

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 926 708**

51 Int. Cl.:

**H02P 9/00** (2006.01)

**H02P 9/10** (2006.01)

**H02J 3/38** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.08.2013** **E 13181279 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.06.2022** **EP 2704309**

54 Título: **Sistema y procedimiento para controlar un generador de inducción de doble alimentación en respuesta a eventos de red de alto voltaje**

30 Prioridad:

**31.08.2012 US 201213600730**

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

**27.10.2022**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**LARSEN, EINAR VAUGHN;  
KLODOWSKI, ANTHONY MICHAEL y  
BARKER, SIDNEY ALLEN**

74 Agente/Representante:

**DE ROOIJ , Mathieu Julien**

ES 2 926 708 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 controlar un generador de inducción de doble alimentación en respuesta a eventos de red de alto voltaje

**[0001]** La presente materia objeto se refiere en general a máquinas eléctricas y, más en particular, a un sistema y procedimiento para controlar un generador de inducción de doble alimentación (DFIG) en respuesta a eventos de red de alto voltaje.

**[0002]** En general, un generador de turbina eólica incluye una turbina que tiene un rotor que incluye un conjunto de buje rotatorio que tiene múltiples palas. Las palas transforman la energía eólica mecánica en un par de torsión de rotación mecánico que acciona uno o más generadores por medio del rotor. Los generadores en general, pero no siempre, están acoplados rotacionalmente al rotor a través de una caja de engranajes. La caja de engranajes multiplica la velocidad de rotación inherentemente baja del rotor para que el generador convierta eficazmente la energía mecánica de rotación en energía eléctrica, que se introduce en una red de suministro por medio de al menos una conexión eléctrica. También existen generadores de turbina eólica de accionamiento directo sin engranajes. El rotor, generador, caja de engranajes y otros componentes típicamente están montados dentro de una carcasa, o góndola, que está situada encima de una base que puede ser una torre de celosía o tubular. En algunos casos, una o más turbinas eólicas que están situadas relativamente juntas geográficamente pueden formar un parque eólico.

**[0003]** Algunas configuraciones de generadores de turbinas eólicas incluyen generadores de inducción de doble alimentación (DFIG). Véase, por ejemplo, el documento US 2006/0192390. Dichas configuraciones también pueden incluir convertidores de potencia que se usan para transmitir la potencia de excitación del generador a un rotor de generador bobinado desde una de las conexiones a la conexión de red de suministro eléctrica. Además, dichos convertidores, junto con el DFIG, también transmiten potencia eléctrica entre la red de suministro y el generador, así como también transmiten potencia de excitación del generador a un rotor de generador bobinado desde una de las conexiones a la conexión de la red de suministro eléctrica. Los DFIG se usan en turbinas eólicas para permitir el funcionamiento a velocidad variable con una potencia nominal mínima de potencia electrónica. Estas máquinas funcionan a velocidades por debajo de las sincrónicas (subsincrónicas) a baja potencia y a velocidades por encima de las sincrónicas (supersincrónicas) a alta potencia. Estas turbinas eólicas están conectadas a redes eléctricas, que a menudo funcionan en paralelo con muchas otras turbinas en el mismo sistema colector eléctrico. Las redes eléctricas pueden tener muchos tipos de perturbaciones, de las que algunas dan como resultado condiciones de alto voltaje en la red y en los sistemas eléctricos de turbinas eólicas. Estas perturbaciones pueden incluir: (1) eventos remotos que pueden hacer que el voltaje en toda la red de alto voltaje se incremente muy por encima de lo normal con una reducción gradual hasta volver a la normalidad; (2) fallos en la red local que pueden hacer que el voltaje en las turbinas eólicas disminuya, seguido de la eliminación repentina del elemento del circuito fallado. La eliminación repentina puede provocar un exceso en el voltaje en un parque eólico hasta que las turbinas eólicas reaccionan a la nueva condición de red y recuperen el control para que la turbina vuelva al funcionamiento normal en la parte de la red que permanece después de reparar ("clearing") el fallo; o (3) fallos de red local que, tras reparar, dejan la planta eólica sin conexión restante a la red, pero todavía con las turbinas eólicas conectadas a los cables y líneas de la planta eólica y posiblemente una parte de la red de transmisión. Esto se puede considerar una condición de "isla" para el parque eólico que está caracterizada por desviaciones potencialmente significativas en voltaje y frecuencia. Esta condición no se debe confundir con otros usos del término "isla", donde la intención es garantizar la seguridad del personal de mantenimiento.

**[0004]** Cada uno de los eventos descritos anteriormente posee un potencial de daño al sistema eléctrico de turbina eólica debido a los altos voltajes dentro de ese sistema que exceden la capacidad del equipo. Es deseable que la turbina eólica soporte los eventos de red, tanto de bajo voltaje como de alto voltaje, cuando la red permanece parcialmente intacta después de reparar el fallo de red. Cuando la red está en circuito abierto después de reparar el fallo, a continuación es deseable que las turbinas eólicas continúen funcionando sin daños y finalmente se apaguen en base a la incapacidad de transferir potencia. En esta última situación, normalmente no hay requisitos de tiempo para el apagado cuando la turbina es parte de un parque eólico conectado a una red de transmisión. Para aplicaciones de distribución, los códigos y reglamentos locales pueden requerir el apagado dentro de un tiempo específico, típicamente varios segundos.

**[0005]** En consecuencia, sería bienvenido en la tecnología un sistema y/o procedimiento mejorados que respondan a un evento de la red de alto voltaje en un sistema eléctrico conectado con uno o más DFIG.

**[0006]** Por lo tanto, se proporciona la presente invención, como se define por las reivindicaciones adjuntas.

**[0007]** Diversas características, 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 y constituyen una parte de esta memoria descriptiva, ilustran modos de realización de la invención y, conjuntamente con la descripción, sirven para explicar los principios de la invención.

**[0008]** En los dibujos:

la FIG. 1 es una vista esquemática de un generador de turbina eólica ejemplar;

5 la FIG. 2 es una vista esquemática de un sistema eléctrico y de control ejemplar que se puede usar con el generador de turbina eólica mostrado en la FIG. 1;

la FIG. 3A ilustra la condición de funcionamiento normal de una turbina eólica en un parque eólico;

10 la FIG. 3B ilustra las condiciones cuando un disyuntor remoto se abre dejando el parque eólico en una condición de isla y el flujo de potencia a la red se interrumpe repentinamente en un caso en que el par de torsión y la velocidad del rotor siguen siendo los mismos que antes de la condición de isla;

15 la FIG. 4 ilustra un diagrama de bloques de un modo de realización de componentes adecuados que se pueden incluir dentro de un modo de realización de un controlador, o cualquier otro dispositivo informático que recibe señales que indican un evento de red de alto voltaje de acuerdo con aspectos de la presente materia objeto;

20 la FIG. 5A es un diagrama de control de los elementos principales del control de rotor que muestra las funciones que crean consignas para la corriente de rotor;

la FIG. 5B es un diagrama de control para determinar la frecuencia y magnitud del fasor de voltaje de secuencia positiva del voltaje de red;

25 la FIG. 5C es un diagrama de control que muestra las funciones que implementan consignas para la corriente de rotor;

la FIG. 6A es un diagrama de flujo que ilustra un modo de realización de un procedimiento para controlar un generador de inducción de doble alimentación (DFIG) durante un evento de red de alto voltaje;

30 la FIG. 6B es un diagrama de flujo que ilustra otro modo de realización de un procedimiento para controlar un generador de inducción de doble alimentación (DFIG) durante un evento de red de alto voltaje; y

35 la FIG. 7 es un diagrama de flujo que ilustra un modo de realización de un procedimiento para controlar los componentes eléctricos de turbina eólica cuando se abre un disyuntor de sistema asociado con un DFIG tras la detección de una condición que requiere apagado. Antes de que se divulguen y describan los presentes procedimientos y sistemas, se debe entender que los procedimientos y sistemas no se limitan a procedimientos sintéticos específicos, componentes específicos o a composiciones particulares. También se debe entender que la terminología usada en el presente documento solo es para describir modos de realización particulares y no se pretende que sea limitante.

40 **[0009]** Como se usa en la memoria descriptiva y las reivindicaciones adjuntas, las formas en singular "un", "una" y "el/la" incluyen referentes al plural a menos que el contexto lo indique claramente de otro modo. Los intervalos se pueden expresar en el presente documento como de "aproximadamente" un valor particular y/o a "aproximadamente" otro valor particular. Cuando se expresa un intervalo de este tipo, otro modo de realización incluye de un valor particular y/o al otro valor particular. De forma similar, cuando los valores se expresan como aproximaciones, por el uso del antecedente "aproximadamente", se entenderá que el valor particular forma otro modo de realización. Se entenderá además que los puntos de extremo de cada uno de los intervalos son significativos tanto en relación con el otro punto de extremo como independientemente del otro punto de extremo.

50 **[0010]** "Opcional" u "opcionalmente" significa que el evento o circunstancia descrito posteriormente se puede producir o no, y que la descripción incluye casos donde dicho evento o circunstancia se produce y casos donde no se produce.

55 **[0011]** En toda la descripción y reivindicaciones de la presente memoria descriptiva, la palabra "comprender" y variaciones de la palabra, tales como "que comprende" y "comprende", significa "que incluye, pero sin limitarse a" y no se pretende que excluya, por ejemplo, otros aditivos, componentes, números enteros o etapas. "Ejemplar" significa "un ejemplo de" y no se pretende que transmita una indicación de un modo de realización preferente o ideal. "Tal como" no se usa en un sentido restrictivo, sino con propósitos explicativos.

60 **[0012]** Se divulgan componentes que se pueden usar para realizar los procedimientos y sistemas divulgados. Estos y otros componentes se divulgan en el presente documento, y se entiende que, cuando se divulgan combinaciones, subconjuntos, interacciones, grupos, etc. de estos componentes, aunque la referencia específica de cada una de las diversas combinaciones individuales y colectivas y la permutación de estos no se divulguen explícitamente, cada uno específicamente se contempla y describe en el presente documento, para todos los procedimientos y sistemas. Esto se aplica a todos los aspectos de la presente solicitud, incluyendo, pero sin

limitarse a, las etapas en los procedimientos divulgados. Por tanto, si existe una variedad de etapas adicionales que se puedan realizar, se entiende que cada una de estas etapas adicionales se puede realizar con cualquier modo de realización o combinación de modos de realización específica de los procedimientos divulgados.

5 **[0013]** Los presentes procedimientos y sistemas se pueden entender más fácilmente por referencia a la siguiente descripción detallada de modos de realización preferentes y los ejemplos incluidos en la misma y a las figuras y su descripción previa y siguiente.

10 **[0014]** En general, en el presente documento se describen sistemas y procedimientos para responder a un evento de red de alto voltaje en un sistema eléctrico conectado con uno o más DFIG.

15 **[0015]** La FIG. 1 es una vista esquemática de un generador de turbina eólica 100 ejemplar. La turbina eólica 100 incluye una góndola 102 que aloja un generador (no mostrado en la FIG. 1). La góndola 102 está montada en una torre 104 (estando mostrada una parte de la torre 104 en la FIG. 1). La torre 104 puede tener cualquier altura que facilite el funcionamiento de la turbina eólica 100 como se describe en el presente documento. La turbina eólica 100 también incluye un rotor 106 que incluye tres palas de rotor 108 unidas a un buje rotatorio 110. De forma alternativa, la turbina eólica 100 incluye cualquier número de palas 108 que facilitan el funcionamiento de la turbina eólica 100 como se describe en el presente documento. En el modo de realización ejemplar, la turbina eólica 100 incluye una caja de engranajes (no mostrada en la FIG. 1) acoplada rotatoriamente al rotor 106 y un generador (no mostrado en la FIG. 1).

25 **[0016]** La FIG. 2 es una vista esquemática de un sistema eléctrico y de control 200 ejemplar que se puede usar con un generador de turbina eólica 100 (mostrado en la FIG. 1). El rotor 106 incluye una pluralidad de palas de rotor 108 acoplada al buje rotatorio 110. El rotor 106 también incluye un eje de baja velocidad 112 acoplado de forma rotatoria al buje 110. El eje de baja velocidad está acoplado a una caja de engranajes 114. La caja de engranajes 114 está configurada para multiplicar la velocidad de rotación del eje de baja velocidad 112 y transferir esa velocidad a un eje de alta velocidad 116. En el modo de realización ejemplar, la caja de engranajes 114 puede tener una relación de multiplicación de aproximadamente 70:1. Por ejemplo, el eje de baja velocidad 112 que gira a aproximadamente 20 revoluciones por minuto (20) acoplado a la caja de engranajes 114 con una relación de multiplicación de aproximadamente 70:1 genera una velocidad del eje de alta velocidad 116 de aproximadamente 1400 rpm. De forma alternativa, la caja de engranajes 114 tiene cualquier relación de multiplicación que facilita el funcionamiento de la turbina eólica 100 como se describe en el presente documento. Asimismo, de forma alternativa, la turbina eólica 100 incluye un generador de accionamiento directo en el que un rotor de generador (no mostrado en la FIG. 1) está acoplado de forma rotatoria al rotor 106 sin intervención de ninguna caja de engranajes.

35 **[0017]** El eje de alta velocidad 116 está acoplado de forma rotatoria al generador 118. En el modo de realización ejemplar, el generador 118 es un generador de inducción de doble alimentación trifásico, de 60 Hz, sincrónico, de rotor bobinado (DFIG) que incluye un estátor de generador 120 acoplado magnéticamente a un rotor de generador 122. De forma alternativa, el generador 118 es cualquier generador de cualquier número de fases que facilita el funcionamiento de la turbina eólica 100 como se describe en el presente documento.

45 **[0018]** El sistema eléctrico y de control 200 incluye un controlador 202. El controlador 202 incluye al menos un procesador y una memoria, al menos un canal de entrada de procesador, al menos un canal de salida de procesador, y puede incluir al menos un ordenador (ninguno mostrado en la FIG. 2). Como se usa en el presente documento, el término ordenador no se limita solo a los circuitos integrados a los que se hace referencia en la técnica como ordenador, sino que se refiere ampliamente a un procesador, un microcontrolador, un microordenador, un controlador lógico programable (PLC), un circuito integrado específico de la aplicación, y otros circuitos programables (ninguno mostrado en la FIG. 2), y estos términos se usan de manera intercambiable en el presente documento. En el modo de realización ejemplar, memoria puede incluir, pero no se limita a, un medio legible por ordenador, tal como una memoria de acceso aleatorio (RAM) (ninguno mostrado en la FIG. 2). De forma alternativa, también se puede usar un disquete, un disco compacto - memoria de solo lectura (CD-ROM), un disco magnetoóptico (MOD) y/o un disco versátil digital (DVD) (ninguno mostrado en la FIG. 2). También, en el modo de realización ejemplar, canales de entrada adicionales (no mostrados en la FIG. 2) pueden ser, pero no se limitan a, unos periféricos de ordenador asociados a una interfaz de operador tal como un ratón y un teclado (ninguno mostrado en la FIG. 2). De forma alternativa, también se pueden usar otros periféricos de ordenador que pueden incluir, por ejemplo, pero no se limitan a, un escáner (no mostrado en la FIG. 2). Además, en el modo de realización ejemplar, canales de salida adicionales pueden incluir, pero no se limitan a, un monitor de interfaz de operador (no mostrado en la FIG. 2).

60 **[0019]** Los procesadores para el controlador 202 procesan información transmitida desde una pluralidad de dispositivos eléctricos y electrónicos que pueden incluir, pero no se limitan a, transductores de velocidad y potencia, transformadores de corriente y/o transductores de corriente, indicadores de posición de disyuntor, transformadores de potencial y/o transductores de voltaje, y similares. La RAM y el dispositivo de almacenamiento almacenan y transfieren información e instrucciones que se van a ejecutar por el procesador. También se pueden usar RAM y dispositivos de almacenamiento para almacenar y proporcionar variables temporales, información e instrucciones

estáticas (es decir, que no cambian) u otra información intermedia a los procesadores durante la ejecución de instrucciones por los procesadores. Las instrucciones que se ejecutan incluyen, pero no se limitan a, algoritmos de conversión y/o comparación residentes. La ejecución de secuencias de instrucciones no se limita a ninguna combinación específica de circuitos de hardware e instrucciones de software.

**[0020]** El sistema eléctrico y de control 200 también incluye el tacómetro de rotor de generador 204 que está acoplado en comunicación de datos electrónicos con el generador 118 y el controlador 202. El estátor de generador 120 está acoplado eléctricamente a un conmutador de sincronización de estátor 206 por medio de un bus de estátor 208. En el modo de realización ejemplar, para facilitar la configuración de DFIG, el rotor del generador 122 está acoplado eléctricamente a un conjunto de conversión de potencia bidireccional 210 por medio de un bus de rotor 212. De forma alternativa, el sistema 200 está configurado como un sistema de conversión de potencia completa (no mostrado) conocido en la técnica, en el que un conjunto de conversión de potencia completa (no mostrado) que es similar en diseño y funcionamiento al conjunto 210 está acoplado eléctricamente al estátor 120 y dicho conjunto de conversión de potencia completa facilita la canalización de potencia eléctrica entre el estátor 120 y una red de transmisión y distribución de potencia eléctrica (no mostrada). El bus del estátor 208 transmite potencia trifásica desde el estátor 120 y el bus del rotor 212 transmite potencia trifásica desde el rotor 122 al conjunto 210. El conmutador de sincronización de estátor 206 está acoplado eléctricamente a un disyuntor de circuito de transformador principal 214 por medio de un bus de sistema 216.

**[0021]** El conjunto 210 incluye un filtro de rotor 218 que está acoplado eléctricamente al rotor 122 por medio del bus de rotor 212. El filtro de rotor 218 está acoplado eléctricamente a un convertidor de potencia bidireccional de lado de rotor 220 por medio de un bus de filtro de rotor 219. El convertidor 220 está acoplado eléctricamente a un convertidor de potencia bidireccional de lado de línea 222. Los convertidores 220 y 222 son sustancialmente idénticos. El convertidor de potencia 222 está acoplado eléctricamente a un filtro de línea 224 y un contactor de línea 226 por medio de un bus de convertidor de potencia de lado de línea 223 y un bus de línea 225. En el modo de realización ejemplar, los convertidores 220 y 222 están configurados en una configuración de modulación de ancho de pulso (PWM) trifásica que incluye dispositivos de conmutación de transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) (no mostrados en la FIG. 2) que "disparan" como es conocido en la técnica. De forma alternativa, los convertidores 220 y 222 tienen cualquier configuración que use cualquier dispositivo de conmutación que facilite el funcionamiento del sistema 200 como se describe en el presente documento. El conjunto 210 está acoplado en comunicación de datos electrónicos con el controlador 202 para controlar el funcionamiento de los convertidores 220 y 222.

**[0022]** El contactor de línea 226 está acoplado eléctricamente a un disyuntor de circuito de conversión 228 por medio de un bus de disyuntor de circuito de conversión 230. El disyuntor de circuito 228 también está acoplado eléctricamente al disyuntor de circuito de sistema 214 por medio de un bus de sistema 216 y un bus de conexión 232. El disyuntor de circuito de sistema 214 está acoplado eléctricamente a un transformador principal de potencia eléctrica 234 por medio de un bus del lado del generador 236. El transformador principal 234 está acoplado eléctricamente a un disyuntor de circuito de red 238 por medio un bus de lado de disyuntor 240. El disyuntor de red 238 está conectado a una red de transmisión y distribución de potencia eléctrica por medio de un bus de red 242.

**[0023]** En el modo de realización ejemplar, los convertidores 220 y 222 están acoplados en comunicación eléctrica entre sí por medio de un único enlace de corriente continua (CC) 244. De forma alternativa, los convertidores 220 y 222 están acoplados eléctricamente por medio de enlaces de CC individuales y separados (no mostrados en la FIG. 2). El enlace de CC 244 incluye un carril positivo 246, un carril negativo 248 y al menos un condensador 250 acoplado entre ambos. De forma alternativa, el condensador 250 es uno o más condensadores configurados en serie o en paralelo entre los carriles 246 y 248.

**[0024]** El sistema 200 puede incluir además un regulador de bucle de enganche de fase (PLL) 400 que está configurado para recibir una pluralidad de señales de medición de voltaje desde una pluralidad de transductores de voltaje 252. En el modo de realización ejemplar, cada uno de los tres transductores de voltaje 252 está acoplado eléctricamente a cada una de las tres fases del bus 242. De forma alternativa, los transductores de voltaje 252 están acoplados eléctricamente al bus de sistema 216. También, de forma alternativa, los transductores de voltaje 252 están acoplados eléctricamente a cualquier parte del sistema 200 que facilite el funcionamiento del sistema 200 como se describe en el presente documento. El regulador de PLL 400 está acoplado en comunicación de datos electrónicos con el controlador 202 y los transductores de voltaje 252 por medio de una pluralidad de conductos eléctricos 254, 256 y 258. De forma alternativa, el regulador de PLL 400 está configurado para recibir cualquier número de señales de medición de voltaje desde cualquier número de transductores de voltaje 252, incluyendo, pero sin limitarse a, una señal de medición de voltaje de un transductor de voltaje 252. El controlador 202 también puede recibir cualquier cantidad de realimentaciones de corriente de los transformadores de corriente o transductores de corriente que están acoplados eléctricamente a cualquier parte del sistema 200 que facilite el funcionamiento del sistema 200 como se describe en el presente documento, tal como, por ejemplo, realimentación de corriente de estátor del bus de estátor 208, realimentación de corriente de red del bus de lado de generador 236, y similares.

**[0025]** Durante el funcionamiento, el viento impacta en las palas 108 y las palas 108 transforman la energía eólica mecánica en un par de rotación mecánico que acciona rotatoriamente el eje de baja velocidad 112 por medio del buje 110. El eje de baja velocidad 112 acciona la caja de engranajes 114 que posteriormente multiplica la baja velocidad de rotación del eje 112 para accionar el eje de alta velocidad 116 con una velocidad de rotación incrementada. El eje de alta velocidad 116 acciona rotatoriamente el rotor 122. Se induce un campo magnético de rotación dentro del rotor 122 y se induce un voltaje dentro del estátor 120 que está acoplado magnéticamente al rotor 122. El generador 118 convierte la energía mecánica rotacional en una señal de energía eléctrica de corriente alterna (CA) trifásica sinusoidal en el estátor 120. La potencia eléctrica asociada se transmite al transformador principal 234 por medio del bus 208, el conmutador 206, el bus 216, el disyuntor 214 y el bus 236. El transformador principal 234 multiplica la amplitud de voltaje de la potencia eléctrica y la potencia eléctrica transformada se transmite además a una red por medio del bus 240, el disyuntor de circuito 238 y el bus 242.

**[0026]** En la configuración de generador de inducción de doble alimentación, se proporciona una segunda ruta de transmisión de potencia eléctrica. La potencia de CA sinusoidal, trifásica, eléctrica se genera dentro del rotor bobinado 122 y se transmite al conjunto 210 por medio del bus 212. Dentro del conjunto 210, la potencia eléctrica se transmite al filtro de rotor 218, en el que la potencia eléctrica se modifica según la tasa de cambio de las señales PWM asociadas con el convertidor 220. El convertidor 220 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 244. El condensador 250 facilita la mitigación de variaciones de amplitud de voltaje del enlace de CC 244 facilitando la mitigación de una ondulación de CC asociada con la rectificación de CA.

**[0027]** La potencia de CC se transmite posteriormente desde el enlace de CC 244 al convertidor de potencia 222 en el que el convertidor 222 actúa como un inversor configurado para convertir la potencia eléctrica de CC del enlace de CC 244 en potencia eléctrica de CA sinusoidal trifásica con voltajes, corrientes y frecuencias predeterminados. Esta conversión se monitoriza y controla por medio de un controlador 202. La potencia de CA convertida se transmite desde el convertidor 222 al bus 216 por medio de los buses 227 y 225, el contactor de línea 226, el bus 230, el disyuntor 228 y el bus 232. El filtro de línea 224 compensa o ajusta las corrientes armónicas en la potencia eléctrica transmitida desde el convertidor 222. El conmutador de sincronización de estátor 206 está configurado para cerrarse de modo que se facilita la conexión de la potencia trifásica del estátor 120 con la potencia trifásica del conjunto 210.

**[0028]** Los disyuntores de circuito 228, 214 y 238 están configurados para desconectar los correspondientes buses, por ejemplo, cuando el flujo de corriente es excesivo y puede dañar los componentes del sistema 200. También se proporcionan componentes de protección adicionales, incluyendo el contactor de línea 226, que se pueden controlar para formar una desconexión abriendo un conmutador (no mostrado en la FIG. 2) correspondiente a cada una de las líneas del bus de línea 230.

**[0029]** El conjunto 210 compensa o ajusta la frecuencia de la potencia trifásica del rotor 122 para cambios, por ejemplo, en la velocidad del viento en el buje 110 y las palas 108. Por lo tanto, de esta manera, las frecuencias de rotor mecánicas y eléctricas se desacoplan y la coincidencia de frecuencias eléctricas de estátor y rotor se facilita de forma sustancialmente independiente de la velocidad de rotor mecánica.

**[0030]** En algunas condiciones, las características bidireccionales del conjunto 210, y específicamente, las características bidireccionales de los convertidores 220 y 222, facilitan la retroalimentación de al menos parte de la potencia eléctrica generada al rotor de generador 122. Más específicamente, la potencia eléctrica se transmite desde el bus 216 al bus 232 y posteriormente a través del disyuntor de circuito 228 y el bus 230 al conjunto 210. Dentro del conjunto 210, la potencia eléctrica se transmite a través del contactor de línea 226 y los buses 225 y 227 al convertidor de potencia 222. El convertidor 222 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 244. El condensador 250 facilita la mitigación de variaciones de amplitud de voltaje de enlace de CC 244 al facilitar la mitigación de una ondulación de CC asociada a veces con la rectificación de CA trifásica.

**[0031]** La potencia de CC se transmite posteriormente desde el enlace de CC 244 al convertidor de potencia 220 en el que el convertidor 220 actúa como un inversor configurado para convertir la potencia eléctrica de CC transmitida del enlace de CC 244 en una potencia eléctrica de CA sinusoidal trifásica con voltajes, corrientes y frecuencias predeterminados. Esta conversión se monitoriza y controla por medio de un controlador 202. La potencia de CA convertida se transmite desde el convertidor 220 al filtro de rotor 218 por medio del bus 219 y posteriormente se transmite al rotor 122 por medio del bus 212. De esta manera, se facilita el control de potencia de generador.

**[0032]** El conjunto 210 está configurado para recibir señales de control desde el controlador 202. Las señales de control se basan en las condiciones detectadas o características de funcionamiento de la turbina eólica 100 y el sistema 200 como se describe en el presente documento y se usan para controlar el funcionamiento del conjunto de conversión de potencia 210. Por ejemplo, la realimentación del tacómetro 204 en forma de velocidad detectada del rotor de generador 122 se puede usar para controlar la conversión de la potencia de salida del bus de rotor 212 para mantener una condición de potencia trifásica apropiada y equilibrada. También se puede usar otra

realimentación de otros sensores por el sistema 200 para controlar el conjunto 210 que incluye, por ejemplo, realimentación de voltajes y corriente del bus de rotor. Usando esta información de realimentación y, por ejemplo, señales de control de conmutación, se pueden generar de cualquier manera conocida señales de control de conmutador de sincronización de estátor y señales de control (disparo) de disyuntor de circuito de sistema.

**[0033]** El conjunto de convertidor de potencia 210 y el generador 118 pueden ser susceptibles a las fluctuaciones de voltaje de red y otras formas de fallos de red. El generador 118 puede almacenar energía magnética que se puede convertir en altas corrientes cuando un voltaje de terminal de generador disminuye rápidamente. Esas corrientes pueden mitigar la esperanza de vida de los componentes del conjunto 210 que pueden incluir, pero no limitarse a, dispositivos semiconductores tales como los IGBT dentro de los convertidores 220 y 222. De forma similar, durante un evento de isla, el generador 118 se desconecta de la red. Los componentes que componen el sistema eléctrico 200 tales como los buses 208, 216, 232, 230, 236, 240, pueden almacenar energía que se libera durante un evento de isla. Esto puede dar como resultado un sobrevoltaje en el sistema eléctrico 200 que conecta la unidad de generación 118 con la red. Un sobrevoltaje puede ser un incremento a corto plazo o de larga duración en el voltaje medido del sistema eléctrico por encima de su valor nominal. Por ejemplo, el sobrevoltaje puede ser de un 1 %, 5 %, 10 %, 50 %, 150 % o mayor, y cualquier valor intermedio, del voltaje medido sobre el voltaje nominal. Otro desafío presentado al sistema eléctrico 200 durante un evento de isla es que el convertidor 210 y el generador 118 pueden experimentar una red de impedancia extremadamente alta y lo más probable es que casi no tengan capacidad para exportar potencia real. Si la turbina está funcionando a un nivel de potencia significativo, esa energía se debe consumir, y esa energía tiende a llegar al enlace de CC 244 que acopla los dos convertidores 220, 222, como se describe a continuación. Este flujo de potencia se puede producir en el enlace de CC 244 por los semiconductores de potencia (no mostrados en la FIG. 2) de la línea 222 o bien del convertidor de rotor 220. Para sistemas similares al mostrado en la FIG. 2, el uso de un circuito crowbar, como es conocido en la técnica, en el terminal del convertidor de rotor 220 se puede usar para proteger los semiconductores de potencia en muchos eventos, pero la aplicación de crowbar durante un evento de isla puede incrementar el riesgo de daño.

**[0034]** Como se indica anteriormente, el sobrevoltaje en el lado de CA del convertidor de lado de línea 222 puede hacer que se bombee energía a los condensadores 250, incrementando de este modo el voltaje en el enlace de CC 244. El mayor voltaje en el enlace de CC 244 puede dañar los semiconductores de potencia, tales como uno o más conmutadores electrónicos tales como un tiristor de apagado de puerta (GTO), tiristor conmutado por puerta (GCT), transistor bipolar de puerta aislada (IGBT), MOSFET, combinaciones de los mismos, y similares localizados dentro del convertidor de lado de línea 222 y/o el convertidor de rotor 220.

**[0035]** La condición de funcionamiento normal de una turbina eólica en un parque eólico se ilustra en la FIG. 3A. Esta figura muestra flujos de potencia dentro del convertidor 210 y el sistema eléctrico de parque eólico 300 durante el funcionamiento supersíncrono típico de condiciones de viento moderado a fuerte. La potencia del generador 118 se divide en dos rutas, un flujo de potencia (PEstátor) 302 fluye directamente desde el estátor 120 a la conexión de red 242, el otro flujo de potencia (PRotor) 304 por medio del rotor 122 que pasa a través del convertidor de rotor 220, al enlace de CC 244, al convertidor de línea 222, a través de un reactor de línea 312 (no requerido) y a continuación al punto de conexión de red 242. La suma (Pred) 306 de estos dos flujos de potencia 302, 304 es la salida neta del generador 118. Cabe destacar que la división de potencia entre el rotor de generador 122 y el estátor 120 es una función de la velocidad de rotor con respecto al síncrono. De forma similar, la potencia de otras turbinas eólicas 314 en el parque eólico fluye desde la red local al punto de conexión de red 242. En el funcionamiento supersíncrono, la velocidad de rotor es mayor que en el síncrono y la potencia se divide como se muestra. En el funcionamiento subsíncrono, la velocidad del rotor es menor que en el síncrono y el devanado del rotor 122 extrae potencia del convertidor de rotor 220, es decir, la potencia fluye a través de los convertidores 222, 220.

**[0036]** La FIG. 3B ilustra las condiciones cuando un disyuntor remoto se abre dejando el parque eólico en una condición de isla y el flujo de potencia a la red 242 se interrumpe repentinamente en un caso en que el par de torsión y la velocidad del rotor siguen siendo los mismos que antes de la condición de isla. La potencia (PLínea) 308 en el convertidor de línea 222 se ve repentinamente forzada a invertirse, ya que la potencia que fluía desde el estátor 120 a la red 242 ahora tiene solo el convertidor de línea 222 como ruta. Esto hace que el voltaje en el enlace de CC 244 aumente muy rápidamente. Cuando se produce una condición de isla, es deseable desconectar la turbina eólica 118 de la red 242 de manera que no provoque daño a los componentes del sistema eléctrico 300. Sin embargo, se puede producir daño a los componentes en unos pocos milisegundos, lo que típicamente es más rápido de lo que pueden operar los disyuntores de circuito. La acción de control es necesaria rápidamente para evitar dañar los niveles de voltaje. Además, como se describe anteriormente, la apertura de disyuntor remoto puede dejar una parte de la red local conectada al generador 118, por ejemplo, cables que componen el sistema colector de parque eólico, etc. Esta capacitancia 310 puede ser una fuente de amplificación de voltaje de CA en la red restante.

**[0037]** En referencia ahora a la FIG. 4, como se indica anteriormente, algunos modos de realización de sistemas para responder a un evento de red de alto voltaje en un sistema eléctrico conectado con uno o más DFIG pueden incluir un sistema de control o controlador 202. En general, el controlador 202 puede comprender un ordenador u otra unidad de procesamiento adecuada. Por tanto, en varios modos de realización, el controlador 202 puede incluir

instrucciones legibles por ordenador adecuadas que, cuando se implementan, configuran el controlador 202 para realizar diversas funciones diferentes, tales como recibir, transmitir y/o ejecutar señales de control de turbina eólica. Como tal, el controlador 202 se puede configurar en general para controlar los diversos modos de funcionamiento (por ejemplo, estados conductores o no conductores) de uno o más conmutadores y/o componentes de modos de realización del sistema eléctrico 200. Por ejemplo, el controlador 200 se puede configurar para implementar procedimientos de respuesta a un evento de red de alto voltaje en un sistema eléctrico conectado con uno o más DFIG.

**[0038]** La FIG. 4 ilustra un diagrama de bloques de un modo de realización de componentes adecuados que se pueden incluir dentro de un modo de realización de un controlador 202, o cualquier otro dispositivo informático que recibe señales que indican las condiciones de red de acuerdo con aspectos de la presente materia objeto. En diversos aspectos, dichas señales se pueden recibir de uno o más sensores o transductores 58, 60, o se pueden recibir de otros dispositivos informáticos (no mostrados) tales como un sistema de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA), un sistema de protección de turbinas, regulador de PLL 400 (FIG. 2) y similares. Las señales recibidas pueden incluir, por ejemplo, señales de voltaje tales como el voltaje del bus de CC 244 y el voltaje de red de CA junto con los correspondientes ángulos de fase para cada fase de la red de CA, señales de corriente, señales de flujo de potencia (dirección), salida de potencia del sistema convertidor 210, flujo de potencia total hacia (o desde) la red, y similares. En algunos casos, se pueden usar las señales recibidas por el controlador 202 para calcular otras variables tales como cambios en los ángulos de fase de voltaje con el tiempo y similares. Como se muestra, el controlador 202 puede incluir uno o más procesadores 62 y dispositivos de memoria 64 asociados configurados para realizar una variedad de funciones implementadas por ordenador (por ejemplo, realizar los procedimientos, etapas, cálculos y similares divulgados en el presente documento). Como se usa en el presente documento, el término "procesador" no solo se refiere a circuitos integrados a los que se hace referencia en la técnica como incluidos 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 64 puede(n) comprender en general elemento(s) de memoria, incluyendo, pero sin limitarse a, medio legible por ordenador (por ejemplo, una memoria de acceso aleatorio (RAM)), medio no volátil legible 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 64 en general se puede(n) configurar para almacenar instrucciones legibles por ordenador adecuadas que, cuando se implementan por el/los procesador(es) 62, configuran el controlador 202 para realizar diversas funciones incluyendo, pero sin limitarse a, transmitir directa o indirectamente señales de control adecuadas a uno o más conmutadores que comprenden el conjunto de conversión de potencia bidireccional 210, controlar las condiciones de funcionamiento del sistema eléctrico 200, y diversas otras funciones implementadas por ordenador adecuadas.

**[0039]** Adicionalmente, el controlador 202 también puede incluir un módulo de comunicaciones 66 para facilitar las comunicaciones entre el controlador 202 y los diversos componentes del sistema eléctrico 200 y/o la una o más fuentes de generación eléctrica 118. Por ejemplo, el módulo de comunicaciones 66 puede servir como interfaz para permitir que el controlador 202 transmita señales de control al conjunto de conversión de potencia bidireccional 210 y/u otros componentes de la turbina eólica y el sistema eléctrico. Además, el módulo de comunicaciones 66 puede incluir una interfaz de sensor 68 (por ejemplo, uno o más convertidores de analógico a digital) para permitir que las señales transmitidas desde los sensores (por ejemplo, 58, 60) se conviertan en señales que se pueden entender y procesar por los procesadores 62. De forma alternativa, el controlador 202 puede estar provisto de instrucciones legibles por ordenador adecuadas que, cuando se implementan por su(s) procesador(es) 62, configuran el controlador 202 para tomar diversas acciones dependiendo del modo de control de la turbina eólica. Por ejemplo, en funcionamiento normal (es decir, control de rotor), el convertidor de rotor tiene un control dominante sobre el flujo de potencia real y reactiva del generador. El convertidor de línea actúa principalmente para regular el voltaje de enlace de CC ajustando el intercambio de potencia real al punto de conexión de red. El convertidor de línea también puede extraer corriente reactiva de la red en caso de alto voltaje de CA.

**[0040]** La FIG. 5A es un diagrama de control de los elementos principales del control de rotor que muestra las funciones que crean consignas para la corriente de rotor. El controlador 202 como se muestra en la FIG. 4 se puede usar para implementar las etapas del control de rotor. Las etapas incluyen lo siguiente: (1) en referencia a la FIG. 5B, un diagrama de control para determinar la frecuencia y magnitud del fasor de voltaje de secuencia positiva del voltaje de red, detectar el voltaje de red en al menos dos fases (por ejemplo, Vg\_ab\_Fbk 502 y Vg\_bc\_Fbk 504) y derivar por medio de un bucle de enganche de fase (PLL) y cálculos vectoriales 506 la frecuencia (Freq\_grid\_fbk 508) y magnitud (Vmag\_grid\_fbk 510) del fasor de voltaje de secuencia positiva. Este PLL también establece el marco de referencia para cantidades vectoriales que están en fase con el voltaje de CA (eje "x") y ortogonales al voltaje de CA (eje "y"), se puede apreciar que se pueden usar otras referencias vectoriales tales como directa y cuadratura ("d" y "q") sin limitar el alcance de los modos de realización de la presente invención; (2) en referencia de nuevo a la FIG. 5A, calcular la corriente de estátor que produce par (por ejemplo, eje x) (S\_lx\_Cmd 512) necesaria para crear el par que se ordena desde una función de control de nivel superior en la turbina eólica (Trq\_Cmd 514); (3) calcular la corriente de estátor que produce flujo (por ejemplo, eje y) (S\_ly\_Cmd 516) necesaria para crear la corriente reactiva que se ordena desde una función de control de nivel superior en la turbina eólica (Vmag\_grid\_cmd 518) y la magnitud (Vmag\_grid\_fbk 510) del fasor de voltaje de secuencia positiva;

y (4) calcular, usando un modelo de circuito eléctrico 520 del generador, las consignas de corriente de rotor ( $R_{Ix\_Cmd}$  522,  $R_{Iy\_Cmd}$  524) requeridas para crear las corrientes de estátor deseadas ( $S_{Ix\_Cmd}$  512,  $S_{Iy\_Cmd}$  516). Como se muestra en la fig. 5A, los cálculos se pueden realizar por módulos (por ejemplo, cálculo de corriente de par 526, regulador de voltaje de CA 528) dentro del controlador 202 u otros dispositivos informáticos adecuados, o como componentes independientes. La FIG. 5C es un diagrama de control que muestra las funciones que implementan consignas para la corriente de rotor. Esta es una estructura de predicción-corrección con dos etapas: (1) calcular, usando un modelo de circuito eléctrico del generador, las consignas de "alimentación directa" ("feed-forward") de voltaje de rotor ( $R_{Vx\_ffwd}$ ,  $R_{Vy\_ffwd}$ ; cabe destacar que en la FIG. 5C, para mayor claridad, las líneas con barras "/" implican variables bidimensionales (es decir,  $x$ ,  $y$  ambas implícitas), por lo tanto,  $R_{Vx\_ffwd}$  y  $R_{Vy\_ffwd}$  se muestran solo como la señal  $R_{Vffwd}$  530 en la FIG. 5C) que producirían las corrientes de rotor deseadas ( $R_{Ix\_Cmd}$  522,  $R_{Iy\_Cmd}$  524, mostradas como  $R_{I\_cmd}$  538 en la FIG. 5C) dado un modelo eléctrico perfecto, señales de realimentación perfectas (por ejemplo, realimentación de velocidad de rotor ( $R_{Spd\_fbk}$  534), realimentación de corriente de rotor ( $x$  e  $y$ ) ( $R_{I\_fbk}$  536) e implementación perfecta de las consignas de voltaje 540, 542; y (2) corregir, usando un regulador de bucle cerrado 532, las imperfecciones de la etapa de predicción. Esta parte de circuito cerrado está diseñada para funcionar cuando el generador está conectado a la red. Otra acción del control de rotor es ordenar voltaje cero en el rotor ("crowbar") si el voltaje de enlace de CC excede un punto de referencia. Esta acción a veces es necesaria en respuesta a fallos de red graves cerca de la turbina eólica (referencia, por ejemplo, patente de EE. UU. n.º 7,321,221 emitida el 22 de enero de 2008; y patente de EE. UU. n.º 6,921,985 emitida el 26 de julio de 2005, de las que ambas se incorporan en su totalidad por referencia en el presente documento y son una parte del mismo). Como se muestra en la fig. 5C, los cálculos se pueden realizar por módulos (por ejemplo, cálculo de alimentación directa de rotor 544, regulador de corriente de bucle cerrado 532) dentro del controlador 202 u otros dispositivos informáticos adecuados, o como componentes independientes.

**[0041]** En el control normal, como se describe anteriormente, cuando se produce un evento de red de alto voltaje repentino, ocurre lo siguiente: (1) las consignas de alto nivel para voltaje y par no cambian sustancialmente, porque son el resultado de un control de acción más lenta; (2) el convertidor de línea 222 reacciona a un alto voltaje de CC incrementando la consigna de corriente real que inyecta a la red; (3) el convertidor de línea 222 reacciona a un alto voltaje de CA extrayendo corriente reactiva de la red; (4) el regulador de voltaje de CA 528 reacciona para ordenar corriente reactiva incrementada extraída de la red por medio del estátor de generador 120; (5) el calculador de par 526 reduce la cantidad de corriente real ordenada por proporción inversa al incremento en voltaje de red, lo que da como resultado el mismo par y potencia real del generador 118; (6) el regulador de corriente de rotor 542 determina un voltaje de rotor previsto para lograr la corriente deseada y una respuesta de bucle cerrado para corregir cuando la corriente medida no sigue la corriente ordenada; (7) si el voltaje del enlace de CC excede un umbral de crowbar, a continuación el convertidor de rotor 220 anulará los reguladores y aplicará un cortocircuito al rotor 122; y (8) si se ordena una desconexión de protección, la regulación ("gating") del convertidor tanto de línea como de rotor 222, 220 se bloquea simultáneamente con la emisión de una consigna para abrir el disyuntor de circuito de turbina eléctrica 214.

**[0042]** Con la excepción de la acción de crowbar (etapa 7, anterior), las etapas anteriores están todas en una dirección correcta cuando queda alguna conexión por uno o más DFIG 118 a la red. Activar el crowbar en esta condición puede agravar las tensiones de voltaje y corriente en los componentes eléctricos del convertidor de turbina eólica 210. Si la red se desconecta completamente de uno o más DFIG 118, como resultado de la reparación de fallos u otra acción, a continuación la parte de bucle cerrado 532 del regulador de corriente de rotor 542 puede actuar incorrectamente. Esto es debido a que la respuesta de la corriente de rotor a las consignas de voltaje de rotor será drásticamente diferente, y probablemente de signo opuesto, a la respuesta cuando esté conectado a la red. Un aspecto adicional se refiere a la acción de crowbar cuando la red está desconectada. Esto puede crear una situación donde cualquier capacitancia 310 en la parte restante de la red de CA resonará con la inductancia del generador 118, dando lugar a una amplificación de voltaje que puede dar lugar rápidamente a niveles dañinos de tensión ("stress") en componentes eléctricos. Otro aspecto se refiere a la respuesta del convertidor de línea 222. Este convertidor 222 puede perder el control de su corriente si el aumento en el voltaje de CA excede el aumento en el voltaje de CC en más de una determinada cantidad. Puesto que un objetivo es mantener el voltaje de enlace de CC dentro de su capacidad, existe un límite de aumento de voltaje de CA más allá del que el convertidor de línea 222 puede continuar eliminando energía del enlace de CC 244. Un aspecto final se refiere a la respuesta a la acción de desconexión de protección. Bloquear la línea 222 y el convertidor de rotor 220 mientras todavía está conectados a la red no eliminará energía del sistema, sino que permitirá que la energía en la red, o la capacitancia 310 del colector restante y el sistema de transmisión, fluya sin control hacia el convertidor eólico 210 con posibles incrementos de voltaje más allá de la capacidad del equipo.

**[0043]** Por lo tanto, se necesita una respuesta de control diferente, diferente del funcionamiento normal para eventos de red de alto voltaje. Los objetivos de cambiar la respuesta de control son reducir la potencia inyectada en el enlace de CC 244 desde el rotor del generador 122 a aproximadamente cero como una forma de evitar un aumento de voltaje de CC excesivo. Esta acción también permite que la línea 222 y los convertidores de rotor 220 utilicen toda su capacidad para mantener bajo el voltaje de CA en el estátor de generador 120. Otro objetivo de cambiar la respuesta de control es reducir el voltaje interno eficaz del generador 118 visto desde el estátor 120 como una forma de reducir el voltaje en el estátor 120. Aún otro objetivo es reducir el voltaje del convertidor de

línea 222 para ayudar al generador 118 a reducir el voltaje de estátor. Y un objetivo final es garantizar que los convertidores 210 funcionen dentro de los voltajes y corrientes que son posibles dadas las condiciones de circuito, para evitar que las acciones de protección (por ejemplo, bloqueo de sobrecorriente o crowbar) interfieran con el cumplimiento de los objetivos de control deseados.

**[0044]** La realización de estos objetivos se puede lograr de varias formas, a continuación se describe un modo de realización de un enfoque para responder a eventos de red de alto voltaje que se basa en la estructura de control normal. La FIG. 6A es un diagrama de flujo que ilustra un modo de realización de un procedimiento para controlar un generador de inducción de doble alimentación (DFIG) durante un evento de red de alto voltaje. Los modos de realización de etapas del procedimiento descrito en la FIG. 6 se pueden realizar por uno o más dispositivos informáticos tales como el controlador 202. En la etapa 602, se detecta una condición de alto voltaje de red. Un sobrevoltaje puede ser un incremento a corto plazo o de larga duración en el voltaje medido del sistema eléctrico por encima de su valor nominal. Por ejemplo, el sobrevoltaje puede ser de un 1 %, 5 %, 10 %, 50 %, 150 % o mayor, y cualquier valor intermedio, del voltaje medido sobre el voltaje nominal. En un aspecto, se puede establecer un umbral para el sobrevoltaje por encima del que se señala un evento de red de alto voltaje. En la etapa 604, una salida de una parte de bucle cerrado del regulador de corriente de rotor se establece en un valor fijo. En un aspecto, el valor fijo es cero o aproximadamente cero. De esta forma, se cuenta con la ruta de alimentación directa predictiva como se describe anteriormente como un medio conveniente de establecer el voltaje interno del generador de acuerdo con los objetivos de control, como se describe anteriormente. En la etapa 606, se detecta una condición de alto voltaje de CC, o una condición que pronto conducirá a una condición de alto voltaje de CC tal como, por ejemplo, alto voltaje de CA, y la consigna de corriente que produce par de rotor se reduce a aproximadamente cero. En un aspecto, esto se puede realizar anulando la consigna de corriente de rotor después del flujo lógico normal, o usando la estructura de control existente y reduciendo la consigna de par. Se puede usar una combinación para lograr una respuesta rápida seguida de una transición suave.

**[0045]** Siguiendo la respuesta de control descrita anteriormente a un evento de red de alto voltaje, si la red vuelve a una condición donde permanece una conexión eléctrica viable entre la turbina eólica y la red, a continuación el control vuelve de nuevo al modo normal. Se realizan las siguientes etapas: (1) detectar la reanudación de conexión de red, con un voltaje de red dentro de la capacidad de la turbina eólica. Esto implica al menos una medida del voltaje de red en la turbina eólica. También puede incluir mediciones de la corriente que sale de la turbina eólica; (2) precondicionar los reguladores a barlovento ("upstream") según sea apropiado para proporcionar una transición sin perturbaciones al control normal; y (3) conmutar (volver) al modo de control normal.

**[0046]** Si, siguiendo la respuesta de control descrita anteriormente a un evento de red de alto voltaje, se determina que la red está desconectada de la turbina eólica, se realizan las siguientes etapas: (1) detectar que se han perdido todas las conexiones de red, dejando la planta eólica en una condición de isla. Existen varias formas de hacer esto, incluyendo, por ejemplo, funciones de monitorización y protección de turbina eólica estándar, incluyendo desviación de frecuencia de red, desviación de voltaje de red, par medido que no sigue el par ordenado durante un tiempo predeterminado, sobrevelocidad de turbina, vibración de torre, etc. Otra forma de detectar que se han perdido las conexiones de red incluye funciones de monitorización especiales representadas por la condición de alto voltaje, por ejemplo, incrementar la sensibilidad de funciones existentes tales como desviaciones de frecuencia y voltaje. Y aún otra forma de detectar la pérdida de conexiones de red incluye recibir una señal de un dispositivo externo que conoce el estado de las conexiones de red. Una vez que se determina la pérdida de conexiones de red, a continuación (2) se emite una consigna para abrir el disyuntor de circuito de turbina eólica; (3) el estado del disyuntor de circuito de turbina eólica se determina después de emitir la consigna de apertura; y (4) después de que se determine que el disyuntor de circuito de turbina eólica se ha abierto, se detiene la regulación de los convertidores como parte de un proceso de apagado ordenado.

**[0047]** En un aspecto, si se requiere una desconexión de protección, los convertidores se regulan siguiendo la estrategia anterior hasta que el disyuntor de circuito de turbina eólica elimina ("clears") la conexión a la parte restante de la red. El modo de funcionamiento descrito anteriormente permanece en efecto hasta que se determina que las condiciones de red están en un modo conectado donde es posible soportarlas (*ride-through*), o bien se toma la decisión de detener la turbina eólica.

**[0048]** La FIG. 6B es un diagrama de flujo que ilustra otro modo de realización de un procedimiento para controlar un generador de inducción de doble alimentación (DFIG) durante un evento de red de alto voltaje. Los modos de realización de etapas del procedimiento descrito en la FIG. 6 se pueden realizar por uno o más dispositivos informáticos tales como el controlador 202. En la etapa 608, se detecta una condición de alto voltaje de red. Un sobrevoltaje puede ser un incremento a corto plazo o de larga duración en el voltaje medido del sistema eléctrico por encima de su valor nominal. Por ejemplo, el sobrevoltaje puede ser de un 1 %, 5 %, 10 %, 50 %, 150 % o mayor, y cualquier valor intermedio, del voltaje medido sobre el voltaje nominal. En un aspecto, se puede establecer un umbral para el sobrevoltaje por encima del que se señala un evento de red de alto voltaje. En la etapa 610, una salida de una parte de bucle cerrado del regulador de corriente de rotor se establece en un valor fijo. En un aspecto, el valor fijo es cero o aproximadamente cero. De esta forma, se cuenta con la ruta de alimentación directa predictiva como se describe anteriormente como un medio conveniente de establecer el voltaje interno del generador de acuerdo con los objetivos de control, como se describe anteriormente. En la etapa 612, se detecta una condición

de alto voltaje de CC, o una condición que pronto conducirá a una condición de alto voltaje de CC tal como, por ejemplo, alto voltaje de CA, y la consigna de corriente que produce par de rotor se reduce a aproximadamente cero. En un aspecto, esto se puede realizar anulando la consigna de corriente de rotor después del flujo lógico normal, o usando la estructura de control existente y reduciendo la consigna de par. Se puede usar una combinación para lograr una respuesta rápida seguida de una transición suave. En la etapa 614, se reduce la magnitud del voltaje interno en el generador. En general, esto se puede lograr reduciendo el flujo del entrehierro en el generador. En un aspecto, esto se realiza moviendo la consigna de producción de flujo de rotor (por ejemplo, eje y) a la región subexcitada. El uso de la ruta de alimentación directa existente es un medio para establecer esta consigna de corriente de manera que se puede evitar el bloqueo por sobrecorriente. La lógica en el cálculo de regulación de rotor final puede limitar la solicitud de voltaje para mantener el convertidor de rotor dentro de su intervalo de control lineal. En la etapa 616, se reduce la magnitud del voltaje de convertidor en el convertidor de línea. En un aspecto, esto se realiza moviendo la consigna de corriente que produce flujo de convertidor de línea, mientras se limita la consigna de modo que no se produzca el bloqueo por sobrecorriente. En la etapa 618, la acción de crowbar se puede inhibir para condiciones eléctricas en las que el sistema eléctrico puede continuar sin daño. En un aspecto, la acción de crowbar está bloqueada. En otros aspectos, la acción de crowbar puede estar disponible pero insensibilizada, ya que la acción de crowbar puede seguir siendo prudente si los niveles de tensión son demasiado altos, como medio para reducir el alcance de los posibles daños a componentes eléctricos. En la etapa 620, se determina si el evento de red de alto voltaje es un evento que el DFIG pueda soportar. En general, esto implicará una condición de alto voltaje donde el DFIG permanece conectado con la red. Si se determina que la condición es un evento de soporte de alto voltaje (HVRT), a continuación el proceso pasa a la etapa 622 donde el DFIG, los convertidores y el sistema eléctrico se controlan como se describe anteriormente o de acuerdo con la publicación de patente de EE. UU. US 20120133343 A1 (n.º de serie de solicitud 13/323309) presentada el 12 de diciembre de 2011, que se incorpora en su totalidad por referencia y forma parte de la misma. Siguiendo la respuesta de control descrita anteriormente a un evento de red de alto voltaje, si la red vuelve a una condición donde permanece una conexión eléctrica viable entre la turbina eólica y la red, a continuación el proceso pasa a la etapa 624 y el control vuelve al modo normal. Las siguientes etapas se pueden realizar en la transición de vuelta al modo normal: (1) detectar la reanudación de conexión de red, con un voltaje de red dentro de la capacidad de la turbina eólica. Esto implica al menos una medida del voltaje de red en la turbina eólica. También puede incluir mediciones de la corriente que sale de la turbina eólica; (2) precondicionar los reguladores a barlovento según sea apropiado para proporcionar una transición sin perturbaciones al control normal; y (3) conmutar (volver) al modo de control normal. A continuación, el proceso vuelve a la etapa 608 para monitorizar un alto voltaje de red. Volviendo a la etapa 620, como se indica anteriormente, determinar si el evento es un evento de soporte o no implica en general determinar si el DFIG permanece conectado a la red o no. Si, siguiendo la respuesta de control descrita anteriormente a un evento de red de alto voltaje, se determina que la red está desconectada de la turbina eólica, se realizan las siguientes etapas: (1) detectar que se han perdido todas las conexiones de red, dejando la planta eólica en una condición de isla. Existen varias formas de hacer esto, incluyendo, por ejemplo, funciones de monitorización y protección de turbina eólica estándar, incluyendo desviación de frecuencia de red, desviación de voltaje de red, par medido que no sigue el par ordenado durante un tiempo predeterminado, sobrevelocidad de turbina, vibración de torre, etc. Otra forma de detectar que se han perdido las conexiones de red incluye funciones de monitorización especiales representadas por la condición de alto voltaje, por ejemplo, incrementar la sensibilidad de funciones existentes tales como desviaciones de frecuencia y voltaje. Y aún otra forma de detectar la pérdida de conexiones de red incluye recibir una señal de un dispositivo externo que conoce el estado de las conexiones de red. Si se determina en la etapa 620 que se ha perdido la conexión de red, a continuación el proceso pasa a la etapa 626. En la etapa 626, una vez que se determina la pérdida de conexiones de red, a continuación se emite una consigna para abrir el disyuntor de circuito de turbina eólica; el estado del disyuntor de circuito de turbina eólica se determina después de emitir la consigna de apertura; y después de que se determine que el disyuntor de circuito de turbina eólica se ha abierto, se detiene la regulación de los convertidores como parte de un proceso de apagado ordenado. En un aspecto, como se muestra en la etapa 628, al mismo tiempo que la consigna para abrir el disyuntor de circuito de viento o durante el tiempo que el disyuntor se está abriendo, la consigna de corriente que produce par (por ejemplo, el eje x) se puede cambiar a una dirección de motor para eliminar además la energía del sistema eléctrico incluyendo el DFIG, el enlace de CC (incluyendo cualquier condensador), el convertidor del lado de línea, el convertidor del lado de rotor, cualquier red restante y similares.

**[0049]** En un aspecto, si se requiere una desconexión de protección, los convertidores se regulan siguiendo la estrategia anterior hasta que el disyuntor de circuito de turbina eólica elimina la conexión a la parte restante de la red. El modo de funcionamiento descrito anteriormente permanece en efecto hasta que se determina que las condiciones de red están en un modo conectado donde es posible soportarlas, o bien se toma la decisión de detener la turbina eólica.

**[0050]** En otro modo de realización, si se solicita una acción de protección en cualquier modo de funcionamiento de turbina eólica, a continuación se realiza el proceso como se describe en el diagrama de flujo ejemplar de la FIG. 7 para controlar los componentes eléctricos de turbina eólica cuando se abre un disyuntor de sistema asociado con un DFIG tras la detección de una condición que requiere apagado. Las etapas del proceso mostrado en la FIG. 7 se pueden realizar por un dispositivo informático tal como el controlador 202. En la etapa 700, se detecta una condición de funcionamiento anómalo en el sistema eléctrico que requiere el apagado del DFIG y/o los convertidores. En la etapa 702, se emite una consigna para abrir el disyuntor de circuito de turbina eólica 214. Esta

consigna se puede emitir en función de cualquier condición de funcionamiento de la turbina eólica, convertidores y similares. En la etapa 704, para los convertidores tanto de línea como de rotor 222, 220, la regulación continúa durante y después de emitir la consigna para abrir el disyuntor de circuito de turbina eólica 214. La regulación se refiere a hacer que los conmutadores electrónicos tales como IGBT y similares se disparen o pasen a un estado de conducción durante al menos el tiempo que reciben la señal de regulación. En la etapa 706, se determina el estado del disyuntor de circuito de turbina eólica después de emitir la consigna de apertura. En la etapa 708, si se determina que el disyuntor de circuito de turbina eólica se ha abierto, se detiene la regulación de los convertidores como parte de un proceso de apagado ordenado. Si, en la etapa 706, se determina que el disyuntor de circuito de turbina eólica no se ha abierto, el proceso vuelve a la etapa 704 y la regulación continua hasta que se abre el disyuntor o se rescinde la consigna de disparo. Un beneficio de continuar regulando los convertidores después de que se emite la señal de disparo es permitir que los convertidores y el generador reduzcan el voltaje de CA que puede ser dañino para los componentes del convertidor y la turbina.

**[0051]** Como se describe anteriormente y como se apreciará por un experto en la técnica, los modos de realización de la presente invención se pueden configurar como un sistema, procedimiento o producto de programa informático. En consecuencia, los modos de realización de la presente invención pueden estar compuestos por diversos medios, incluyendo totalmente por *hardware*, totalmente por *software* o cualquier combinación de *software* y *hardware*. Además, los modos de realización de la presente invención pueden adoptar la forma de un producto de programa informático en un medio de almacenamiento legible por ordenador que tenga instrucciones de programa legibles por ordenador (por ejemplo, *software* informático) incorporadas en el medio de almacenamiento. Se puede utilizar cualquier medio de almacenamiento legible por ordenador no transitorio adecuado, incluyendo discos duros, CD-ROM, dispositivos de almacenamiento óptico o dispositivos de almacenamiento magnético.

**[0052]** Diversos modos de realización de la presente invención se han descrito anteriormente con referencia a diagramas de bloques e ilustraciones de diagramas de flujo de procedimientos, aparatos (es decir, sistemas) y productos de programa informático. Se entenderá que cada bloque de los diagramas de bloques e ilustraciones de diagramas de flujo, y combinaciones de bloques en los diagramas de bloques e ilustraciones de diagramas de flujo, respectivamente, se pueden implementar por diversos medios, incluyendo instrucciones de programa informático. Estas instrucciones de programa informático se pueden cargar en un ordenador de propósito general, ordenador de propósito especial u otro aparato de procesamiento de datos programable, tal como el/los procesador(es) analizado(s) anteriormente con referencia a la FIG. 3, para producir una máquina, de modo que las instrucciones que se ejecutan en el ordenador u otro aparato de procesamiento de datos programable creen un medio para implementar las funciones especificadas en el bloque o bloques del diagrama de flujo.

**[0053]** Estas instrucciones de programa informático también se pueden almacenar en una memoria legible por ordenador no transitoria que puede dirigir un ordenador u otro aparato de procesamiento de datos programable (por ejemplo, procesador(es) 62 de la FIG. 3) para que funcione de una manera particular, de modo que las instrucciones almacenadas en la memoria legible por ordenador produzcan un artículo de fabricación que incluya instrucciones legibles por ordenador para implementar la función especificada en el bloque o bloques del diagrama de flujo. Las instrucciones de programa informático también se pueden cargar en un ordenador u otro aparato de procesamiento de datos programable para provocar que se realice una serie de etapas operativas en el ordenador u otro aparato programable para producir un procedimiento implementado por ordenador de modo que las instrucciones que se ejecuten en el ordenador u otro aparato programable proporcionen etapas para implementar las funciones especificadas en el bloque o bloques del diagrama de flujo.

**[0054]** En consecuencia, los bloques de los diagramas de bloques e ilustraciones de diagramas de flujo soportan combinaciones de medios para realizar las funciones especificadas, combinaciones de etapas para realizar las funciones especificadas y medios de instrucción de programa para realizar las funciones especificadas. También se entenderá que cada bloque de los diagramas de bloques e ilustraciones de diagramas de flujo, y combinaciones de bloques en los diagramas de bloques e ilustraciones de diagramas de flujo, se pueden implementar por sistemas informáticos basados en *hardware* de propósito especial que realizan las funciones o etapas especificadas, o combinaciones de *hardware* de propósito especial e instrucciones de ordenador.

**[0055]** A menos que se establezca expresamente de otro modo, de ninguna manera se pretende que ningún procedimiento expuesto en el presente documento se interprete como que requiere que sus etapas se realicen en un orden específico. En consecuencia, si una reivindicación de procedimiento no enumera en realidad un orden que se va a seguir por sus etapas o no se establece específicamente de otro modo en las reivindicaciones o descripciones que las etapas van a estar limitadas a un orden específico, de ninguna forma se pretende que un orden se deduzca, en ningún respecto. Esto es válido para cualquier posible base no expresa de interpretación, incluyendo: cuestiones de lógica con respecto a la disposición de etapas o flujo operativo; sentido llano derivado de la organización gramatical o puntuación; el número o tipo de modos de realización descritos en la memoria descriptiva.

## REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para controlar un generador de inducción de doble alimentación (DFIG) (118) en respuesta a un evento de red de alto voltaje (602), comprendiendo dicho procedimiento:
  - 5        calcular, por un controlador (202), una consigna de alimentación directa de voltaje de rotor (530);  
       usar un regulador de corriente de bucle cerrado (532) para determinar una consigna de voltaje de rotor de bucle cerrado (540);  
       establecer (604), por el controlador (202), la consigna de voltaje de rotor de bucle cerrado (540) en un  
 10        valor fijo de modo que la consigna de voltaje de rotor de alimentación directa (530) establezca un voltaje interno para el DFIG (118); y  
       detectar (606), por el controlador (202), una condición de alto voltaje de CC en un enlace de CC (224) o una condición predictiva de alto voltaje de CC en el enlace de CC (224) y, en respuesta, reducir una  
 15        consigna de corriente que produce par de rotor (514) a aproximadamente cero, en el que el enlace de CC (224) conecta un convertidor de lado de línea (222) conectado a un bus de sistema (216) y un convertidor de lado de rotor (220) conectado a un rotor (106) del DFIG (118).
2. El procedimiento de la reivindicación 1, que comprende además determinar, por el controlador (202), que el evento de red de alto voltaje no es un evento de soporte y emitir una consigna de disparo, por el controlador (202), a un disyuntor de circuito de sistema (238) para desconectar el DFIG (118), el convertidor de lado de línea (222) y el convertidor de lado de rotor (220) de la red (242).
3. El procedimiento de cualquier reivindicación precedente, que comprende además cambiar la consigna de corriente que produce par (514) a una dirección de motor para eliminar energía de al menos el DFIG (118), el enlace de CC (224), el convertidor de rotor (220) y el convertidor de línea (222).
4. El procedimiento de cualquier reivindicación precedente, que comprende establecer (604), por el controlador (202), una salida del regulador de corriente de bucle cerrado (532) en un valor fijo de modo que una ruta de alimentación directa predictiva establece un voltaje interno para el DFIG (118) que comprende establecer la salida del regulador de corriente de bucle cerrado (543) en cero.
5. El procedimiento de cualquier reivindicación precedente, en el que detectar (606), por el controlador (202), la condición de alto voltaje de CC en el enlace de CC (224) o la condición predictiva de la condición de alto voltaje de CC en el enlace de CC (224), y en respuesta reducir la consigna de corriente que produce par de rotor a aproximadamente cero comprende que el controlador (202) anule una consigna de corriente de rotor después de un flujo lógico normal, use una estructura de control existente y reduzca una consigna de par de rotor, o una combinación de ambos.
6. El procedimiento de cualquier reivindicación precedente, que comprende además:
  - 40        reducir, por el controlador (202), una magnitud del voltaje interno en el DFIG (118);  
       educir, por el controlador (202), una magnitud de voltaje de convertidor en el convertidor de línea (222); e  
       inhibir, por el controlador (202), la acción de crowbar del rotor (106).
7. El procedimiento de la reivindicación 6, en el que reducir, por el controlador (202), la magnitud del voltaje interno en el generador (118) comprende mover un flujo de rotor que produce una consigna de corriente (516) a una región subexcitada.
8. El procedimiento de la reivindicación 7, en el que la ruta de alimentación directa predictiva se usa para establecer la consigna de corriente de producción de flujo de rotor (516) de manera que se puede evitar el bloqueo por sobrecorriente.
9. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 6 a 8, en el que la reducción, por el controlador (202), de la magnitud de voltaje de convertidor en el convertidor de línea (222) comprende mover una consigna de corriente que produce flujo de convertidor de línea mientras se limita la consigna de modo que no se produzca el bloqueo por sobrecorriente.
10. Un sistema (200) para controlar un generador de inducción de doble alimentación (DFIG) (118) en respuesta a un evento de red de alto voltaje, comprendiendo dicho sistema:
  - 60        un controlador (202), en el que el controlador está configurado para detectar una condición de alto voltaje de red;  
       un convertidor de lado de línea (222) conectado a un bus de sistema (216); y  
       un convertidor de lado de rotor (220) conectado a un rotor del DFIG (118), en el que el convertidor de lado  
 65        de línea (222) y el convertidor de lado de rotor (220) están conectados por un enlace de corriente continua

- (CC) (224), en el que dicho convertidor de lado de línea (222) y dicho convertidor de lado de rotor (220) están acoplados comunicativamente con el controlador (202),  
comprendiendo además dicho controlador (202) un regulador de corriente de rotor (542), en el que en  
5 respuesta a la condición detectada de alto voltaje de red, el controlador calcula una consigna de alimentación directa de voltaje de rotor (530), determina una consigna de voltaje de rotor de bucle cerrado (540) y establece la consigna de voltaje de rotor de bucle cerrado en un valor fijo de modo que la consigna de voltaje de rotor de alimentación directa predictiva (530) establece un voltaje interno para el DFIG (118) en respuesta a dicha condición detectada de alto voltaje de red, dicho controlador (202) configurado además para:  
10 detectar (606) una condición de alto voltaje de CC en el enlace de CC (224), o una condición predictiva de alto voltaje de CC en el enlace de CC (224) y, en respuesta, reducir una consigna de corriente que produce par de rotor (514) a aproximadamente cero.
11. El sistema (200) de la reivindicación 10, en el que el controlador (202) está configurado además para  
15 determinar que el evento de red de alto voltaje no es un evento de soporte y emitir una consigna de disparo a un disyuntor de circuito de sistema (214, 218, 238) para desconectar el DFIG (118), el convertidor de lado de red (222) y el convertidor de lado de rotor (220) de la red (242).
12. El sistema (200) de la reivindicación 10 o la reivindicación 11, que comprende además cambiar la consigna  
20 de corriente que produce par (514) a una dirección de motor para eliminar energía de al menos el DFIG (118), el enlace de CC (224), el convertidor de rotor (220) y el convertidor de línea (222).
13. El sistema (200) de cualquiera de las reivindicaciones 10 a 12, en el que al menos una salida del regulador  
25 de corriente de rotor (542) se establece en cero.
14. El sistema (200) de cualquiera de las reivindicaciones 10 a 13, en el que el controlador (202) está configurado  
30 para detectar una condición de alto voltaje de CC en el enlace de CC (224) o una condición predictiva de la condición de alto voltaje de CC en el enlace de CC (224) y, en respuesta, reducir la consigna de corriente que produce par de rotor (514) a aproximadamente cero comprende anular una consigna de corriente del rotor (522) después de un flujo lógico normal, usar una estructura de control existente y reducir una consigna de par de rotor, o una combinación de ambos.
15. El sistema (200) de cualquiera de las reivindicaciones 10 a 14, en el que el controlador (202) está configurado  
35 además para:  
reducir una magnitud del voltaje interno en el DFIG (118);  
reducir una magnitud del voltaje de convertidor en el convertidor de línea (222); e  
inhibir la acción de crowbar del rotor (106).

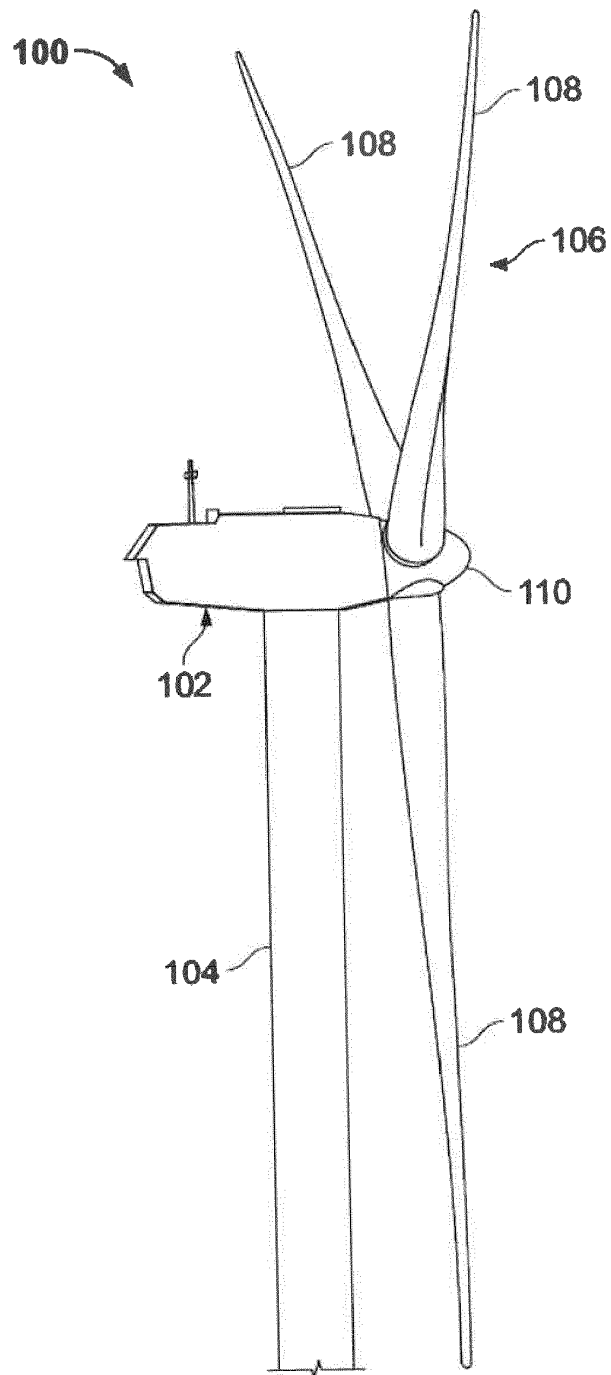


FIG. 1

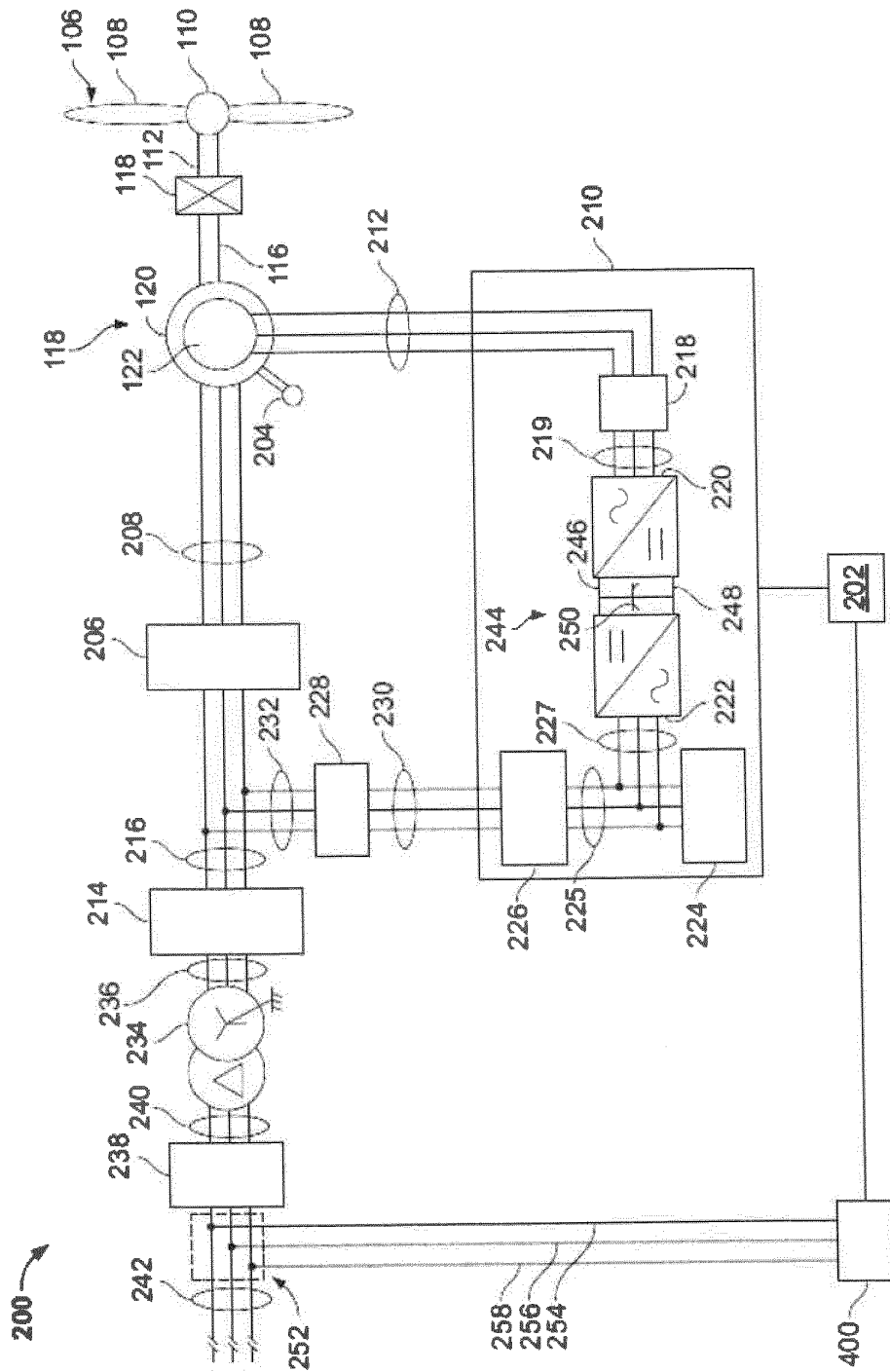


FIG. 2

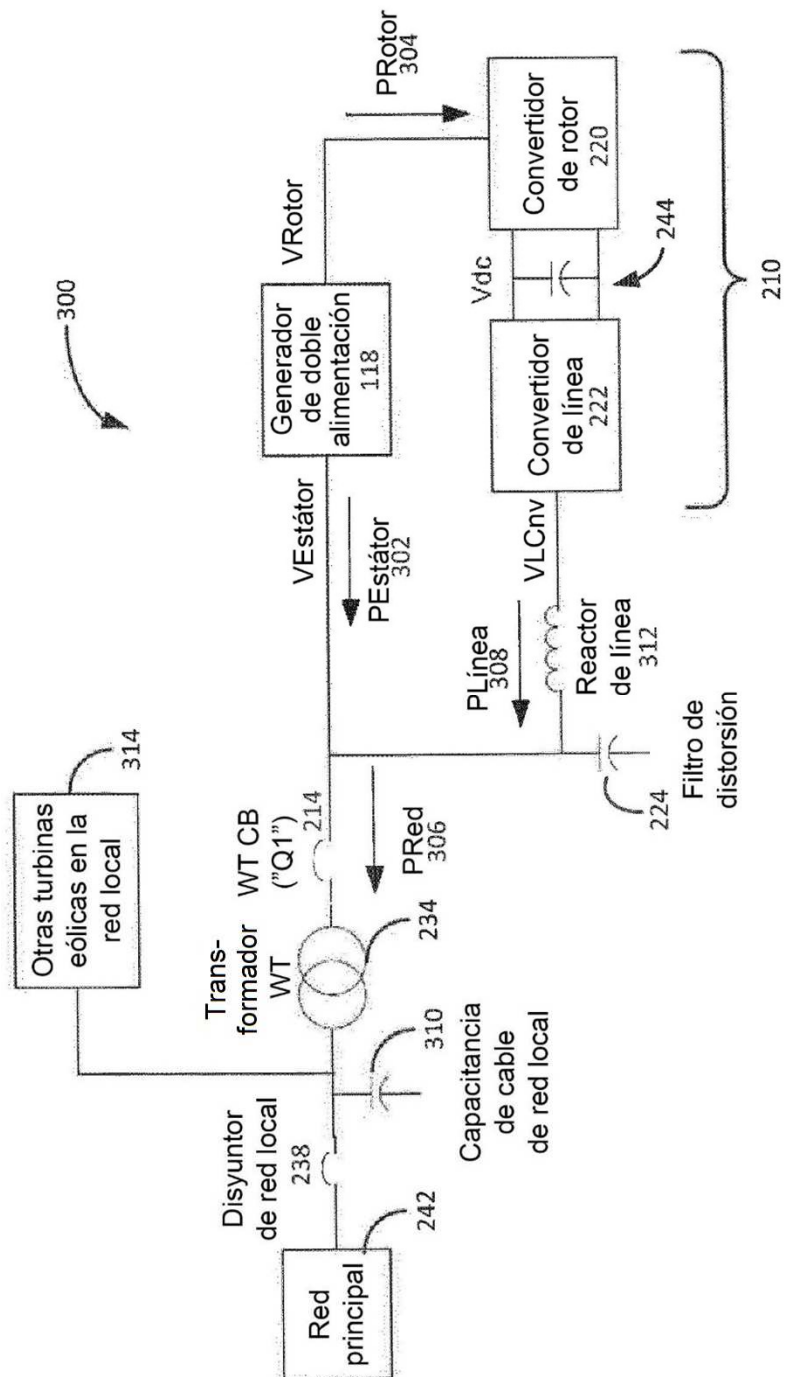


FIG. 3A

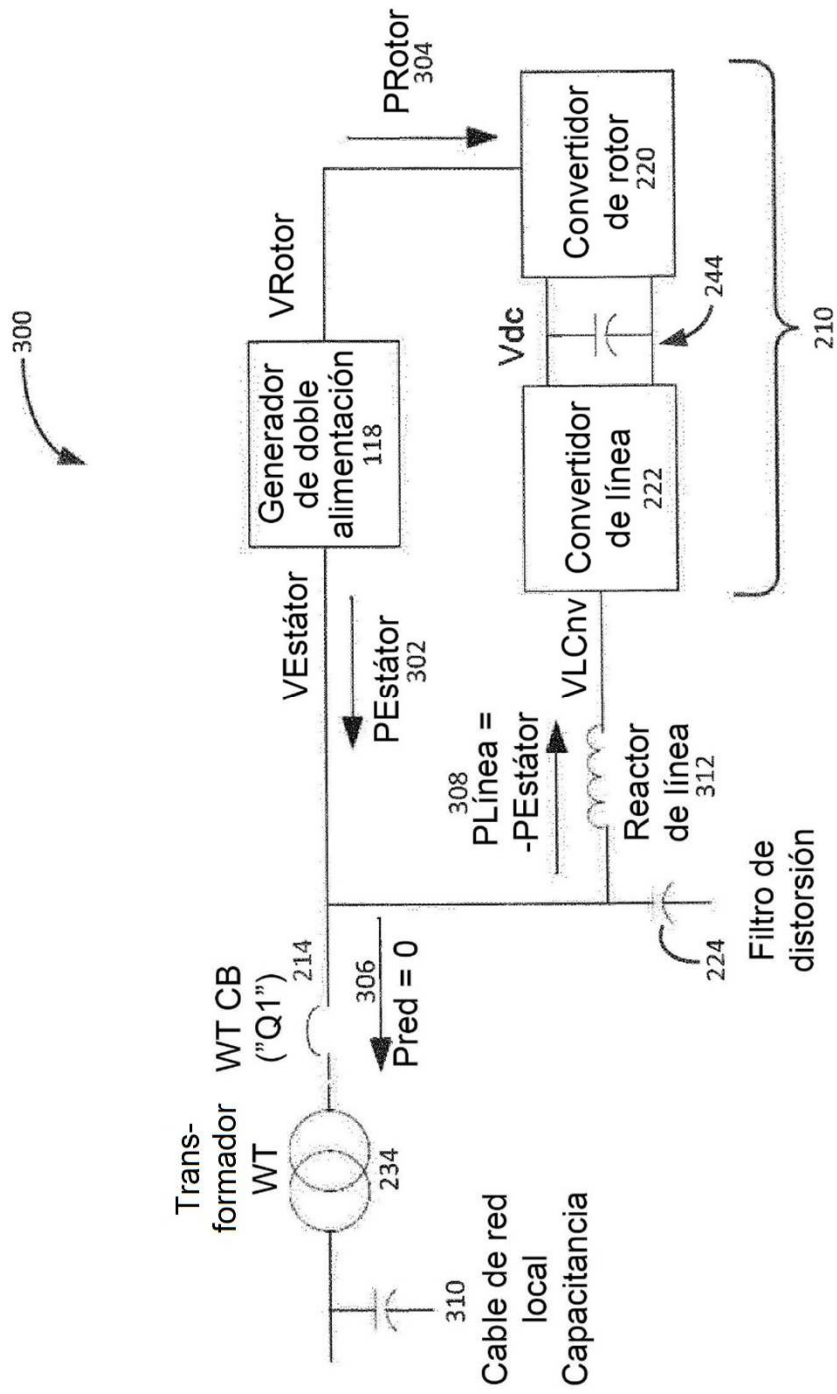


FIG. 3B

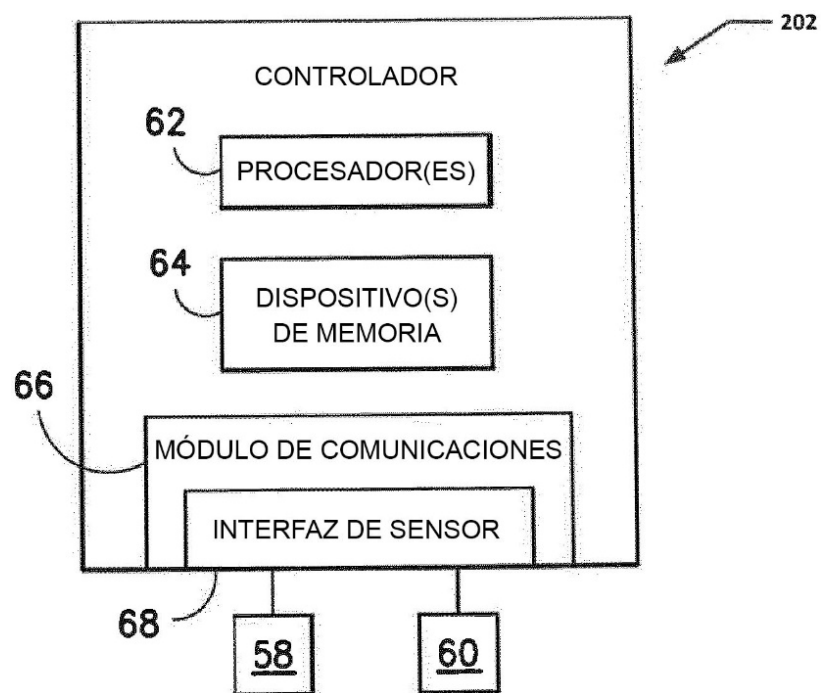


FIG. 4

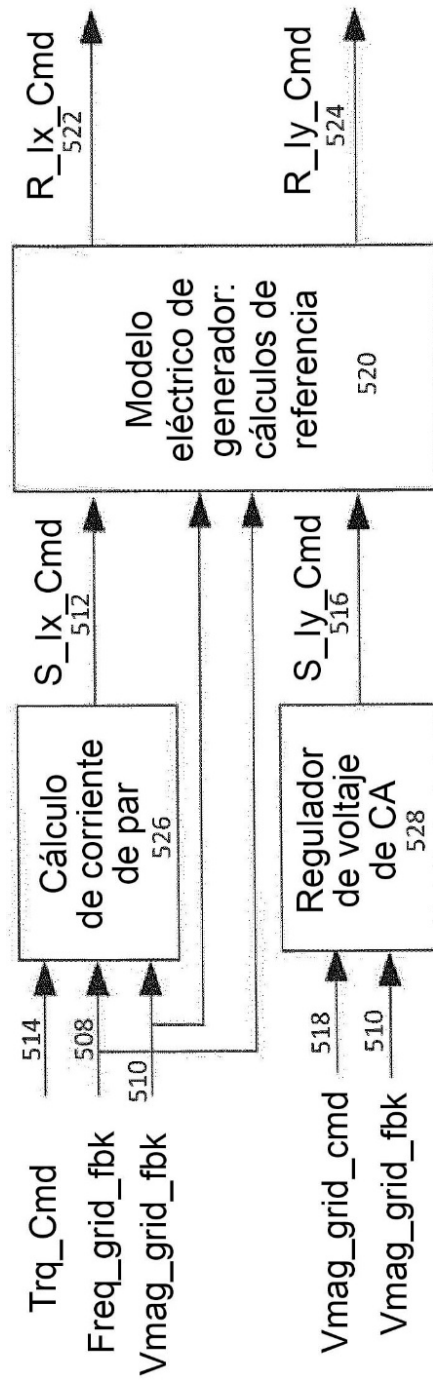


FIG. 5A



FIG. 5B

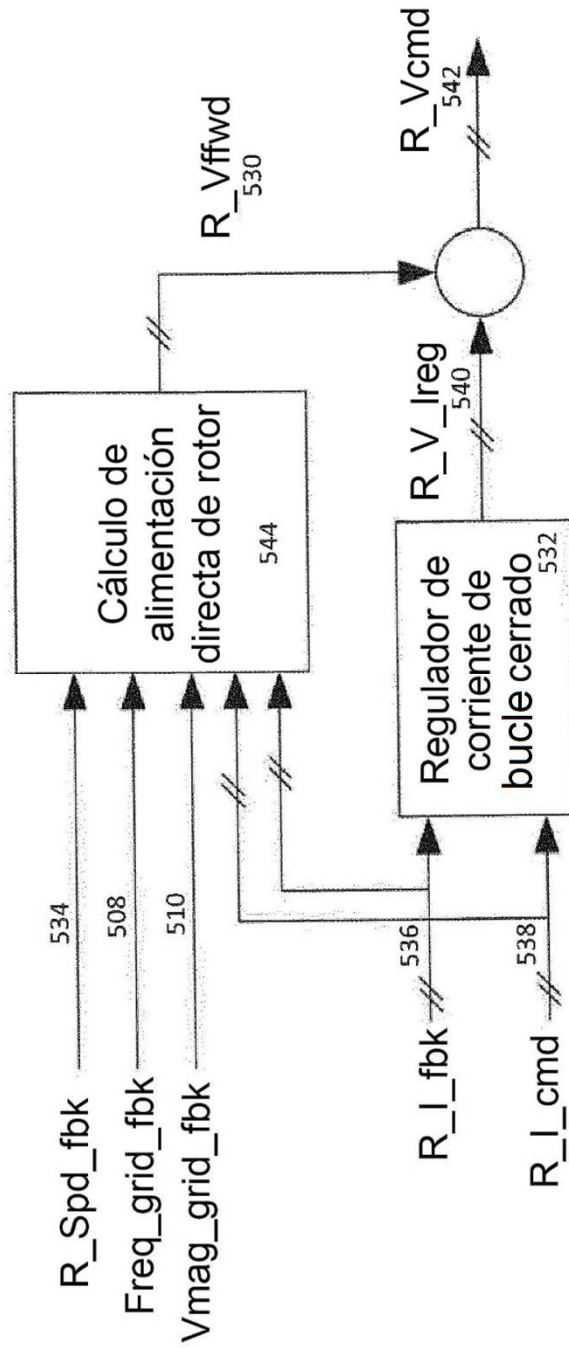
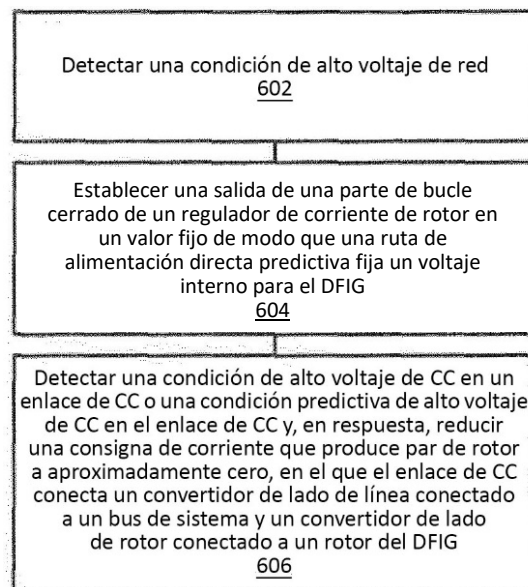


FIG. 5C



**FIG. 6A**

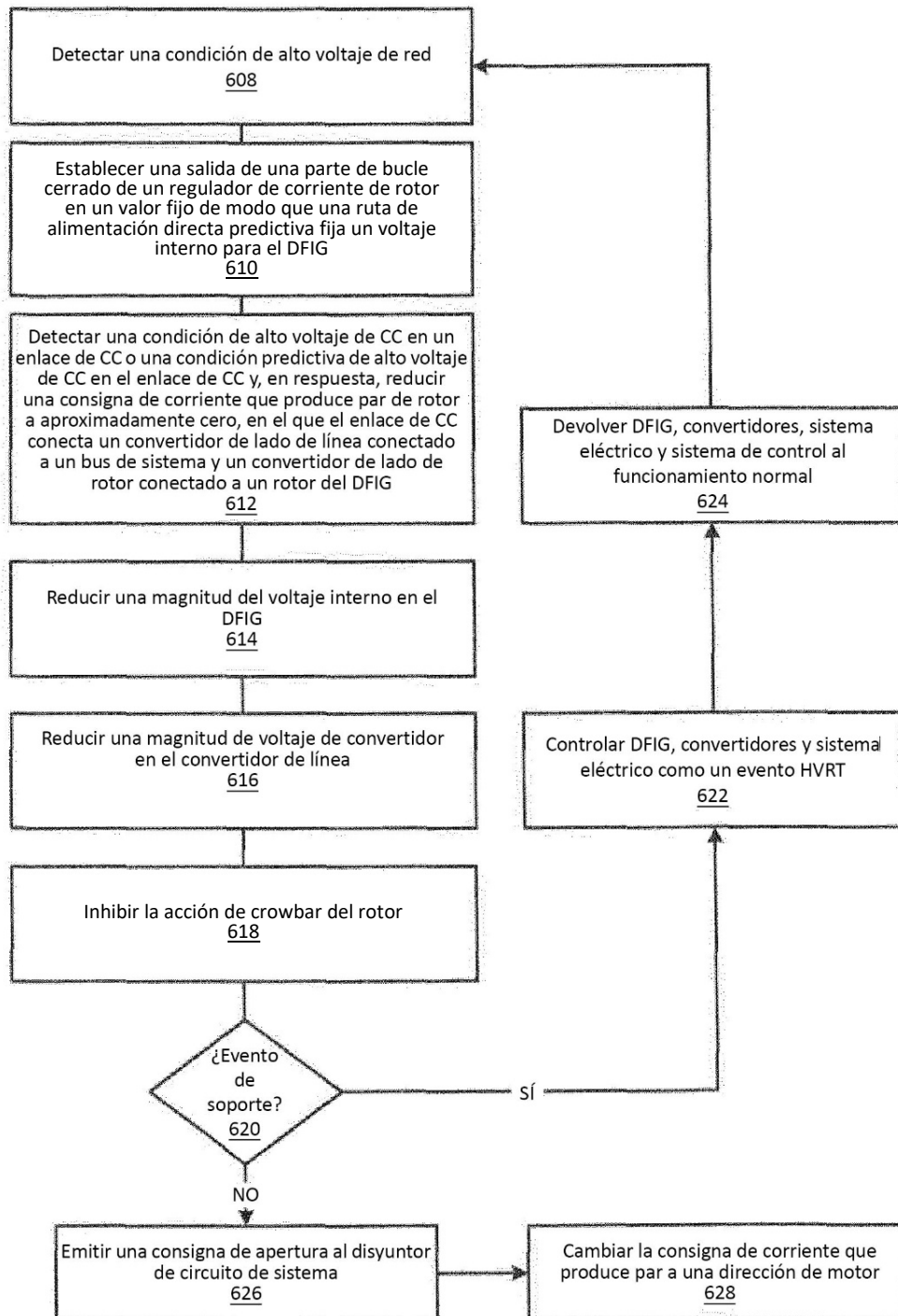


FIG. 6B

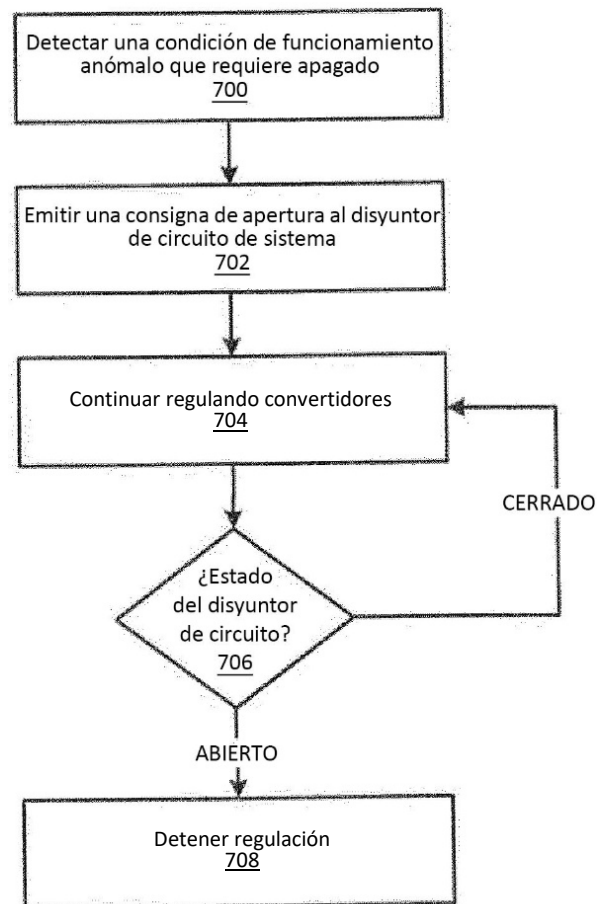


FIG. 7