(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 808 927**

(51) Int. CI.:

H02J 3/26 (2006.01)
F03D 7/02 (2006.01)
F03D 7/04 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.08.2017 E 17184804 (7)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.05.2020 EP 3282538**

(54) Título: **Sistema y procedimiento para controlar una corriente de secuencia negativa en un generador de un aerogenerador**

(30) Prioridad:

08.08.2016 US 201615230536

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
02.03.2021

(73) Titular/es:

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

(72) Inventor/es:

LARSEN, EINAR VAUGHN;
REN, WEI;
HOWARD, DUSTIN y
ACHILLES, ALFREDO SEBASTIAN

(74) Agente/Representante:

CONTRERAS PÉREZ, Yahel

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 una corriente de secuencia negativa en un generador de un aerogenerador

ANTECEDENTES

La presente descripción se refiere, en general, a aerogeneradores y, más particularmente, a un sistema y procedimiento para controlar una corriente de secuencia negativa en un generador de un aerogenerador.

La energía eólica se considera una de las fuentes de energía más limpias y respetuosas con el medio ambiente actualmente disponibles, y los aerogeneradores han ganado una mayor atención a este respecto. Un aerogenerador moderno típicamente incluye una torre, un generador, un multiplicador, una góndola, y una o más palas de rotor. Las palas de rotor capturan energía cinética del viento utilizando principios de perfil aerodinámico conocidos. Por ejemplo, las palas del rotor tienen típicamente el perfil en sección transversal de una superficie aerodinámica de manera que, durante el funcionamiento, el aire fluye sobre la pala produciendo una diferencia de presión entre los lados. En consecuencia, sobre la pala actúa una fuerza de sustentación, que es dirigida desde un lado de presión hacia un lado de succión. La fuerza de sustentación genera un par en el eje del rotor principal que es dirigido hacia un generador para producir electricidad.

Durante el funcionamiento, el viento impacta sobre las palas de rotor y las palas transforman la energía del viento en un par de rotación mecánico que acciona en rotación un eje de baja velocidad. El eje de baja velocidad está configurado para accionar el multiplicador que posteriormente aumenta la baja velocidad de rotación del eje de baja velocidad para accionar un eje de alta velocidad a una mayor velocidad de rotación. El eje de alta velocidad generalmente está acoplado de manera giratoria a un generador para accionar en rotación un rotor del generador. Como tal, el rotor del generador puede inducir un campo magnético giratorio y puede inducirse una tensión dentro de un estator del generador que esté acoplado magnéticamente al rotor del generador. La energía eléctrica asociada puede transmitirse a un transformador principal que normalmente está conectado a una red eléctrica a través de un interruptor de red. Por lo tanto, el transformador principal aumenta la amplitud de tensión de la energía eléctrica de modo que la energía eléctrica transformada pueda transmitirse a la red eléctrica.

En muchos aerogeneradores, el generador puede estar conectado eléctricamente a un conversor de corriente bidireccional que incluye un conversor del lado del rotor unido a un conversor del lado de la línea a través de un enlace de CC regulado. Además, los sistemas de alimentación de los aerogeneradores pueden incluir una variedad de tipos de generadores incluyendo, entre otros, un generador asíncrono doblemente alimentado (DFAG).

El funcionamiento del DFAG se caracteriza típicamente porque el circuito del rotor recibe corriente de un conversor de corriente regulado por corriente. Como tal, el conversor de corriente puede proporcionar una regulación casi instantánea de sus corrientes de salida respecto a la frecuencia de la red. En condiciones de funcionamiento estables, el conversor del lado del rotor controla la magnitud y la fase de las corrientes en el circuito del rotor para obtener los valores deseados de par electromagnético. También puede controlarse el flujo de potencia reactiva hacia los terminales del estator conectados al cable del generador.

En la figura 1 se ilustra un diagrama esquemático simplificado de una realización de un circuito principal 10 de un DFAG. Tal como se muestra, el circuito principal 10 incluye un generador 12 conectado a un conversor de corriente 14 (así como cualquier electrónica de potencia requerida) y un transformador 16 que está conectado a una red eléctrica18. Más específicamente, tal como se muestra, la conexión a la red eléctrica 18 está en el lado alto del transformador 16, donde la tensión y la corriente se indican como VG e IG, respectivamente. Además, la red eléctrica 18 se ilustra conceptualmente como un equivalente de Thevenin (Th). Tal como utiliza aquí, el equivalente de Thevenin se refiere, en general, a una fuente de tensión equivalente en conexión en serie con una impedancia que es una aproximación de una red compleja no lineal que varía constantemente de acuerdo con el número de aerogeneradores, el estado de la red externa, etc. La impedancia de Thevenin ZTh varía con el número de aerogeneradores en funcionamiento y el estado del sistema de transmisión más allá del parque eólico.

Cuando se produce un desequilibrio en la red eléctrica 18, aparece una componente de tensión de secuencia negativa en la tensión de Thevenin, la cual se ha representado en la figura 1 como VTh. Dicha componente de tensión de secuencia negativa puede tener un impacto negativo sobre la red eléctrica 18 así como el sistema de alimentación del aerogenerador. Como tal, sería ventajoso disponer de una metodología de control para reaccionar a esta componente de tensión de secuencia negativa para compensar cualquier impacto negativo.

En los sistemas de la técnica anterior, tal como el que se describe en WO 2012/062327, el sistema de control a menudo se diseña para atenuar la componente de secuencia negativa de la corriente que pasa por el equipo como resultado del desequilibrio en la red eléctrica 18. Si bien esto reduce el trabajo en el equipo, no es necesariamente lo

mejor para el sistema eléctrico al que está conectado. US 2015/300320 A1 describe una instalación de energía eólica y un procedimiento para inyectar energía eléctrica.

Como tal, sería ventajoso un sistema y un procedimiento mejorados para proporcionar un control de secuencia negativa que haga que el aerogenerador siga una relación prescrita entre la tensión VG y la corriente IG. Por ejemplo, sería deseable un esquema de control de secuencia negativa que haga que la relación entre la tensión VG y la corriente IG sea de naturaleza inductiva, similar a cómo reaccionaría una máquina síncrona conectada directamente.

Por lo tanto, la presente descripción está dirigida a controlar una secuencia de corriente negativa en el DFAG del aerogenerador que trate los problemas mencionados anteriormente.

Varios aspectos y ventajas de la invención se expondrán en parte en la siguiente descripción, o pueden quedar claros a partir de la descripción, o pueden derivarse al poner en práctica la invención.

La presente invención se define por las reivindicaciones adjuntas.

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 forman parte de esta memoria, ilustran unas realizaciones de la invención y, junto con la descripción, sirven para explicar los principios de la invención.

En los dibujos:

La figura 1 ilustra un diagrama esquemático simplificado de una realización de un circuito principal de acuerdo con la presente descripción;

La figura 2 ilustra una vista en perspectiva de una parte de una realización de un aerogenerador de acuerdo con la presente descripción;

La figura 3 ilustra una vista esquemática de una realización de un sistema de corriente eléctrica adecuado para utilizarse con el aerogenerador mostrado en la figura 2;

La figura 4 ilustra un diagrama de bloques de una realización de un controlador adecuado para utilizarse con el aerogenerador mostrado en la figura 2;

La figura 5 ilustra un diagrama esquemático de una realización de un esquema de control de acuerdo con la presente descripción, que ilustra particularmente un regulador de secuencia negativa;

La figura 6 ilustra un diagrama esquemático de una realización de un esquema de control para detectar y transformar señales eléctricas medidas en componentes de secuencia negativa de acuerdo con la presente descripción; y

La figura 7 ilustra un diagrama esquemático detallado de una realización de un regulador de secuencia negativa de acuerdo con la presente descripción.

Se hará referencia en detalle ahora a unas realizaciones de la invención, uno o más ejemplos de las cuales se ilustran en los dibujos. Cada ejemplo se da a modo de explicación de la invención, no de limitación de la invención.

De manera general, la siguiente descripción va dirigida a un sistema y un procedimiento para reaccionar ante una tensión de secuencia negativa que se produce en una red eléctrica. Más específicamente, el procedimiento incluye determinar, a través de un regulador de secuencia negativa programado en un controlador del sistema de corriente eléctrica, una componente de secuencia negativa de por lo menos una condición eléctrica del sistema de corriente eléctrica. Además, el procedimiento incluye determinar una respuesta de corriente deseada en base a la componente de secuencia negativa de por lo menos una condición eléctrica del sistema de corriente eléctrica. Por lo tanto, el procedimiento también incluye determinar un comando de control para el conversor de corriente en función de la respuesta de corriente deseada para así lograr una relación deseada entre una componente de secuencia negativa de la condición de tensión en la red eléctrica y la componente de secuencia negativa de la condición eléctrica del sistema de corriente eléctrica.

Haciendo referencia ahora a los dibujos, la figura 2 ilustra una vista en perspectiva de una parte de un aerogenerador de ejemplo 100 de acuerdo con la presente descripción que está configurada para implementar el procedimiento tal como se describe aquí. El aerogenerador 100 incluye una góndola 102 que típicamente aloja un

generador (no mostrado). La góndola 102 está montada en una torre 104 que presenta cualquier altura adecuada que facilite el funcionamiento del aerogenerador 100 tal como se describe aquí. El aerogenerador 100 también incluye un rotor 106 que incluye tres palas 108 acopladas a un buje giratorio 110. Alternativamente, el aerogenerador 100 puede incluir cualquier número de palas 108 que faciliten el funcionamiento del aerogenerador 100 tal como se describe aquí.

Haciendo referencia a la figura 3, se ilustra una vista esquemática de una realización de un sistema de corriente eléctrica 200 que puede utilizarse con el aerogenerador 100. Durante el funcionamiento, el viento impacta en las palas 108 y las palas 108 transforman la energía eólica en un par de rotación mecánico que acciona en rotación un eje de baja velocidad 112 a través del buje 110. El eje de baja velocidad 112 está configurado para accionar un multiplicador 114 que posteriormente aumenta la baja velocidad de rotación del eje de baja velocidad 112 para accionar un eje de alta velocidad 116 a una mayor velocidad de rotación. El eje de alta velocidad 116 está generalmente acoplado de manera giratoria a un generador 118 para accionar en rotación un rotor del generador 122. En una realización, el generador 118 puede ser un generador de inducción (asíncrono) trifásico doblemente alimentado de rotor bobinado (DFAG) que incluye un estator del generador 120 acoplado magnéticamente a un rotor del generador 122. Como tal, el rotor del generador 122 puede inducir un campo magnético giratorio y puede inducir una tensión dentro de un estator generador 120 que está acoplado magnéticamente al rotor del generador 122. En una realización, el generador 118 está configurado para convertir la energía mecánica de rotación en una señal de energía eléctrica de corriente alterna (CA) trifásica sinusoidal en el estator del generador 120. La energía eléctrica asociada puede transmitirse a un transformador principal 234 a través de un bus del estator 208, un interruptor de sincronización del estator 206, un bus del sistema 216, un disyuntor principal 214, y un bus del lado del generador 236. El transformador principal 234 aumenta la amplitud de la tensión de la energía eléctrica de manera que la energía eléctrica transformada puede transmitirse a una red a través de un disyuntor de la red 238, un bus de lado del disyuntor 240, y un bus de la red 242.

Además, el sistema de corriente eléctrica 200 puede incluir un controlador del aerogenerador 202 configurado para controlar cualquiera de los componentes del aerogenerador 100 y/o implementar las etapas del procedimiento tal como se describe aquí. Por ejemplo, tal como se muestra particularmente en la figura 4, el controlador 202 puede incluir uno o más procesadores 204 y unos dispositivos de memoria asociados 207 configurados para realizar una variedad de funciones implementadas por ordenador (por ejemplo, realizar los procedimientos, etapas, cálculos y similares y almacenar datos relevantes tal como se describe aquí). Además, el controlador 202 también puede incluir un módulo de comunicaciones 209 para facilitar las comunicaciones entre el controlador 202 y los diversos componentes del aerogenerador 100, por ejemplo, cualquiera de los componentes de la figura 3. Además, el módulo de comunicaciones 209 puede incluir una interfaz de sensores 211 (por ejemplo, uno o más conversores analógico a digital) para permitir que las señales transmitidas desde uno o más sensores se conviertan en señales que los procesadores 204 puedan entender y procesar. Debe apreciarse que los sensores (por ejemplo, los sensores 252, 254, 256, 258) pueden estar conectados comunicativamente al módulo de comunicaciones 209 utilizando cualquier medio adecuado. Por ejemplo, tal como se muestra en la figura 4, los sensores 252, 254, 256, 258 pueden estar conectados a la interfaz de sensores 211 a través de una conexión por cable. Sin embargo, en otras realizaciones, los sensores 252, 254, 256, 258 pueden estar conectados a la interfaz de sensores 211 a través de una conexión inalámbrica, tal como mediante el uso de cualquier protocolo de comunicaciones inalámbricas adecuado conocido en la técnica. Como tal, el procesador 204 puede configurarse para recibir una o más señales de los sensores.

Tal como se utiliza aquí, el término "procesador" se refiere no sólo 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 lógico programable (PLC), un circuito integrado específico de la aplicación y otros circuitos programables. El procesador 204 también está configurado para calcular algoritmos de control avanzados y comunicarse con una variedad de protocolos basados en Ethernet o en serie (Modbus, OPC, CAN, etc.). Además, el (los) dispositivo(s) de memoria 207 generalmente puede(n) comprender elemento(s) de memoria que incluyen un medio legible por ordenador (por ejemplo, memoria de acceso aleatorio (RAM)), un medio no volátil legible por ordenador (por ejemplo, una memoria flash), un disquete, una memoria de sólo lectura de disco compacto (CD-ROM), un disco magnetoóptico (MOD), un disco versátil digital (DVD), y/u otros elementos de memoria adecuados, pero sin limitarse a éstos. Dichos dispositivos de memoria 207 generalmente pueden configurarse para almacenar instrucciones adecuadas legibles por ordenador que, cuando se implementan por el procesador o procesadores 204, configuran el controlador 202 para realizar las diversas funciones tal como se describe aquí.

Haciendo referencia de nuevo a la figura 3, el estator del generador 120 puede estar conectado eléctricamente a un interruptor de sincronización del estator 206 a través de un bus del estator 208. En una realización, el rotor del generador 122 puede estar conectado eléctricamente a un conjunto conversor de corriente bidireccional 210 o un conversor de corriente a través de un bus del rotor 212. Alternativamente, el rotor del generador 122 puede estar conectado eléctricamente al bus del rotor 212 a través de cualquier otro dispositivo que facilite el funcionamiento del sistema de corriente eléctrica 200 tal como se describe aquí. En otra realización, el interruptor de sincronización del

estator 206 puede estar conectado eléctricamente a un disyuntor del transformador principal 214 a través de un bus del sistema 216.

El conjunto conversor de corriente 210 puede incluir un filtro de rotor 218 que esté conectado eléctricamente al rotor del generador 122 a través del bus del rotor 212. Además, el filtro de rotor 218 puede incluir un reactor del lado del rotor. Un bus de filtro de rotor 219 conecta eléctricamente el filtro de rotor 218 a un conversor de corriente del lado del rotor 220. Además, el conversor de corriente del lado del rotor 220 puede estar conectado eléctricamente a un conversor de corriente del lado de la línea 222 a través de un único enlace de corriente continua (CC) 244. Alternativamente, el conversor de corriente del lado del rotor 220 y el conversor de corriente del lado de la línea 222 pueden estar conectados eléctricamente a través de unos enlaces de CC individuales y separados. Además, tal como se muestra, el enlace de CC 244 puede incluir un riel positivo 246, un riel negativo 248, y por lo menos un condensador 250 conectado entre los mismos.

Además, un bus del conversor de corriente del lado de la línea 223 puede conectar eléctricamente el conversor de corriente del lado de la línea 222 a un filtro de línea 224. Además, un bus de línea 225 puede conectar eléctricamente el filtro de línea 224 a un contactor de línea 226. Además, el filtro de línea 224 puede incluir un reactor del lado de la línea. Además, el contactor de línea 226 puede estar conectado eléctricamente a un disyuntor de conversión 228 a través de un bus del disyuntor de conversión 230. Además, el disyuntor de conversión 228 puede estar conectado eléctricamente al disyuntor del transformador principal 214 a través del bus de sistema 216 y un bus de conexión 232. El disyuntor del transformador principal 214 puede estar conectado eléctricamente a un transformador principal de energía eléctrica 234 a través de un bus del lado del generador 236. El transformador principal 234 puede estar conectado eléctricamente a un disyuntor de la red 238 a través de un bus del lado del disyuntor 240. El disyuntor de red 238 puede conectarse a la red de transmisión y distribución de energía eléctrica a través de un bus de red 242.

En funcionamiento, la energía de corriente alterna (CA) generada en el estator del generador 120 mediante la rotación del rotor 106 se proporciona a través de una trayectoria dual al bus de red 242. Las trayectorias duales están definidas por el bus del estator 208 y el bus del rotor 212. En el lado del bus del rotor 212 se suministra energía de CA sinusoidal multifásica (por ejemplo, trifásica) al conjunto conversor de corriente 210. El conversor de corriente del lado del rotor 220 convierte la energía de CA que se proporciona desde el bus del rotor 212 en energía de CC y proporciona corriente de CC al enlace de CC 244. Unos elementos interruptores (por ejemplo, IGBTs) utilizados en circuitos puente del conversor de corriente del lado del rotor 220 pueden modularse para convertir la corriente CA proporcionada desde el bus del rotor 212 en corriente CC adecuada para el enlace de CC 244.

El conversor del lado de la línea 222 convierte la corriente de CC en el enlace de CC 244 en una corriente de salida de CA adecuada para el bus de red eléctrica 242. En particular, pueden modularse unos elementos de conmutación (por ejemplo, IGBTs) utilizados en los circuitos puente del conversor de corriente del lado de la línea 222 para convertir la corriente de CC en el enlace de CC 244 en corriente de CA en el bus del lado de la línea 225. La corriente de CA del conjunto conversor de corriente 210 puede combinarse con la corriente del estator 120 para proporcionar corriente multifásica (por ejemplo, corriente trifásica) que tiene una frecuencia mantenida sustancialmente a la frecuencia del bus de red eléctrica 242 (por ejemplo, 50 Hz/60 Hz). Debe entenderse que el conversor de corriente del lado del rotor 220 y el conversor de corriente del lado de la línea 222 pueden presentar cualquier configuración utilizando cualquier dispositivo de conmutación que facilite el funcionamiento del sistema de corriente eléctrica 200 tal como se describe aquí.

Además, el conjunto conversor de corriente 210 puede estar conectado en comunicación electrónica de datos con el controlador de la turbina 202 y/o un controlador de conversor separado o integral 262 para controlar el funcionamiento del conversor de corriente del lado del rotor 220 y el conversor de corriente del lado de la línea 222. Por ejemplo, durante el funcionamiento, el controlador 202 puede configurarse para recibir una o más señales de medición de tensión y/o corriente eléctrica del primer conjunto de sensores de tensión y corriente eléctrica 252. Por lo tanto, el controlador 202 puede configurarse para monitorizar y controlar por lo menos algunas de las variables operativas asociadas al aerogenerador 100 a través de los sensores 252. En la realización ilustrada, cada uno de los sensores 252 puede estar conectado eléctricamente a cada una de las tres fases del bus de la red eléctrica 242. Alternativamente, los sensores 252 pueden estar conectados eléctricamente a cualquier parte del sistema de corriente eléctrica 200 que facilite el funcionamiento del sistema de corriente eléctrica 200 tal como se describe aquí. Además de los sensores descritos anteriormente, los sensores también pueden incluir un segundo conjunto de sensores de tensión y corriente eléctrica 254, un tercer conjunto de sensores de tensión y corriente eléctrica 256, un cuarto conjunto de sensores de tensión y corriente eléctrica 258 (todos mostrados en la figura 2), y/o cualquier otro sensor adecuado.

Debe entenderse también que puede emplearse cualquier número o tipo de sensores de tensión y/o corriente eléctrica dentro del aerogenerador 100 y en cualquier ubicación. Por ejemplo, los sensores pueden ser transformadores de corriente, sensores de derivación, bobinas Rogowski, sensores de corriente de efecto Hall, micro

unidades de medida inercial (MIMU) o similares, y/o cualquier otro sensor de tensión o corriente eléctrica adecuado conocido actualmente o que se desarrolle posteriormente en la técnica.

Por lo tanto, el controlador del conversor 262 está configurado para recibir una o más señales de retroalimentación de tensión y/o corriente eléctrica de los sensores 252, 254, 256, 258. Más específicamente, en ciertas realizaciones, las señales de retroalimentación de corriente o tensión pueden incluir por lo menos una de señales de retroalimentación de línea, señales de retroalimentación del conversor del lado de la línea, señales de retroalimentación del conversor del lado del rotor, o señales de retroalimentación del estator. Por ejemplo, tal como se muestra en la realización ilustrada, el controlador del conversor 262 recibe señales de medición de tensión y corriente eléctrica del segundo conjunto de sensores de tensión y corriente eléctrica 254 conectados en comunicación electrónica de datos con el bus del estator 208. El controlador del conversor 262 también puede recibir el tercer y el cuarto conjunto de señales de medición de tensión y corriente eléctrica del tercer y cuarto conjunto de sensores de tensión y corriente eléctrica 256, 258. Además, el controlador del conversor 262 puede configurarse con cualquiera de las características descritas aquí respecto al controlador principal 202. Además, el controlador del conversor 262 puede estar separado o integrado con el controlador principal 202. Como tal, el controlador del conversor 262 está configurado para implementar las diversas etapas del procedimiento tal como se describe aquí y puede configurarse de manera similar al controlador de la turbina 202.

Haciendo referencia ahora a las figuras 5-7, se dan varias ilustraciones para describir adicionalmente los sistemas y procedimientos de la presente descripción. Por ejemplo, la figura 5 ilustra un diagrama esquemático simplificado de una realización de un esquema de control 300 de acuerdo con la presente descripción, que ilustra particularmente un regulador de secuencia negativa 302; La figura 6 ilustra un diagrama esquemático de una realización de un esquema de control 350 para detectar y convertir señales eléctricas medidas en componentes de secuencia negativa; y la figura 7 ilustra un diagrama esquemático detallado de una realización del regulador de secuencia negativa 302 de acuerdo con la presente descripción.

Haciendo referencia en particular a la figura 5, el esquema de control 300 incluye un regulador de secuencia negativa 302 aplicado al conversor de corriente 210. Tal como se muestra, en general, en las figuras, los nombres de variables que incluyen un "2" representan la componente de secuencia negativa de la variable asociada. Por ejemplo, VTh2 representa la componente de secuencia negativa de la tensión Thevenin de la red VTh, etc. Además, UR2_Cmd representa la componente de secuencia negativa del índice de modulación añadida a las contribuciones del índice de modulación de otros controles, por ejemplo, el regulador de corriente del rotor principal. Como tal, las señales ilustradas en las figuras representan cantidades fasoriales sincronizadas con el marco de referencia de secuencia negativa. La sincronización se basa en el bucle bloqueado de fase de secuencia positiva utilizando un doble ángulo para la demodulación y la modulación. Además, se supone que la tensión en la red eléctrica (VG) y la corriente en la red (IG) se miden y se convierten para extraer las componentes de secuencia negativa (VG2 e IG2), lo cual se describe adicionalmente a continuación con referencia a la figura 6.

La componente de secuencia negativa de la tensión de red VTh2 y el comando de control UR2_Cmd contribuyen de manera independiente a la IG2 medida. El efecto neto de las impedancias y las reacciones de control del sistema puede representarse a través de dos términos de admitancia, a saber, YGTh2 e YGR2. Las admitancias YGTh2 e YGR2 son funciones de las impedancias de la máquina, el transformador 234, los filtros, la red externa (ZTh), etc. Además, las admitancias YGTh2 e YGR2 son función de los reguladores de corriente principal de los conversores del lado del rotor y del lado de la línea 220, 222 y el regulador de tensión DC. Como tales, las admitancias YGTh2 e YGR2 varían de acuerdo con las condiciones de funcionamiento, tales como la velocidad y el flujo en la máquina. Esta variación puede gestionarse entendiendo tales relaciones y seleccionando un valor de compromiso para la configuración fija de las admitancias. Las ecuaciones (1) y (2) presentan una realización de procedimientos para calcular las admitancias YGTh2 e YGR2 a partir de pruebas y después compensar ZTh. Por ejemplo, los términos de admitancia representan el efecto neto de la impedancia inherente de la máquina (incluidos los controles) en serie con ZTh.

$$ZGTh2 = 1/YGTh2 = ZGTh2o + ZTh \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$ZGR2 = 1/YGR2 = ZGR2o + ZTh \quad \text{Ecuación (2)}$$

donde

ZGTh2o es igual a 1/YGTh2 cuando ZTh = 0, y
ZGR2o es igual a 1/YGR2 cuando ZTh = 0.

Haciendo referencia ahora a la figura 6, se ilustra un diagrama esquemático de una realización de un esquema de control 350 para detectar y convertir señales eléctricas medidas en componentes de secuencia negativa. Tal como se muestra, las señales o condiciones eléctricas pueden incluir una tensión o una corriente de un estator del generador (VS, IS), una tensión o una corriente de un rotor del generador (VR, IR), una tensión o una corriente de un

conversor del lado de línea del conversor de corriente (VL, IL), una tensión o una corriente de un transformador del sistema de corriente eléctrica (VG, IG), o cualquier otra condición eléctrica del sistema de corriente. Por ejemplo, en la realización ilustrada, se está convirtiendo la tensión del estator VS, la corriente del estator IS, y la corriente del conversor del lado de la línea IL. Más específicamente, la tensión del estator VS, la corriente del estator IS y la corriente del conversor del lado de la línea IL se utilizan para estimar la tensión en el lado alto del transformador VG en el bloque 352. Además, dado que la corriente del estator IS y la corriente del conversor del lado de la línea IL se encuentran a amplitudes de tensión diferentes, el bloque 354 proporciona una relación de transformación para la corriente del conversor del lado de línea IL de modo que las dos corrientes pueden sumarse en 356. La tensión en el lado alto del transformador VG y las corrientes sumadas pueden enviarse a uno o más discriminador(es) positivo(s)/negativo(s) (pos/neg) 358, 360. Además, tal como se muestra, un ángulo de bucle de fase bloqueada θ_{pll} puede factorizarse en el (los) discriminador(es) pos/neg 358, 360. Además, tal como se muestra, la salida del discriminador positivo/negativo (pos/neg) 358, 360 es igual a VG2_fbk e IG2_fbk, respectivamente. Debe entenderse también que VG2_fbk e IG2_fbk pueden medirse directamente y la figura 6 se da solamente con fines ilustrativos.

Haciendo referencia ahora a la figura 7, se ilustra un diagrama esquemático detallado de una realización del regulador de secuencia negativa 302 de acuerdo con la presente descripción. Tal como se muestra, el regulador de secuencia negativa 302 está configurado para determinar una componente de secuencia negativa (por ejemplo, VG2_Fbk, IG2_Fbk) de por lo menos una condición eléctrica (por ejemplo, VG, IG, VS, IS, VR, IR, VL, IL) del sistema de corriente eléctrica 200. Por ejemplo, tal como se muestra, las entradas al regulador de secuencia negativa 302 corresponden a la componente de secuencia negativa de la tensión y la corriente de la red (por ejemplo, VG2_Fbk, IG2_Fbk). Como tal, el regulador de secuencia negativa 302 está configurado para estimar una componente de secuencia negativa de una condición de tensión en la red eléctrica 242 (por ejemplo, VTh2_Fbk) en función de la componente de secuencia negativa de la condición eléctrica del generador (VG2_Fbk, IG2_Fbk) y una impedancia de red (ZTh), tal como se muestra en la siguiente ecuación (3):

$$VTh2_Fbk = VG2_Fbk - ZTh * IG2_Fbk \qquad \text{Ecuación (3)}$$

Además, el regulador de secuencia negativa 302 está configurado para determinar una corriente del regulador (IG2_Reg) en función de la componente de secuencia negativa estimada de la condición de tensión en la red eléctrica 242 (VTh2_Fbk) y una respuesta de corriente deseada (IG2_Cmd). Además, en realizaciones particulares, el regulador de secuencia negativa 302 puede configurarse para determinar la respuesta de corriente deseada IG2_Cmd en función de la componente de secuencia negativa estimada de la condición de tensión en la red eléctrica 242 VTh2_Fbk y una característica de admitancia de secuencia negativa deseada del sistema de corriente eléctrica (Y2RefTh). La referencia para IG2 se determina en base al valor medido de VTh2, el valor de ZTh utilizado en el cálculo de VTh2, y la admitancia deseada tal como se aprecia desde VG mirando hacia el transformador del aerogenerador 234. Como tal, cuando el regulador de secuencia negativa 302 fuerza las corrientes IG2 reales para igualarse a la referencia, el efecto de ZTh se cancela. Sin embargo, el uso de una tensión remota más cercana a la fuente real es para reducir interacciones con la red 242 que pueden dar lugar a inestabilidad, permitiendo, de este modo, una respuesta más rápida. Más específicamente, el cálculo de la respuesta de corriente deseada IG2_Cmd puede entenderse mejor con referencia a las ecuaciones (4) - (5) tal como se muestra a continuación:

$$IG2_Cmd = - VTh2_Fbk * Y2RefTh \qquad \text{Ecuación (4)}$$
$$Y2RefTh = Y2Ref / (1+ Y2Ref * ZTh) \qquad \text{Ecuación (5)}$$

donde

Y2Ref es la admitancia deseada mirando hacia el sistema desde VG, e
Y2RefTh es la admitancia deseada mirando hacia el sistema desde VTh.

Para una característica puramente inductiva en VG y suponiendo un valor puramente inductivo para ZTh, las siguientes ecuaciones (6) - (8) simplifican todavía más las ecuaciones (4) y (5) anteriores.

$$Y2Ref = jB2Ref \qquad \text{Ecuación (6)}$$
$$ZTh = jXTh \qquad \text{Ecuación (7)}$$
$$Y2RefTh = jB2Ref / (1 - B2Ref * XTh) \qquad \text{Ecuación (8)}$$

donde

B2Ref es un número negativo para inductivo.

Dicho requerimiento se da, en general, como una ganancia que representa la magnitud de IG2 a suministrar en función de la tensión a VG2, por unidad. El valor de B2Ref se deriva de esta ganancia. Si el control se implementa por unidad, Zbase es uno, y puede representarse tal como se muestra a continuación en las Ecuaciones (9) y (10).

IG2_Spec = IG2_Gn (VG2) * VG2 Ecuación (9)
B2Ref = - IG2_Gn / Zbase Ecuación (10)

Haciendo referencia todavía a la figura 7, el regulador de secuencia negativa 302 está configurado para determinar la corriente del regulador (IG2_Reg) aplicando una ganancia (IG2_BW) a una señal de error representativa de una diferencia entre la respuesta de corriente deseada (IG2_Cmd) y una respuesta de corriente medida e integrando, a través de un integrador 310, la señal de error para obtener la corriente del regulador IG2_Reg. Más específicamente, la estructura es crear una señal IG2_Reg que se procesará para crear aproximadamente la misma cantidad de IG2_Fbk. Con esta estructura, la ganancia en la trayectoria del corrector IG2_BW representa su ancho de banda.

Además, el regulador de secuencia negativa 302 está configurado para determinar una corriente de predicción (IG2FF_Final) en función de la componente de secuencia negativa estimada de la condición de tensión en la red eléctrica (VTh2_Fbk). Como tal, la corriente del predictor IG2FF_Final proporciona un valor para la salida del regulador que, de ser perfecto, llevaría la corriente real al valor comandado. Se trata de la componente de compensación del comando de control UR2_Cmd. Más específicamente, en ciertas realizaciones, el regulador de secuencia negativa 302 puede determinar la corriente del predictor (IG2FF_Final) multiplicando la componente de secuencia negativa estimada de la condición de tensión en la red eléctrica 242 (VTh2_Fbk) y una admitancia de secuencia negativa no compensada del sistema de corriente eléctrica 200 (YGTh2), sumando el valor multiplicado con la respuesta de corriente deseada (IG2_Cmd), filtrando el valor sumado (IG2FF_WFlt) a través de un filtro 304 a un ancho de banda predeterminado (IG2FF_Flt). En ciertas realizaciones, el filtro 304 (por ejemplo, un filtro de paso bajo) se dispone en la estructura como un medio para atenuar el ruido de alta frecuencia. Como tal, el ancho de banda del filtro IGFF_Wfilt puede ser alto, por ejemplo, por encima de 300 r/s. Además, tal como se muestra, el regulador de secuencia negativa 302 puede limitar el valor filtrado (IG2FF_Flt) en el bloque 306 a través de una ganancia (IG2FF_Gn) para obtener la corriente del predictor IG2FF_Final. En realizaciones particulares, la ganancia IG2FF_Gn se establecería en un valor menor que la unidad, por ejemplo, 0,8, y se ajustaría según sea necesario.

En otras realizaciones, el regulador de secuencia negativa 302 también puede configurarse para generar una corriente de compensación (IGFF_Comp) para reducir la tendencia del predictor a reaccionar de manera desproporcionada. Además, tal como se muestra, el regulador de secuencia negativa 302 puede configurarse para generar un valor compensador (IGFF_WComp) a través de un filtro 314. Más específicamente, en ciertas realizaciones, esta función puede utilizar un filtro de paso bajo en la salida de compensación final (IG2FF_Wcomp) para estimar el retardo antes de ver la reacción en IG2_Fbk. Este retardo de tiempo se vería en las pruebas realizadas para medir YGR2. Como tal, el regulador de secuencia negativa 302 puede configurarse para generar la corriente de compensación IGFF_Comp en base a la corriente del predictor IG2FF_Final y el valor del compensador filtrado (IGFF_WComp).

Como tal, el regulador de secuencia negativa 302 está configurado, además, para determinar una salida de corriente (IG2_Tot) basada en la corriente del predictor (IG2FF_Final) y la corriente del regulador (IG2_Reg). Más específicamente, tal como se muestra en 312, el regulador de secuencia negativa 302 puede configurarse para determinar la salida de corriente IG2_Tot sumando la corriente del predictor IG2FF_Final y la corriente del regulador IG2_Reg, que representa el valor de IG2 que está solicitando el regulador, suponiendo que el procesamiento siguiente es perfecto.

Por lo tanto, el regulador de secuencia negativa 302 también está configurado para determinar un comando de control (UR2_Cmd) para el conversor de corriente 210 en función de la salida de corriente (IG2_Tot) para lograr una relación deseada entre la componente de secuencia negativa de la condición de tensión en la red eléctrica (VTh2_Fbk) y la componente de secuencia negativa de la condición eléctrica del generador 118 (IG2_Fbk), por ejemplo, la componente de secuencia negativa de la corriente. Por ejemplo, en una realización, el comando de control UR2_Cmd puede incluir un comando de índice de modulación (UR2_Cmd) para el conversor de corriente 210.

Además, tal como se muestra, el regulador de secuencia negativa 302 puede configurarse adicionalmente para convertir la salida de corriente IG2_Tot a un valor de tensión (VR2_Tot) a través de una o más etapas de procesamiento posterior tal como se muestra en 316. Para ciertas realizaciones, el procesamiento posterior se completa a través de una ganancia compleja ZGR2, que es una estimación de la inversa de YGR2. Además, el regulador de secuencia negativa 302 está configurado para determinar el comando de índice de modulación UR2_Cmd para el conversor de corriente 210 en función del valor de tensión VR2_Tot.

En realizaciones particulares, puede incluirse una característica de ajuste de fase en el cálculo de ZGR2 para permitir el ajuste ya que la fase de esta función puede ser más importante para la estabilidad que la ganancia. Más específicamente, ZGR2 puede calcularse de acuerdo con la siguiente ecuación (11):

$$ZGR2 = 1/YGR2_avg * \exp(j\ ThetaZGR2trim) \quad \text{Ecuación (11)}$$

donde

YGR2_avg es el promedio de mediciones de YGR2 sobre el rango operativo deseado, y
ThetaZGR2trim es el ángulo para cambiar de YGR2_avg.

Haciendo referencia todavía a la figura 7, tal como se muestra en 318, el regulador de secuencia negativa 302 también puede configurarse para dividir el valor de tensión VR2_Tot por una tensión de enlace de CC (Vdc_Fbk) del conversor de corriente 210 para obtener el comando de índice de modulación (UR2_Cmd). Por ejemplo, en ciertas realizaciones, el regulador de secuencia negativa 302 puede convertir la salida de corriente IG2_Tot en el índice de modulación apropiado utilizando ZGR2 y/o dividiendo por VrGn, que representa un cambio en unidades desde el índice de modulación a tensión por unidad, que depende de la tensión de CC medida y la tensión del rotor base (es decir, valor RMS de línea a línea), tal como se muestra en la siguiente Ecuación (12):

$$VrGn = Vdc_Fbk / (sqrt(2) * VRBASE) \quad \text{Ecuación (12)}$$

En otras realizaciones, el regulador de secuencia negativa 302 también puede incluir una lógica de límite 320 configurada para limitar el comando de índice de modulación UR2_Cmd para el conversor de corriente 210 de modo que el comando de índice de modulación UR2_Cmd no provoque "*windup*". Más específicamente, las etapas anteriores pueden crear un valor ilimitado del comando de índice de modulación (UR2_Unlim). Si la magnitud de UR2_Unlim excede el límite asignado para la componente de secuencia negativa, entonces se requiere limitación. Como tal, la lógica de límite 320 está configurada para restringir las componentes de UR2 de manera que se retenga la relación de fase de las componentes real e imaginaria. Más específicamente, cada una de las señales ilustradas en las figuras 5-7 representa números complejos que tienen componentes reales e imaginarias. Como tal, la lógica de límite 320 está configurada para limitar el comando de índice de modulación para el conversor de corriente 210 de modo que el comando de índice de modulación mantenga los valores relativos de las dos componentes de la señal (es decir, real e imaginaria). Además, para evitar "*windup*", la lógica de límite 320 puede calcular un factor que se utilice como multiplicador en ubicaciones apropiadas. Por ejemplo, en ciertas realizaciones, el factor UR2LimFactor puede definirse de acuerdo con la siguiente Ecuación (13):

$$UR2LimFactor = \min(1{,}0,\ UR2Lim/sqrt(UR2x_Unlim^2+UR2y_Unlim^2)) \quad \text{Ecuación (13)}$$

Este factor será igual a uno salvo que la magnitud de UR2_Unlim exceda el límite UR2Lim. De lo contrario, el factor será menor que uno. La siguiente ecuación (14) representa cómo puede utilizarse el factor:

$$UR2_Cmd = UR2_Unlim * UR2LimFactor \quad \text{Ecuación (14)}$$

Para un "*anti-windup*" de los integradores, el factor puede aplicarse de manera similar para modificar sus salidas antes de ejecutar la siguiente etapa, tal como se muestra en las siguientes ecuaciones (15) y (16):

$$IG2Reg = IG2Reg * UR2LimFactor \quad \text{Ecuación (15)}$$
$$IG2FF_Filt = IG2FF_Filt * UR2LimFactor \quad \text{Ecuación (16)}$$

Como tal, la presente descripción proporciona un control de secuencia negativa que hace que el sistema de corriente eléctrica (por ejemplo, el sistema de corriente del aerogenerador 200 de la figura 3) siga una relación prescrita entre la tensión VG y la corriente IG.

Esta descripción escrita utiliza ejemplos para describir la invención, incluyendo el modo preferido, y también para permitir que cualquier persona experta en la materia ponga en práctica la invención, incluyendo la fabricación y el uso de cualquier dispositivo o sistema y la realización de cualquier procedimiento incorporado.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para controlar un sistema de corriente eléctrica (200) conectado a una red eléctrica (242), presentando el sistema de corriente eléctrica (200) un conversor de corriente (210) conectado eléctricamente a un generador (118), comprendiendo el procedimiento:

determinar, a través de un regulador de secuencia negativa (302) programado en un controlador (202) del sistema de corriente eléctrica (200), componentes de secuencia negativa de la tensión y corriente de la red eléctrica a la que está conectado el sistema de corriente; estimar una componente de secuencia negativa de una tensión de Thevenin relacionada con la red eléctrica, en base a las componentes de secuencia negativa de la tensión y la corriente de la red eléctrica y una impedancia de red relacionada con la red eléctrica;
determinar una respuesta de corriente deseada en función de la componente de secuencia negativa estimada de la tensión de Thevenin relacionada con la red eléctrica y una característica de admitancia de secuencia negativa deseada del sistema de corriente eléctrica; y
determinar un comando de control para el conversor de corriente (210) en función de la respuesta de corriente deseada.

2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que el comando de control comprende un comando de índice de modulación para el conversor de corriente (210).

3. Procedimiento de acuerdo con de las reivindicaciones 1 o 2, caracterizado por el hecho de que comprende, además, estimar, a través del regulador de secuencia negativa (302) programado en el controlador (202) del sistema de corriente eléctrica (200), una componente de secuencia negativa de la condición de tensión en la red eléctrica (242) en función de la componente de secuencia negativa de la condición eléctrica del sistema de corriente eléctrica (200) y un parámetro de red.

4. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 3, caracterizado por el hecho de que comprende, además:

determinar por lo menos una de una corriente del predictor o una corriente del regulador en función de la componente de secuencia negativa estimada de la condición de tensión en la red eléctrica (242) y la respuesta de corriente deseada,
determinar una salida de corriente basada en por lo menos una de la corriente del predictor o la corriente del regulador, y
determinar el comando de control para el conversor de corriente (210) en función de la salida de corriente.

5. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, caracterizado por el hecho de que determinar la corriente del regulador comprende, además:

aplicar una ganancia a una señal de error representativa de una diferencia entre la respuesta de corriente deseada y una respuesta de corriente medida; e
integrar, a través de un integrador en el regulador de secuencia negativa (302), la señal de error para obtener la corriente del regulador.

6. Procedimiento de acuerdo con de las reivindicaciones 4 o 5, caracterizado por el hecho de que determinar la corriente del predictor comprende, además:

multiplicar la componente de secuencia negativa estimada de la condición de tensión en la red eléctrica (242) y una admitancia de secuencia negativa no compensada del sistema de corriente eléctrica (200);
sumar el valor multiplicado con la respuesta de corriente deseada;
filtrar el valor sumado a través de un filtro a un ancho de banda predeterminado; y
limitar a través de una ganancia, el valor filtrado para obtener la corriente del predictor.

7. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 6, caracterizado por el hecho de que comprende, además, generar una corriente de compensación basada en la corriente del predictor y un valor compensador filtrado.

8. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 2 y cualquiera de las reivindicaciones 4 a 6, caracterizado por el hecho de que comprende, además, convertir la salida de corriente a un valor de tensión y determinar el comando de índice de modulación para el conversor de corriente (210) en función del valor de tensión.

9. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 8, caracterizado por el hecho de que comprende, además, dividir el valor de tensión por una tensión de enlace de CC del conversor de corriente (210) para obtener el comando de índice de modulación.

10. Procedimiento de acuerdo con de la reivindicación 9, caracterizado por el hecho de que comprende, además, limitar el comando de índice de modulación para el conversor de corriente (210) de modo que el comando de índice de modulación mantenga valores relativos de la señal y no provoque "*windup*".

11. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por el hecho de que por lo menos una condición eléctrica del sistema de corriente eléctrica (200) comprende por lo menos una de una tensión o una corriente de un estator del generador (118), un rotor del generador (118), un conversor del lado de línea del conversor de corriente (210), o un transformador del sistema de corriente eléctrica (200).

12. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por el hecho de que el generador (118) comprende un generador asíncrono doblemente alimentado (118) (DFAG).

13. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por el hecho de que el sistema de corriente eléctrica (200) forma parte de un sistema de corriente de un aerogenerador.

14. Sistema de corriente eléctrica (200), que comprende:

un transformador conectado a una red eléctrica (242);
un generador (118) conectado eléctricamente al transformador, comprendiendo el generador (118) un rotor y un estator;
un conversor de corriente (210) conectado eléctricamente al transformador y al generador (118); y caracterizado por:
un controlador (202) configurado para controlar el sistema de corriente eléctrica (200), comprendiendo el controlador (202) un regulador de secuencia negativa (302) programado en el mismo, estando configurado el regulador de secuencia negativa (302) para realizar las siguientes operaciones:

determinar componentes de secuencia negativa de la tensión y la corriente de la red eléctrica a la que está conectado el sistema eléctrico; estimar una componente de secuencia negativa de una tensión de Thevenin relacionada con la red eléctrica, en base a los componentes de secuencia negativa de la tensión y la corriente de la red eléctrica y una impedancia de red relacionada con la red eléctrica;
determinar una respuesta de corriente deseada en función de la componente de secuencia negativa estimada de la tensión de Thevenin relacionada con la red eléctrica y una característica de admitancia de secuencia negativa deseada del sistema de corriente eléctrica; y
determinar un comando de control para el conversor de corriente (210) en función de la respuesta de corriente deseada.

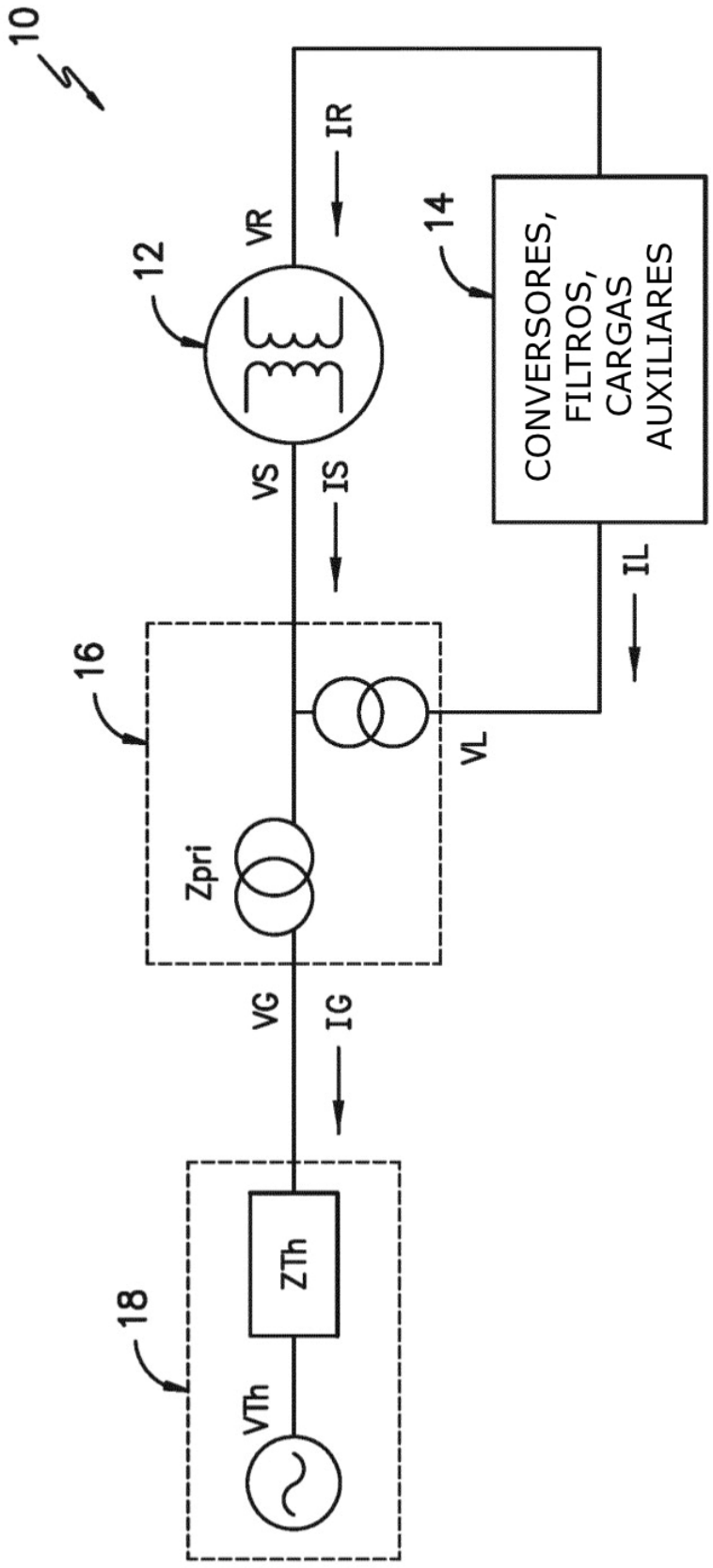
10
12
VR
IR
14
CONVERSORES,
FILTROS,
CARGAS
AUXILIARES
VS
IS
IL
16
VL
Zpri
VG
IG
18
ZTh
VTh

FIG. -1-

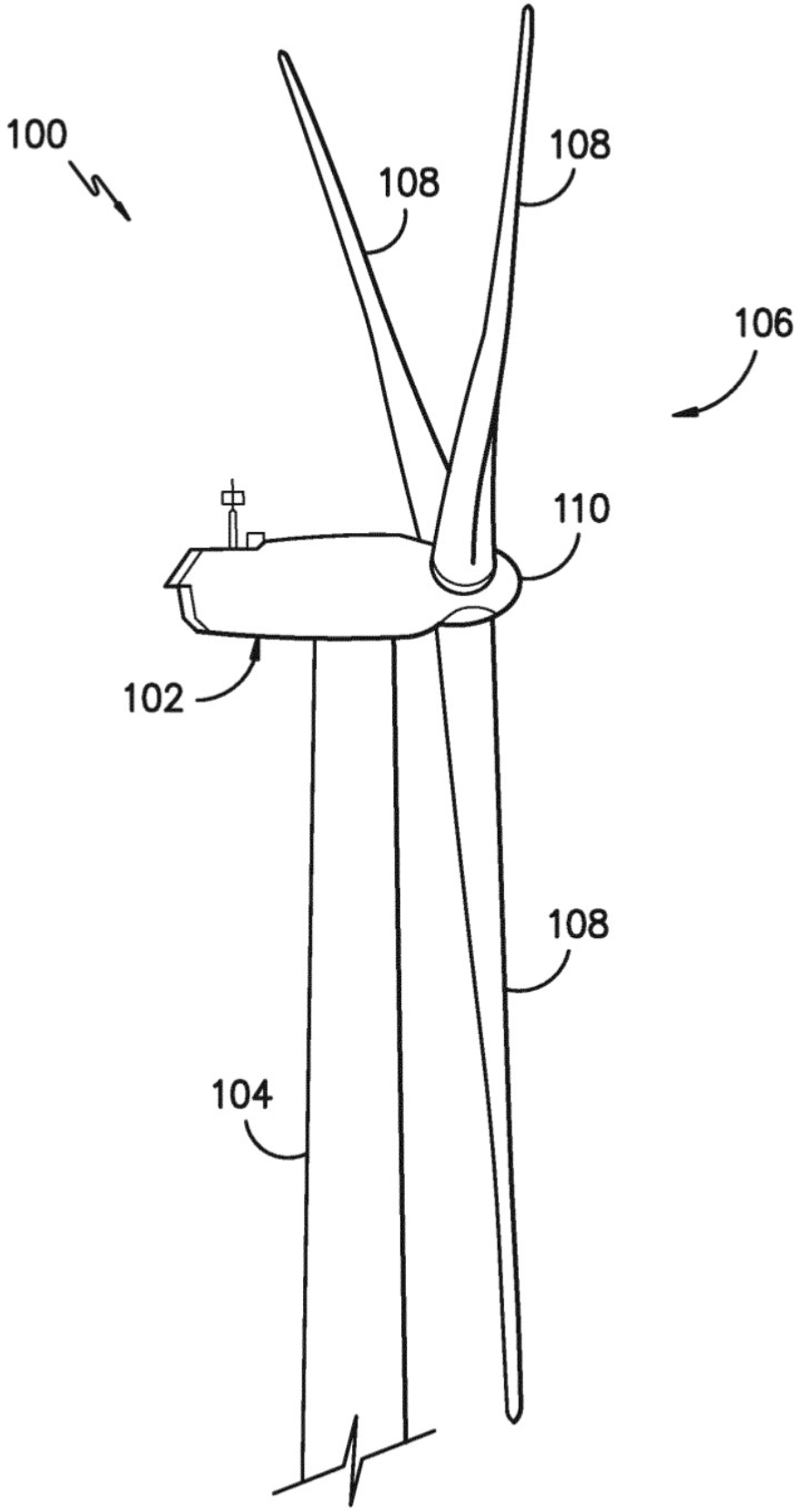

FIG. -2-

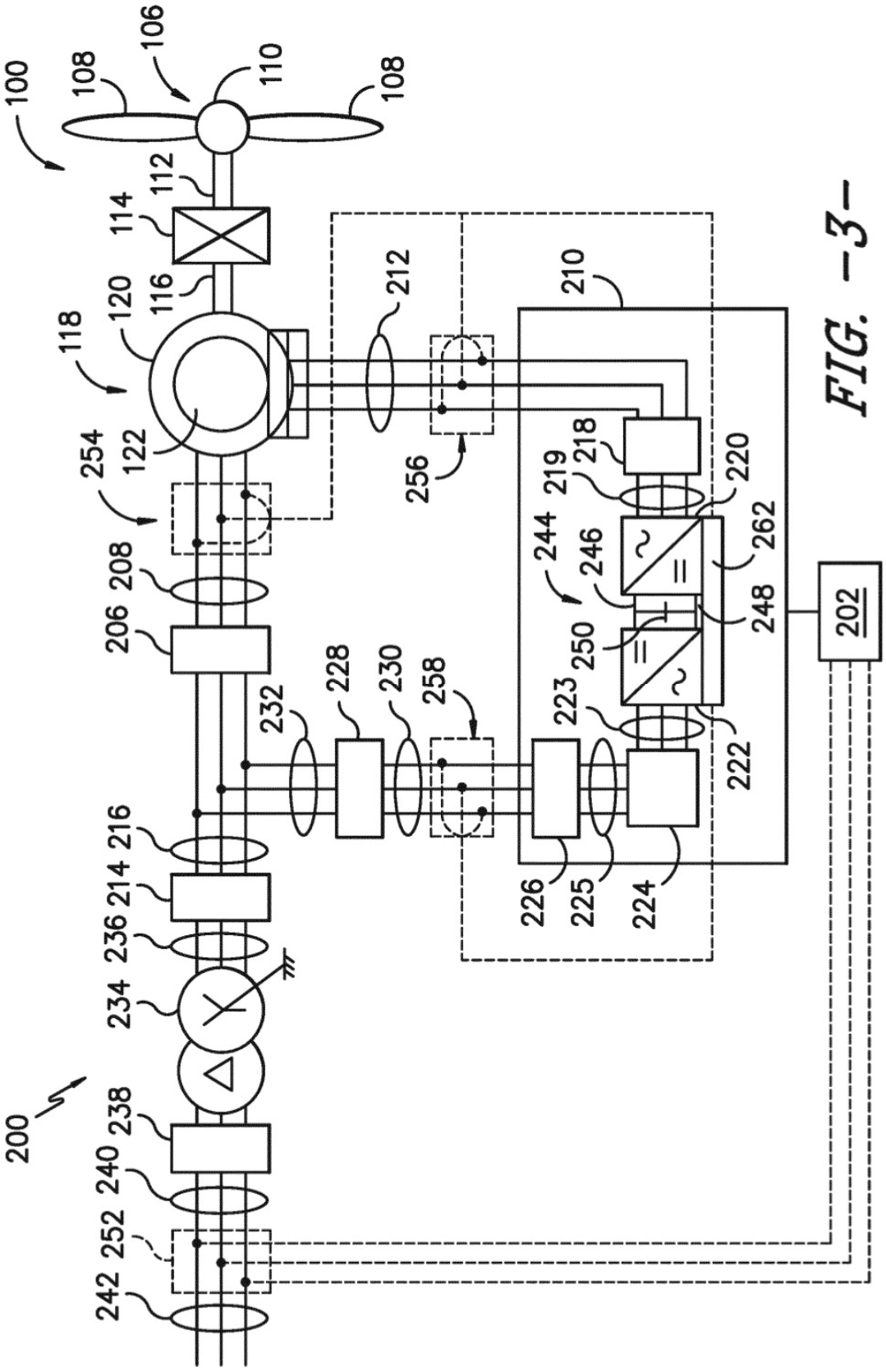
100
108
106
110
108
112
114
116
120
118
122
254
208
206
212
210
256
218
219
220
244
246
262
248
250
202
228
230
258
232
223
222
216
214
236
234
226
225
224
238
240
252
242
200

FIG. -3-

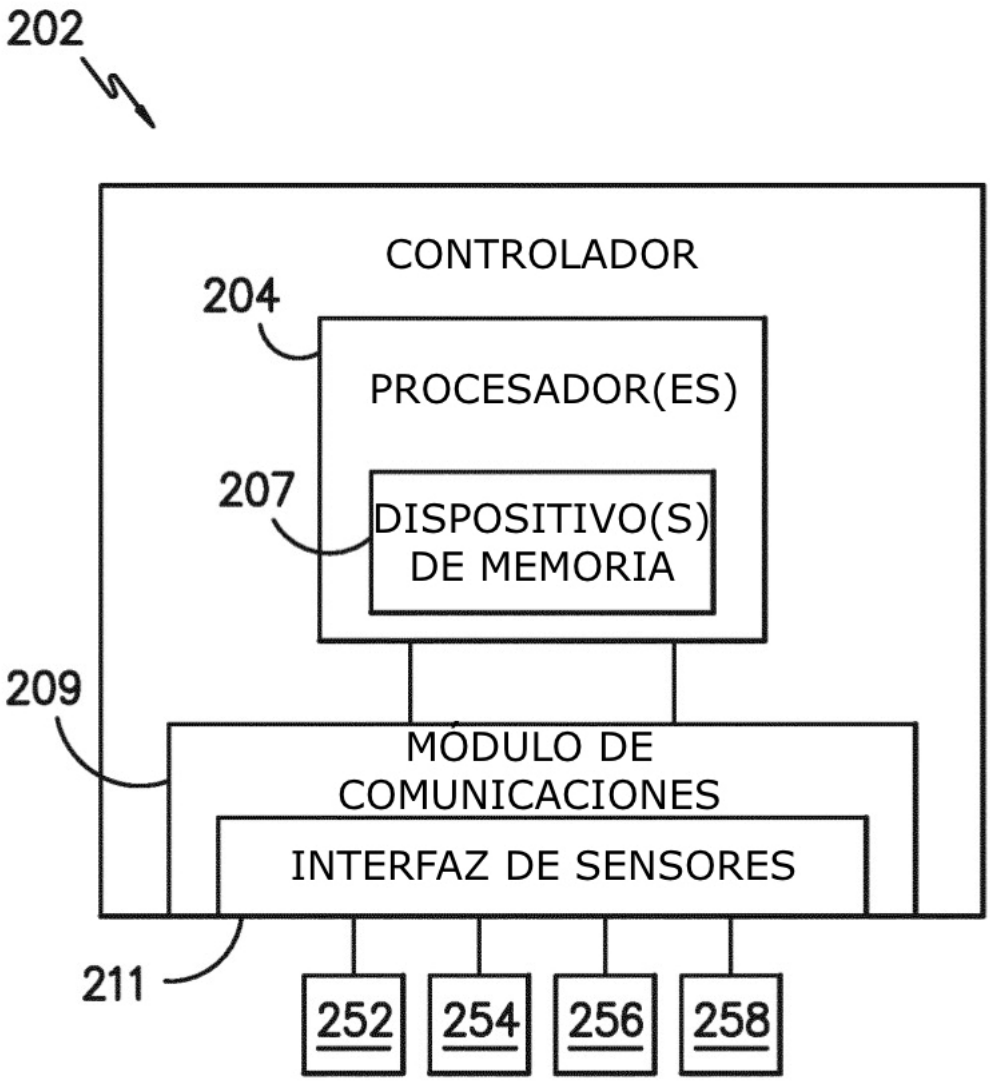
202
CONTROLADOR
204
PROCESADOR(ES)
207
DISPOSITIVO(S) DE MEMORIA
209
MÓDULO DE COMUNICACIONES
INTERFAZ DE SENSORES
211
252
254
256
258

FIG. -4-

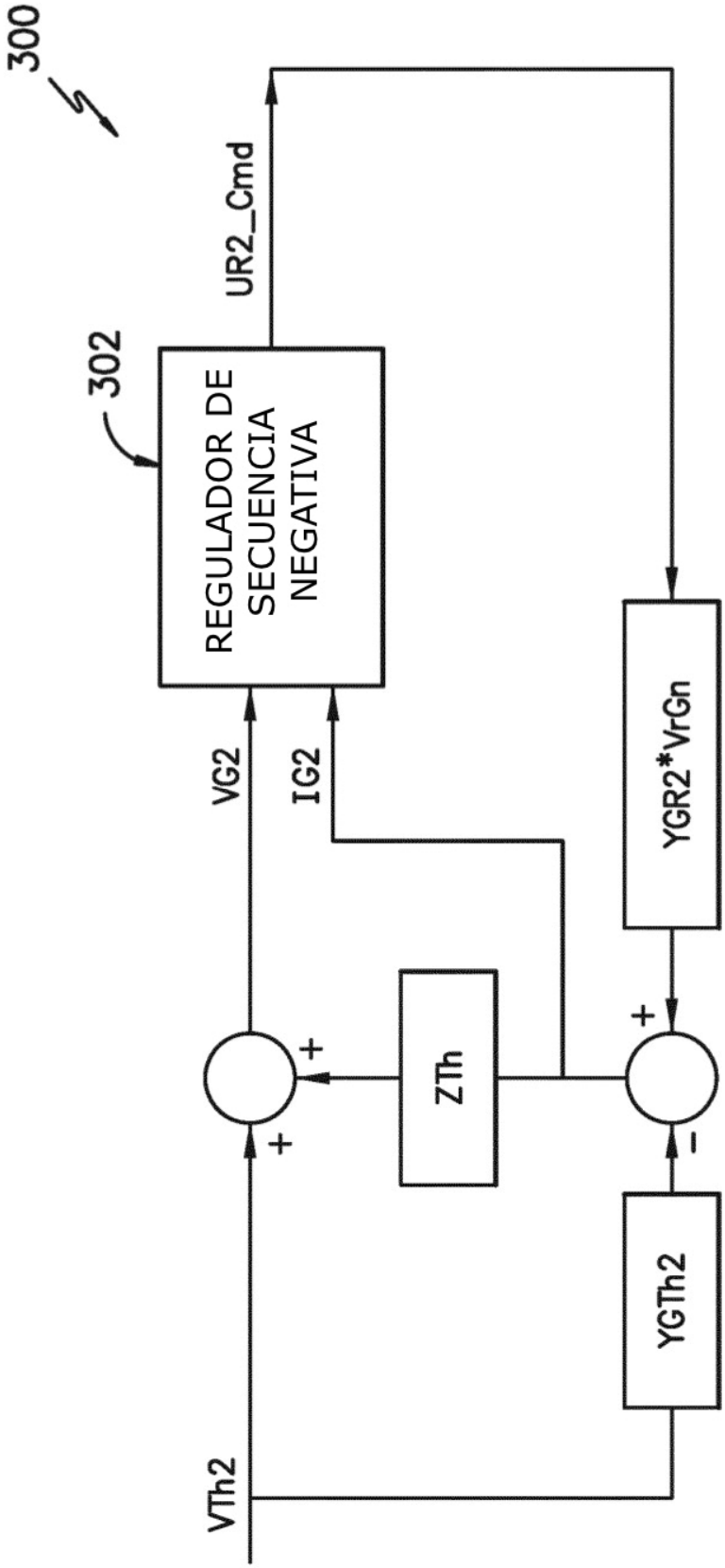
300
302
REGULADOR DE SECUENCIA NEGATIVA
UR2_Cmd
VG2
IG2
YGR2*VrGn
ZTh
YGTh2
VTh2
+
+
+
-

FIG. -5-

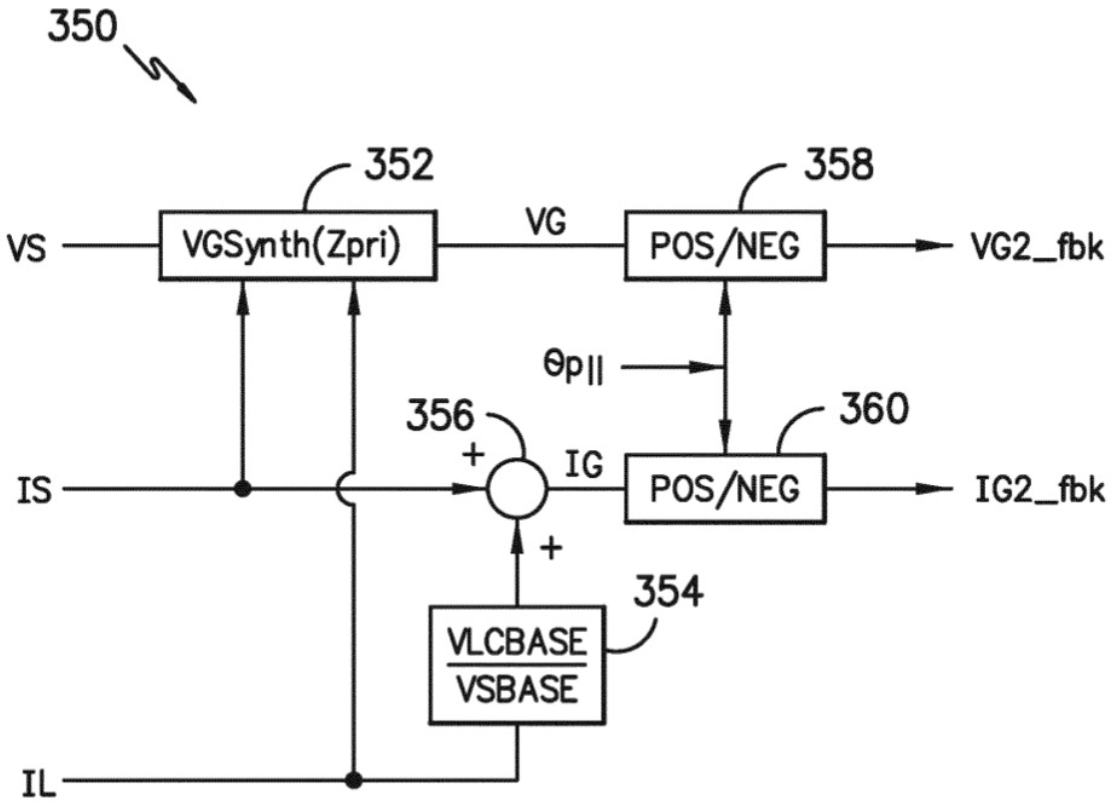
350
352
358
VS
VGSynth(Zpri)
VG
POS/NEG
VG2_fbk
θp||
356
360
+
IG
IS
POS/NEG
IG2_fbk
+
354
VLCBASE
VSBASE
IL

FIG. -6-

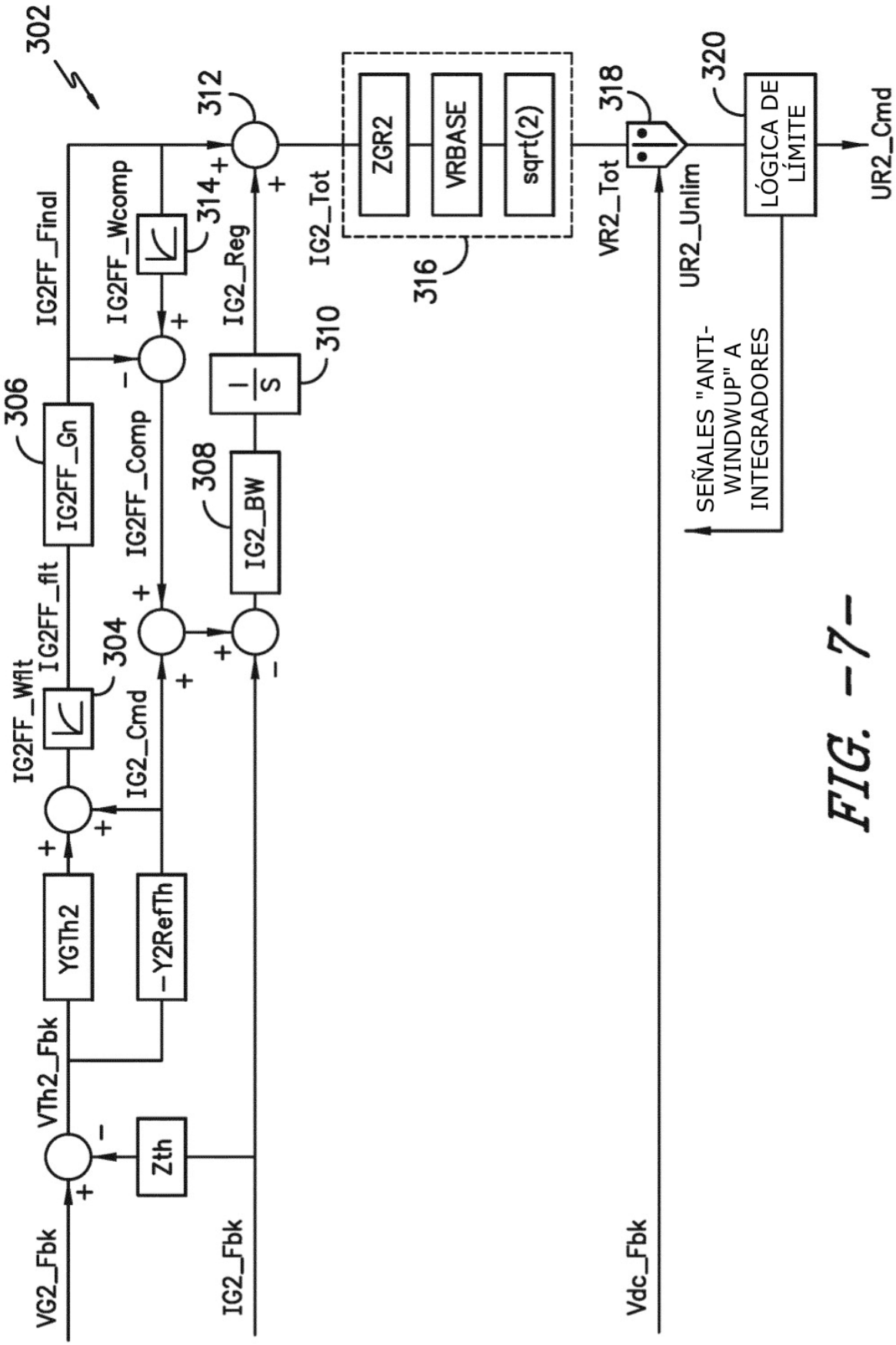
302
312
314
IG2FF_Final
IG2FF_Wcomp
IG2_Reg
IG2_Tot
ZGR2
VRBASE
sqrt(2)
316
318
320
VR2_Tot
UR2_Unlim
LÓGICA DE LÍMITE
UR2_Cmd
SEÑALES "ANTI-WINDWUP" A INTEGRADORES
306
IG2FF_Gn
IG2FF_Comp
310
I/S
308
IG2_BW
IG2FF_Wflt
IG2FF_flt
304
IG2_Cmd
YGTh2
-Y2RefTh
VTh2_Fbk
Zth
VG2_Fbk
IG2_Fbk
Vdc_Fbk

FIG. -7-

REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN

Esta lista de referencias citadas por el solicitante es únicamente para la comodidad del lector. No forma parte del documento de la patente europea. A pesar del cuidado tenido en la recopilación de las referencias, no se pueden excluir errores u omisiones y la EPO niega toda responsabilidad en este sentido.

Documentos de patentes citados en la descripción

- WO 2012062327 A **[0008]**
- US 2015300320 A1 **[0008]**