, una ganancia/pérdida de potencia reactiva y/o una caída de voltaje). Más específicamente, en un modo de realización, durante la puesta en marcha del parque eólico 175, el controlador a nivel de parque 190 puede recorrer un conjunto de valores Q y V a baja potencia que permite que el controlador a nivel de parque 190 aprenda a tener en cuenta la pérdida de BoP y convertir las cantidades de terminal de turbina en cantidades de POI.

**[0072]** En referencia todavía a la FIG. 8, como se muestra en (516), el procedimiento 500 incluye comparar la disponibilidad de potencia reactiva y el requisito de potencia reactiva para determinar si la potencia reactiva disponible es mayor que el requisito de potencia reactiva. De lo contrario, como se muestra en (518), el controlador a nivel de parque 190 puede ordenar a todas las turbinas eólicas que incrementen su velocidad en un valor de incremento (por ejemplo, en aproximadamente el 15 %) y, a continuación, el procedimiento 500 comenzará de nuevo en (504). De forma alternativa, si la potencia reactiva disponible es mayor que el requisito de potencia reactiva, como se muestra en (520), el procedimiento 500 está configurado para determinar si todas las turbinas eólicas del parque eólico 175 con una velocidad del viento por encima de un umbral de velocidad de conexión han comenzado a generar potencia. De lo contrario, como se muestra en (522), el procedimiento 500 incluye permitir que la siguiente turbina eólica (o una o más turbinas eólicas) se conecte a la velocidad de conexión más baja posible y, a continuación, comienza de nuevo en (504).

**[0073]** De forma alternativa, si todas las turbinas eólicas del parque eólico 175 con una velocidad del viento por encima del umbral de velocidad de conexión han comenzado a generar potencia, como se muestra en (524), el procedimiento 500 está configurado para determinar si un coeficiente de potencia ( $C_P$ ) de cualquiera de las turbinas eólicas mejorará con un valor de reducción (por ejemplo, de aproximadamente el 1 %) en la velocidad. Más específicamente, como se muestra en (526), el controlador a nivel de parque 190 puede determinar si el  $C_P$  de cualquiera de las turbinas eólicas mejorará con un valor de reducción en la velocidad basándose en una tabla de consulta que relaciona las velocidades de turbina con sus respectivos coeficientes de potencia.

**[0074]** Si el  $C_P$  de cualquiera de las turbinas eólicas mejora con un valor de reducción de la velocidad, como se muestra en (528), entonces el procedimiento 500 está configurado para dar instrucciones u ordenar a esas turbinas eólicas que reduzcan su velocidad (RPM) en el valor de reducción. A continuación, el procedimiento 500 comienza de nuevo en (504).

**[0075]** Esta descripción escrita usa ejemplos para divulgar la invención, incluido el mejor modo, y también para posibilitar que cualquier experto en la técnica ponga en práctica la invención, lo que incluye fabricar y usar cualquier dispositivo o sistema y realizar cualquier procedimiento incorporado. El alcance patentable de la invención se define por las reivindicaciones y puede incluir otros ejemplos concebidos por los expertos en la técnica. Se pretende que dichos otros ejemplos estén dentro del alcance de las reivindicaciones si incluyen elementos estructurales que no difieran del texto literal de las reivindicaciones.

## REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para operar un parque eólico conectado a una red eléctrica que requiere un requisito de potencia reactiva que varía con la potencia activa, teniendo el parque eólico una pluralidad de turbinas eólicas, incluyendo cada una un generador acoplado a un convertidor de potencia, comprendiendo el procedimiento:
- 5
- monitorizar (302) una velocidad del viento en cada una de la pluralidad de turbinas eólicas en el parque eólico;
- 10
- cuando la velocidad del viento está dentro de un intervalo de velocidad de conexión,
- determinar (306), por medio de un controlador del parque eólico, un margen de potencia reactiva del parque eólico en base al requisito de potencia reactiva en una salida de potencia activa correspondiente a la velocidad del viento y una disponibilidad de potencia reactiva de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas a la velocidad del viento; **caracterizado por**
- 15
- determinar (308), por medio del controlador, la velocidad de conexión de rotor más baja posible para cada una de la pluralidad de turbinas eólicas que satisface el margen de potencia reactiva; y
- 20
- dar instrucciones (310), por medio del controlador, para que cada una de la pluralidad de turbinas eólicas se conecte y comience a producir potencia a la velocidad de conexión de rotor más baja posible que satisfaga el margen de potencia reactiva;
- 25
- en el que el intervalo de velocidad de conexión se refiere a las velocidades del viento que permiten que la turbina eólica comience a generar potencia activa.
2. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que determinar, por medio del controlador del parque eólico, el margen de potencia reactiva del parque eólico en base al requisito de potencia reactiva en la salida de potencia activa correspondiente a la velocidad del viento y la disponibilidad de potencia reactiva de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas a la velocidad del viento comprende además:
- 30
- determinar una diferencia entre el requisito de potencia reactiva y una suma de la disponibilidad de potencia reactiva de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas; y
- 35
- determinar la velocidad de conexión de rotor más baja posible para cada una de la pluralidad de turbinas eólicas en base a la diferencia; y
- 40
- almacenar la disponibilidad de potencia reactiva de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas a diferentes velocidades de conexión en el controlador.
3. El procedimiento de cualquier reivindicación precedente, que comprende además enviar dinámicamente, por medio de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas, la disponibilidad de potencia reactiva de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas a diferentes velocidades de conexión en tiempo real al controlador.
- 45
4. El procedimiento de cualquier reivindicación precedente, que comprende además determinar la velocidad de conexión de rotor más baja posible para cada una de la pluralidad de turbinas eólicas que satisfaga el margen de potencia reactiva en tiempo real.
- 50
5. El procedimiento de cualquier reivindicación precedente, en el que, cuando el valor de potencia activa se ha incrementado más allá del 10 % de la potencia nominal, el procedimiento comprende además operar cada una de la pluralidad de turbinas eólicas del parque eólico de acuerdo con su respectiva curva estándar de potencia-velocidad.
- 55
6. El procedimiento de cualquier reivindicación precedente, que comprende además:
- durante un periodo de entrenamiento del parque eólico,
- operar, por medio del controlador, el parque eólico a diferentes consignas de potencia reactiva y consignas de voltaje;
- 60
- determinar, por medio del controlador, una caída de voltaje y un cambio en la potencia reactiva entre terminales de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas y un punto de interconexión del parque eólico;
- 65

convertir, por medio del controlador, la caída de voltaje y el cambio en la potencia reactiva entre terminales de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas y el punto de interconexión del parque eólico en cantidades que se puedan comparar con un circuito equivalente de un sistema colector del parque eólico; y

5

adaptar, por medio del controlador, las cantidades al circuito equivalente del sistema colector del parque eólico.

7. El procedimiento de cualquier reivindicación precedente, que comprende además:

10

durante un periodo de entrenamiento del parque eólico,

calcular, por medio del controlador, cantidades de una caída de voltaje y un cambio en la potencia reactiva entre terminales de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas y un punto de interconexión del parque eólico; y

15

almacenar, en el controlador, cantidades de una caída de voltaje y un cambio en la potencia reactiva entre terminales de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas y un punto de interconexión del parque eólico en una tabla de consulta; y

20

adaptar, por medio del controlador, las cantidades a un circuito equivalente del sistema colector del parque eólico.

8. Un parque eólico conectado a una red eléctrica, comprendiendo el parque eólico:

25

una pluralidad de turbinas eólicas, incluyendo cada una un generador acoplado a un convertidor de potencia y un controlador de turbina; y

un controlador acoplado de forma comunicativa a los controladores de turbina, el controlador configurado para operar el parque eólico de acuerdo con el procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7.

30

9. El parque eólico de la reivindicación 8, en el que el controlador está configurado además para determinar si toda la pluralidad de turbinas eólicas con velocidades del viento por encima de la velocidad de conexión se han conectado y, de ser así, para determinar si un coeficiente de potencia de una cualquiera de la pluralidad de turbinas eólicas mejorará con un valor de reducción en la velocidad de rotor.

35

10. El parque eólico de las reivindicaciones 8-9, en el que, si el coeficiente de potencia de una cualquiera de la pluralidad de turbinas eólicas mejora con el valor de reducción en la velocidad de rotor, el controlador está configurado además para dar instrucciones a esas turbinas eólicas para que reduzcan su velocidad.

40

11. El parque eólico de las reivindicaciones 8-10, en el que el controlador está configurado además para determinar si toda la pluralidad de turbinas eólicas con velocidades del viento por encima de la velocidad de conexión se han conectado y, de no ser así, para permitir que al menos una turbina eólica adicional de la pluralidad de turbinas eólicas se conecte a la velocidad de conexión de rotor más baja posible.

45

12. El parque eólico de las reivindicaciones 8-11, en el que, cuando la salida de potencia activa se ha incrementado más allá de un umbral de potencia, el controlador está configurado además para operar el parque eólico de acuerdo con la respectiva curva estándar de potencia-velocidad de cada turbina eólica.

50

13. El parque eólico de las reivindicaciones 8-12, en el que el controlador está configurado además para realizar una pluralidad de operaciones que comprenden:

monitorizar una salida de potencia activa del parque eólico;

55

cuando la salida de potencia activa es igual o inferior a un umbral de potencia,

calcular un requisito de potencia reactiva del parque eólico en base a la salida de potencia activa y una curva de potencia activa-potencia reactiva (P-Q) especificada por la red eléctrica;

60

calcular una disponibilidad de potencia reactiva en un punto de interconexión del parque eólico;

comparar la disponibilidad de potencia reactiva y el requisito de potencia reactiva;

permitir que una o más de la pluralidad de turbinas eólicas del parque eólico se conecten y comiencen a producir potencia a la velocidad de conexión de rotor más baja posible cuando la disponibilidad de potencia reactiva es mayor que el requisito de potencia reactiva;

5 y en el que calcular la disponibilidad de potencia reactiva en el punto de interconexión del parque eólico comprende además almacenar una disponibilidad de potencia reactiva de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas a diferentes velocidades de conexión en el controlador y calcular la disponibilidad de potencia reactiva en el punto de interconexión del parque eólico en base a las disponibilidades de potencia reactiva almacenadas de la pluralidad de turbinas eólicas a diferentes velocidades de conexión.

10

14. El parque eólico de la reivindicación 13, en el que calcular la disponibilidad de potencia reactiva en el punto de interconexión del parque eólico comprende además enviar dinámicamente, por medio de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas, una disponibilidad de potencia reactiva de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas en tiempo real al controlador y calcular la disponibilidad de potencia reactiva en el punto de interconexión del parque eólico en base a las disponibilidades de potencia reactiva calculadas de la pluralidad de turbinas eólicas a diferentes velocidades de conexión.

15

15. El parque eólico de las reivindicaciones 8-14, en el que el controlador está configurado además para:

20

durante un periodo de entrenamiento del parque eólico,

proporcionar cantidades de una caída de voltaje y un cambio en la potencia reactiva entre terminales de cada una de la pluralidad de turbinas eólicas y un punto de interconexión del parque eólico; y

25

adaptar las cantidades a un circuito equivalente del sistema colector del parque eólico.

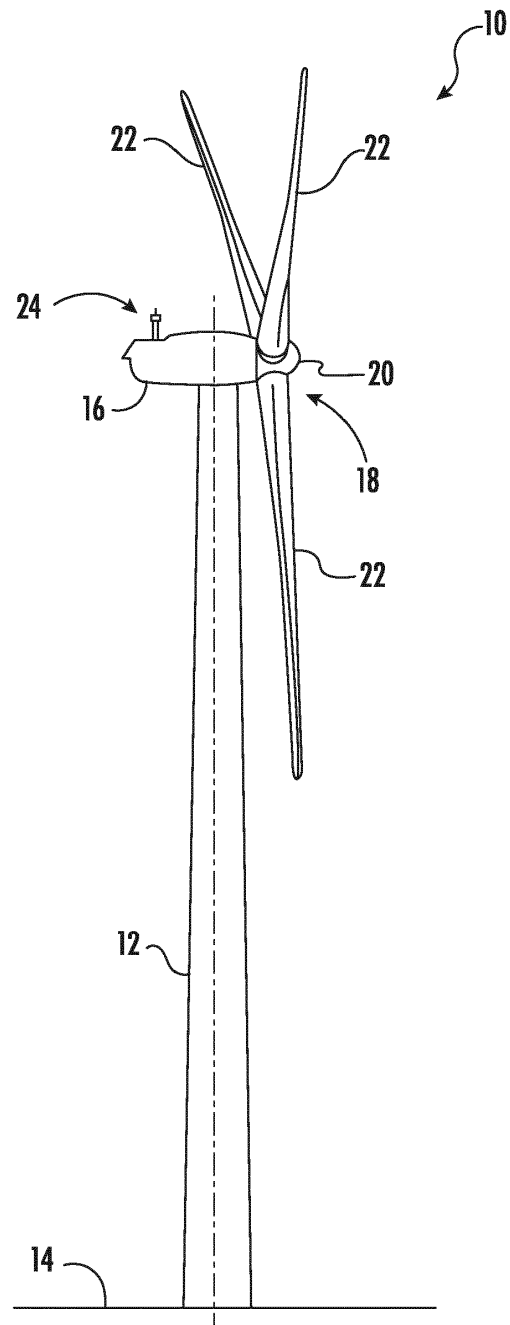


FIG. 1

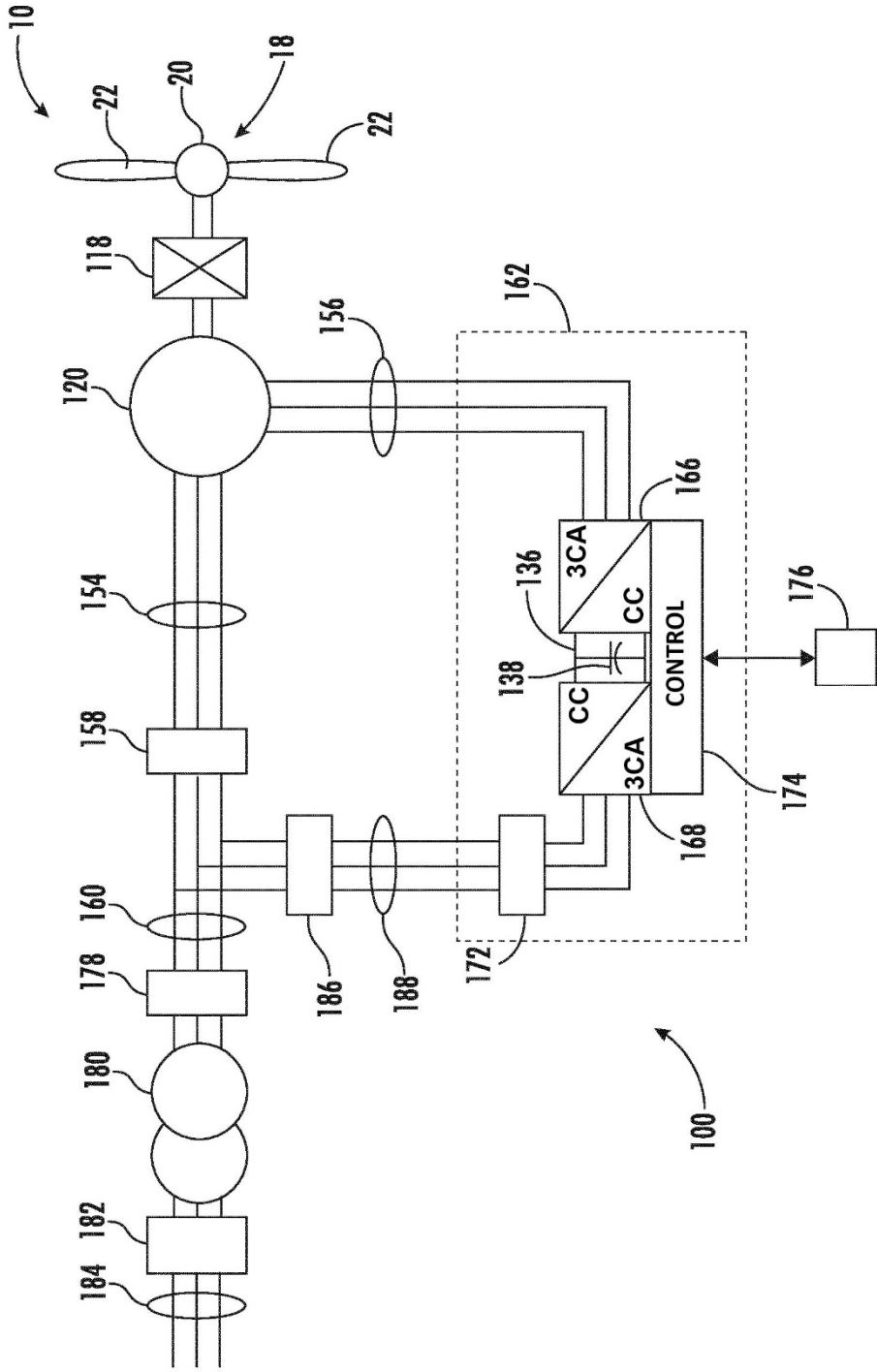


FIG. 2

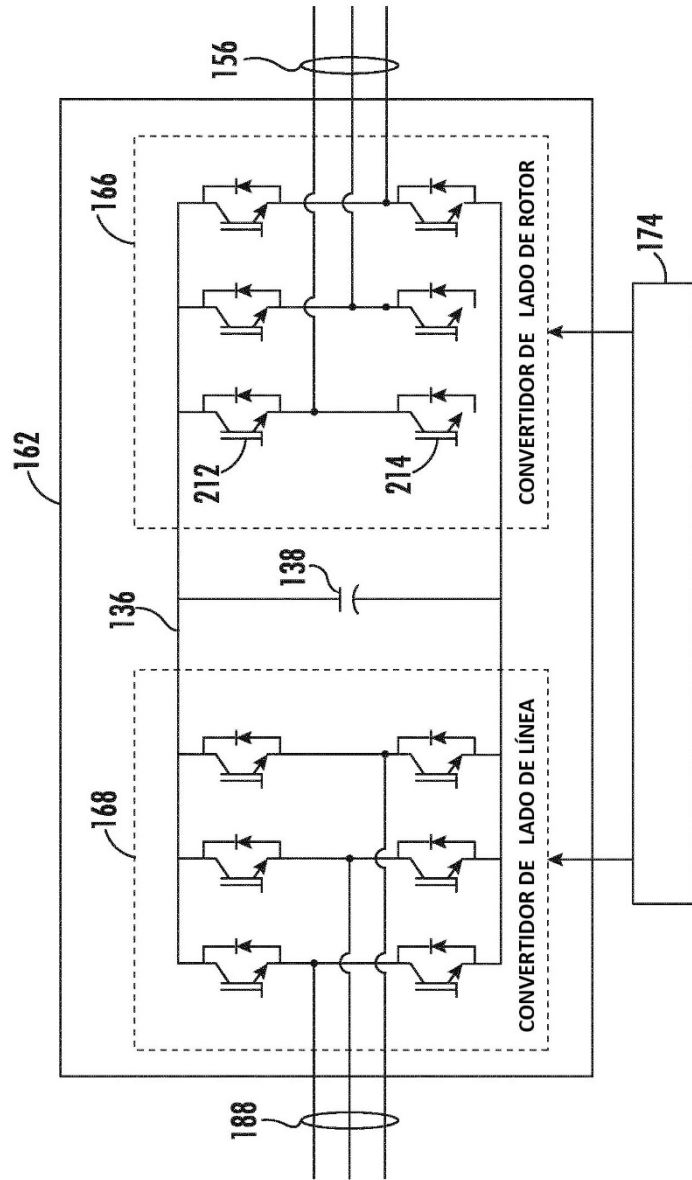


FIG. 3

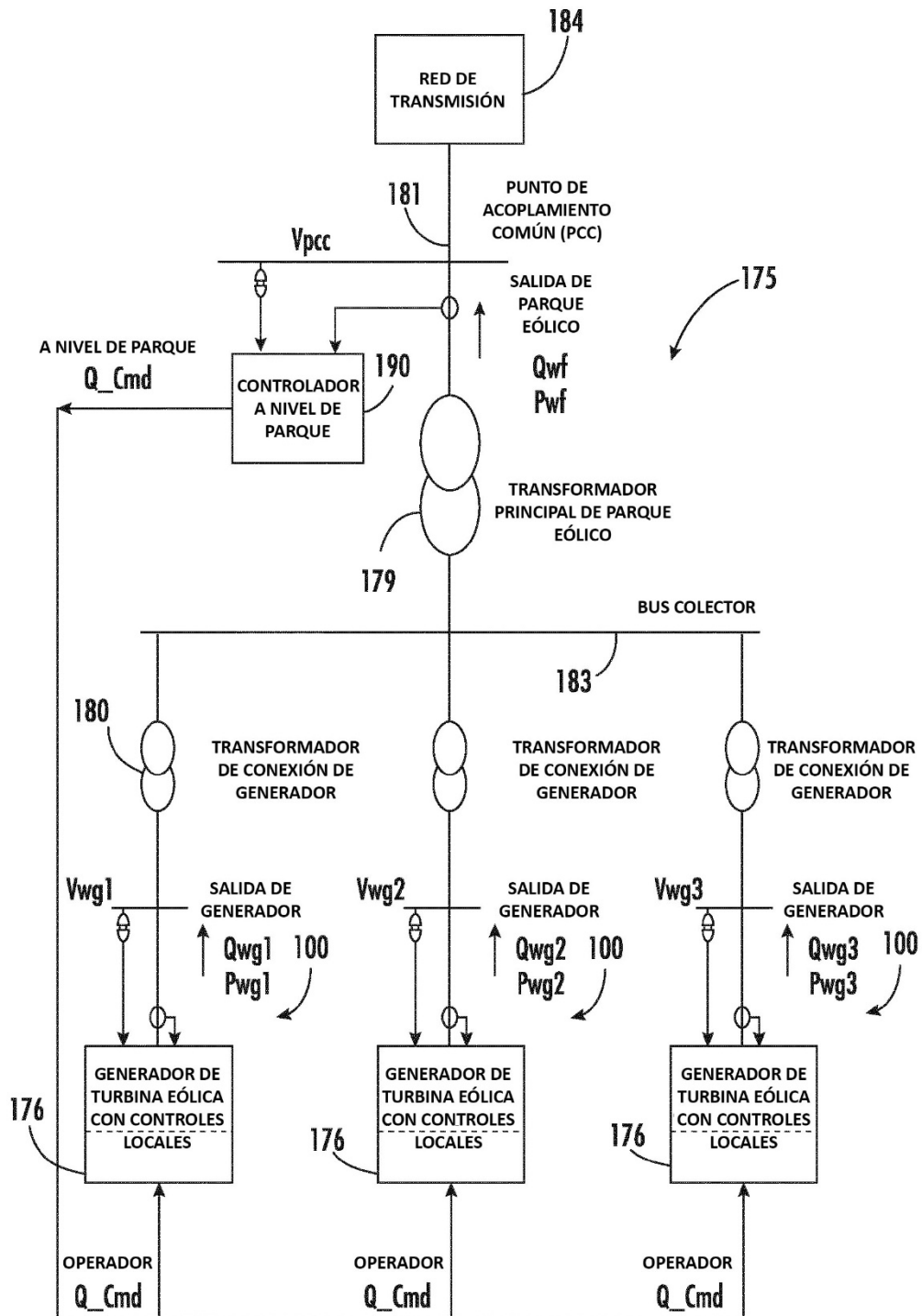


FIG. 4

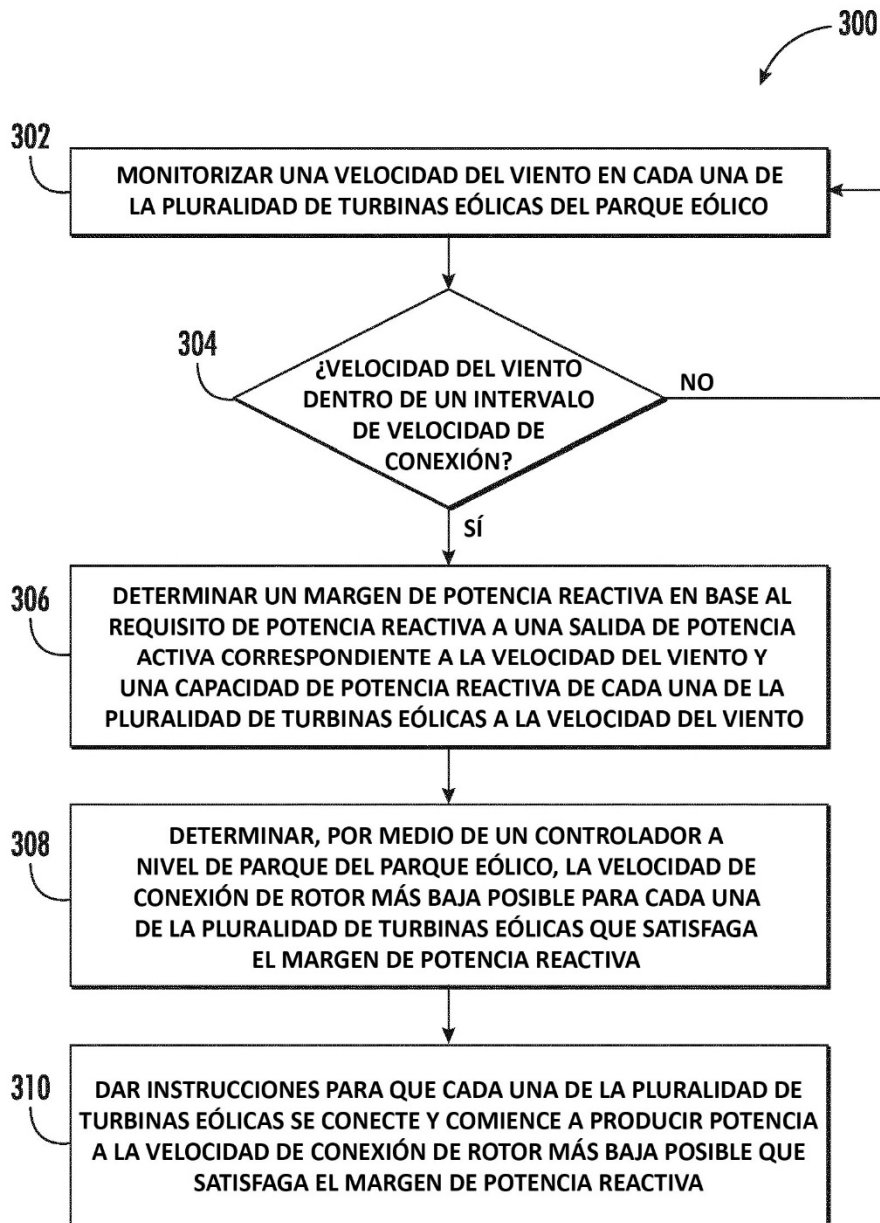


FIG. 5

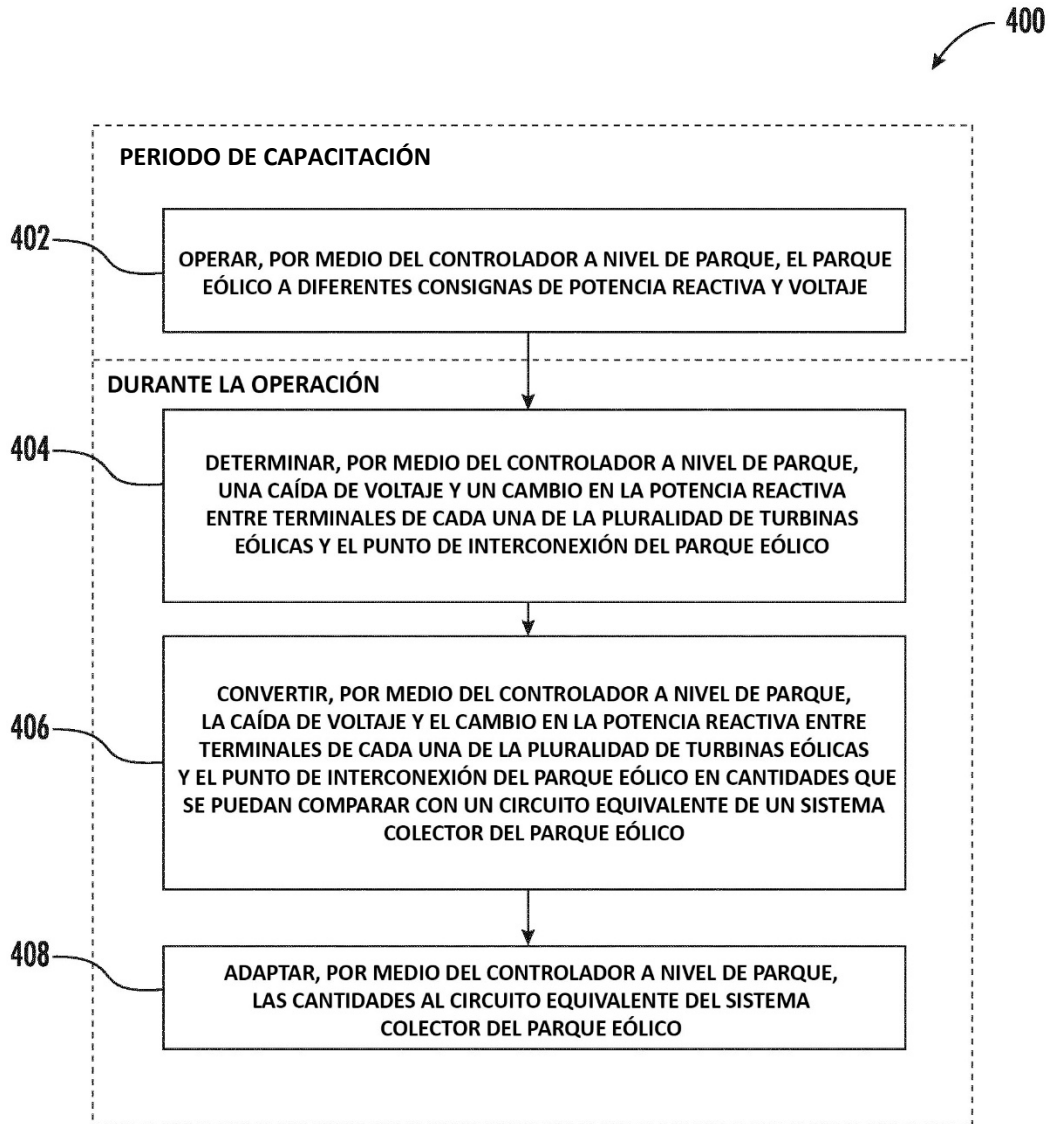


FIG. 6

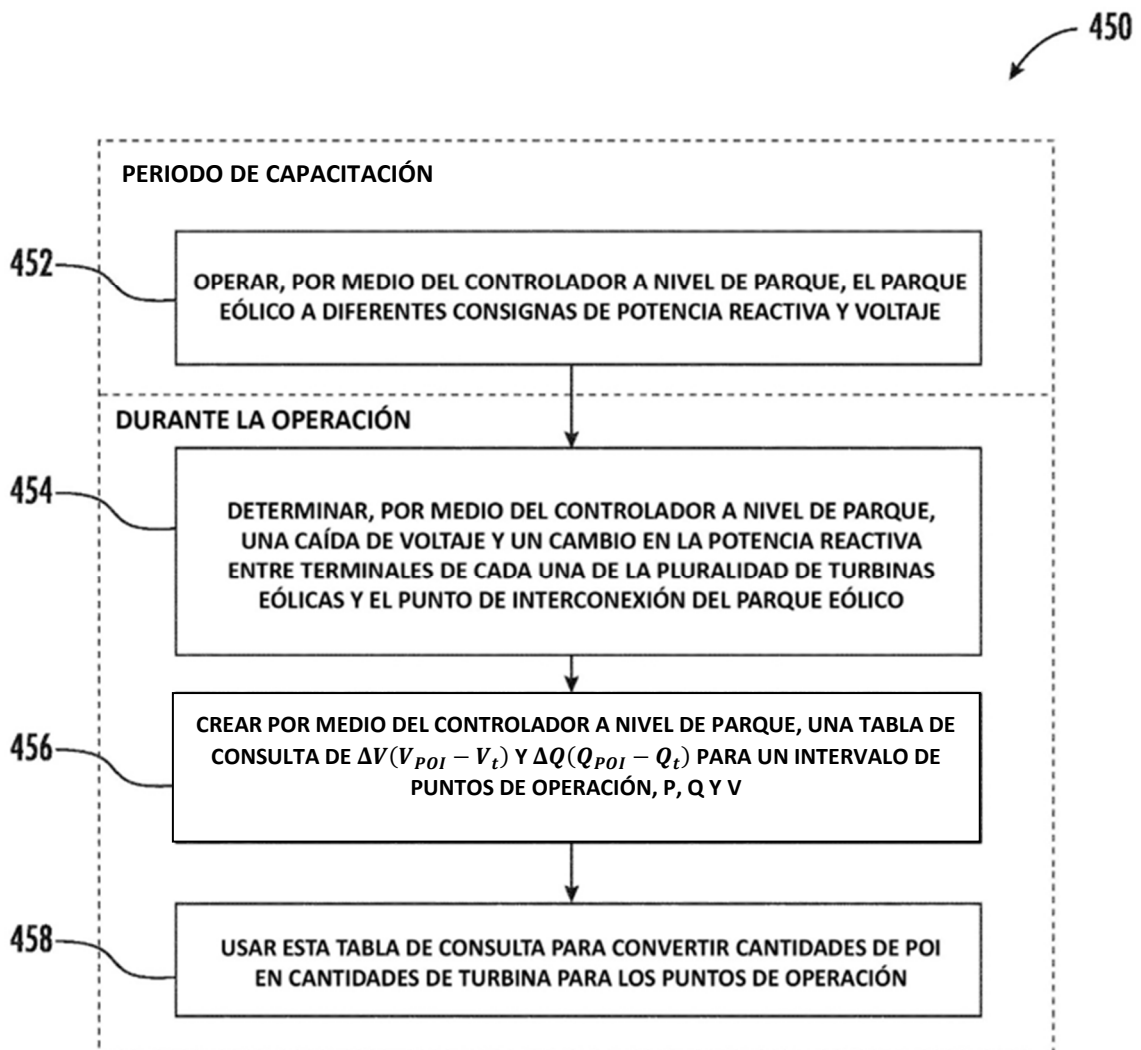


FIG. 7

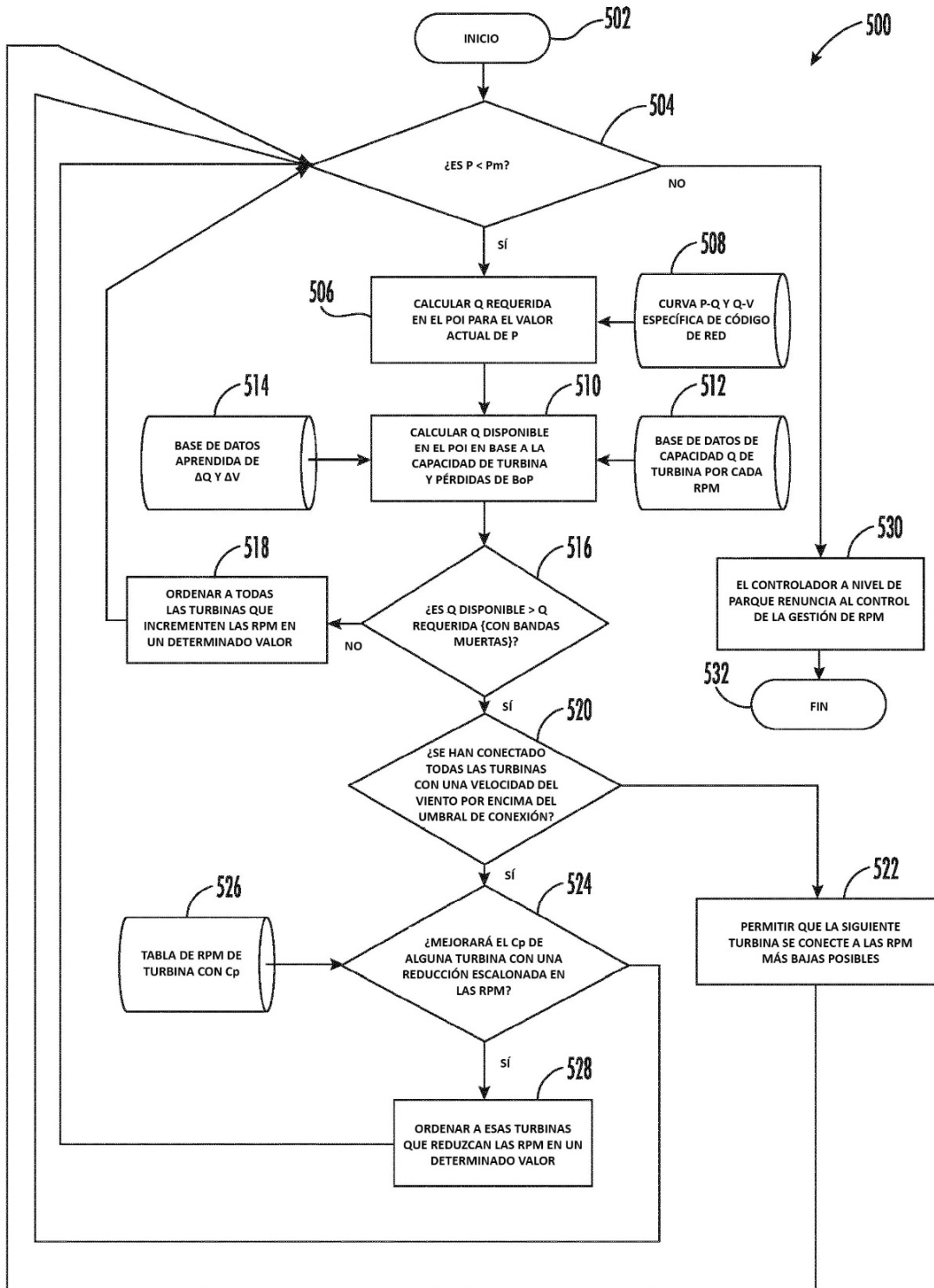


FIG. 8