

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 806 141**

51 Int. Cl.:

H02M 1/32 (2007.01)

H02J 3/38 (2006.01)

H02M 7/5387 (2007.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.07.2012 E 12178218 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.04.2020 EP 2552007**

54 Título: **Sistema de conversión de energía con capacidad de resistencia de eventos transitorios y método del mismo**

30 Prioridad:

29.07.2011 CN 201110217135

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

16.02.2021

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**TAN, ZHUOHUI;
WU, XINHUI;
WU, XUEQIN;
GONG MAOZHONG y
GUO, XIAOMING**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 806 141 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 de conversión de energía con capacidad de resistencia de eventos transitorios y método del mismo

Antecedentes

5 Las realizaciones de la descripción se refieren generalmente a sistemas y métodos de conversión de energía para convertir y proporcionar energía eléctrica para alimentar un sistema eléctrico y, más particularmente, a sistemas y métodos de conversión de energía con capacidad de resistencia mejorada durante eventos transitorios.

10 La energía renovable, tal como la energía solar generada por sistemas de generación de energía solar, se está convirtiendo en una fuente de energía más importante en todo el mundo. Un sistema típico de generación de energía solar incluye uno o más conjuntos fotovoltaicos (conjuntos fotovoltaicos) que tienen múltiples células solares interconectadas. Las células solares de los PV convierten la energía solar en alimentación de CC. Con el fin de interconectar la salida de los paneles PV a una red eléctrica, un convertidor de energía solar se usa generalmente para cambiar la alimentación de CC de los paneles PV a alimentación de CA para alimentar una red eléctrica.

15 Existen varias configuraciones de convertidor de energía solar para convertir la salida de alimentación de CC de los paneles PV en alimentación de CA. Una implementación de un convertidor de energía solar tiene dos etapas, incluida una etapa del convertidor CC-CC y una etapa del convertidor CC-CA. El convertidor CC-CC controla el flujo de alimentación de CC de los conjuntos PV a un bus de CC. El convertidor CC-CA convierte la alimentación de CC suministrada al bus de CC en alimentación de CA que puede enviarse a la red eléctrica. Los convertidores de energía solar existentes utilizan además un controlador del convertidor de energía para regular el convertidor CC-CC y el convertidor CC-CA para compensar diversas variables del sistema, como el voltaje del bus de CC y el voltaje y la frecuencia de la red CA.

25 Con el rápido crecimiento de los sistemas de generación de energía solar conectados a la red, la penetración de energía solar en la red eléctrica puede tener un impacto significativo en el voltaje y la frecuencia de la red. Por lo general, se requiere que un sistema de generación de energía solar permanezca conectado a la red eléctrica durante eventos transitorios. Un problema asociado con ciertos eventos transitorios es que el convertidor CC-CA puede dañarse cuando la corriente que fluye a través del convertidor CC-CA excede sus limitaciones de hardware. Otro problema asociado con los eventos transitorios es que puede aparecer un desequilibrio de potencia en el bus de CC cuando la potencia de salida de la red varía significativamente debido a un cambio en el voltaje y la frecuencia de la red.

30 Por lo tanto, es deseable proporcionar sistemas y métodos para abordar al menos algunos de los problemas mencionados anteriormente.

35 La patente EP 2 320 549 A1 muestra que se proporciona un sistema de conversión de energía. El sistema de conversión de energía comprende un bus de CC para recibir alimentación de corriente continua (CC), un convertidor del lado de la línea acoplado al bus de CC para convertir la alimentación de CC del bus de CC en alimentación de corriente alterna (CA); y un controlador de la fuente de voltaje configurado para proporcionar señales de control al convertidor del lado de la línea para permitir que el convertidor del lado de la línea regule la alimentación de CA. El controlador de la fuente de voltaje comprende un generador de señal para generar las señales de control para el convertidor del lado de la línea, basado al menos en parte en una señal de comando de potencia y una señal de retroalimentación de potencia. El controlador de la fuente de voltaje comprende además un limitador de corriente para, durante un evento transitorio, limitar las señales de control basándose al menos en parte en un umbral de corriente eléctrica. El controlador de la fuente de voltaje cambia, durante el evento transitorio, desde la modulación del ancho de los pulsos de las señales de control a una generación de señal de control modificada que preestablece el voltaje de salida a un valor mínimo o máximo fijo dependiendo de si la corriente de fase de salida respectiva es mayor o menor que la deseada.

45 La patente EP 2 328 262 describe un sistema convertidor que comprende un control del lado del conjunto, acoplado a un convertidor de CC a CA para evitar una sobretensión en el bus de CC del convertidor de CC a CA.

Breve descripción

De acuerdo con una realización descrita en el presente documento, se proporciona un sistema de conversión de energía de acuerdo con la reivindicación 1.

50 De acuerdo con otra realización dada a conocer en el presente documento, se proporciona un método para hacer funcionar un convertidor del lado de la línea en un sistema de conversión de energía de acuerdo con la reivindicación 8.

Dibujos

Estas y otras características, aspectos y ventajas de la presente descripción se entenderán mejor cuando se lea la siguiente descripción detallada con referencia a los dibujos adjuntos, en los que los caracteres similares representan partes similares en todos los dibujos, en los que:

- 5 La Figura 1 es un diagrama de bloques esquemático de un sistema de conversión de energía solar de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción.
- La Figura 2 es un diagrama de control implementado por un controlador del lado de la línea mostrado en la Figura 1 de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción.
- 10 La Figura 3 es un diagrama de control detallado de un regulador de potencia activa mostrado en la Figura 2 de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción.
- La Figura 4 es un diagrama de control detallado de un regulador de potencia del regulador de potencia activa mostrado en la Figura 3 de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción.
- La Figura 5 es un diagrama de control detallado de un regulador de potencia activa mostrado en la Figura 2 de acuerdo con otra realización ejemplar de la presente descripción.
- 15 La Figura 6 es un diagrama de control detallado de una unidad de ajuste de comando de potencia activa mostrada en la Figura 5 de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción.
- La Figura 7 es un diagrama de control detallado de un regulador de potencia activa mostrado en la Figura 2 de acuerdo con otra realización ejemplar de la presente descripción.
- 20 La Figura 8 es un diagrama de control detallado de un generador de ángulo de fase mostrado en la Figura 7 de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción.
- La Figura 9 es un diagrama de control detallado de un regulador de potencia activa mostrado en la Figura 2 de acuerdo con otra realización ejemplar de la presente descripción.
- La Figura 10 es un diagrama de control detallado de una unidad de control de voltaje límite de CC mostrado en la Figura 9 de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción.
- 25 La Figura 11 es un diagrama de control detallado de un generador de ángulo de fase mostrado en la Figura 9 de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción.
- La Figura 12 es un diagrama de control detallado de un regulador de voltaje límite de CC mostrado en la Figura 9 de acuerdo con otra realización ejemplar de la presente descripción.
- 30 La Figura 13 es un diagrama de control detallado de un regulador de voltaje límite de CC mostrado en la Figura 9 de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción.
- La Figura 14 es un diagrama de control detallado de un regulador de potencia reactiva mostrado en la Figura 2 de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción.
- La Figura 15 es un diagrama de control detallado de un regulador de potencia reactiva mostrado en la Figura 2 de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción.
- 35 La Figura 16 es un modelo de circuito simplificado de un convertidor del lado de la línea en asociación con una red de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción.
- La Figura 17 es un diagrama fasorial que representa una implementación de un limitador de corriente fasorial de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción.
- 40 La Figura 18 es un diagrama de control detallado de un limitador de corriente fasorial de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción.
- La Figura 19 es un diagrama de control detallado de un limitador de corriente fasorial de acuerdo con otra realización ejemplar de la presente descripción.
- La Figura 20 es un diagrama de control implementado por un controlador del lado de la línea mostrado en la Figura 1 de acuerdo con otra realización ejemplar de la presente descripción.
- 45 La Figura 21 es un diagrama de control detallado de un regulador de potencia del regulador de potencia activa mostrado en la Figura 3 de acuerdo con otra realización ejemplar de la presente descripción.

La Figura 22 es un diagrama de flujo de un método para congelar y restablecer uno o más elementos integradores durante eventos transitorios y procesos de restablecimiento de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción.

Descripción detallada

5 Las realizaciones descritas en el presente documento se refieren en general a manejar sistemas de conversión de energía con capacidad de resistencia mejorada. Tal como se usa en el presente documento, la "capacidad de resistencia" se refiere a un sistema de conversión de energía que puede mantener sus operaciones normales o puede recuperarse y volver a las operaciones normales en caso de eventos transitorios o condiciones de fallo. El término "evento transitorio" y "condición de fallo" utilizado en este documento puede referirse a uno o más eventos o condiciones del lado de la fuente que ocurren en una fuente de energía, como una fuente de energía de PV, por ejemplo, o referirse a uno o más eventos o condiciones del lado de la carga que ocurre en una carga, tal como una red eléctrica, por ejemplo. Más particularmente, la implementación de la capacidad de resistencia del sistema de conversión de energía descrito en el presente documento se basa en una estructura o esquema de control de fuente de voltaje. Tal como se usa en el presente documento, "estructura o esquema de control de fuente de voltaje" se refiere a una realización de control en la que uno de los parámetros de control primario es voltaje de CA que incluye un comando de magnitud del voltaje y un comando de ángulo de fase del sistema de conversión de energía. En algunas realizaciones, durante un evento transitorio tal como un evento de resistencia a bajo voltaje (LVRT) o un evento de resistencia a voltaje cero (ZVRT), un sistema de conversión de energía utiliza adicionalmente un algoritmo limitador de corriente o más específicamente un limitador de corriente fasorial. para limitar la corriente a la salida del sistema de conversión de energía. Además, durante los eventos transitorios LVRT, se puede implementar un limitador de voltaje o un algoritmo de límite de voltaje del bus de CC en el controlador del lado de la línea para limitar el voltaje del bus de CC en un bus de CC dentro de un límite predefinido. Además, en algunas otras realizaciones, puede proporcionarse una característica anti-saturación en el sistema de conversión de energía cuando se determina que el sistema de conversión de energía está entrando en los eventos transitorios o recuperándose de los eventos transitorios. Tal como se usa en este documento, "anti-saturación" se refiere a la congelación de uno o más elementos de integración después de entrar en los eventos transitorios o durante el proceso de recuperación y restablecimiento después del proceso de recuperación. Además, en algunas realizaciones, en la generación de la señal de comando de ángulo de fase durante el evento transitorio, se puede limitar una señal de comando de potencia usando una señal de referencia de potencia del lado de la fuente, tal como, por ejemplo, una señal de referencia de potencia de seguimiento de punto de potencia máxima (MPPT) procedente de un circuito MPPT.

Una o más realizaciones específicas de la presente descripción se describirán a continuación. En un esfuerzo por proporcionar una descripción concisa de estas realizaciones, no todas las características de una implementación real se describen en la especificación. Debe apreciarse que en el desarrollo de cualquier implementación real, como en cualquier proyecto de ingeniería o diseño, se deben tomar numerosas decisiones específicas de implementación para lograr los objetivos específicos de los desarrolladores, como el cumplimiento de las restricciones relacionadas con el sistema y las relacionadas con el negocio, que pueden variar de una implementación a otra. Además, debe apreciarse que tal esfuerzo de desarrollo podría ser complejo y requerir mucho tiempo, pero sería, sin embargo, una tarea rutinaria de diseño, fabricación y manufactura para los expertos en la materia que tienen el beneficio de esta descripción.

40 A menos que se defina lo contrario, los términos técnicos y científicos utilizados en el presente documento tienen el mismo significado que entiende comúnmente un experto en la materia a la que pertenece esta descripción. Los términos "primero", "segundo" y similares, tal como se usan en el presente documento, no denotan ningún orden, cantidad o importancia, sino que se usan para distinguir un elemento de otro. Además, los términos "un" y "una" no denotan una limitación de la cantidad, sino que denotan la presencia de al menos uno de los elementos a los que se hace referencia. El término "o" pretende ser inclusivo y significa uno o todos los elementos enumerados. El uso de "que incluye", "que comprende" o "que tiene" y variaciones de los mismos en el presente documento pretenden abarcar los elementos enumerados a continuación y los equivalentes de los mismos, así como elementos adicionales. Los términos "conectado" y "acoplado" no se limitan a conexiones o acoplamientos físicos o mecánicos, y pueden incluir conexiones o acoplamientos eléctricos, ya sean directos o indirectos. Además, los términos "circuito" y "circuitería" y "controlador" pueden incluir un solo componente o una pluralidad de componentes, que son activos y / o pasivos y están conectados o acoplados de otra manera (por ejemplo, como uno o más chips de circuito integrados) para proporcionar la función descrita.

La Figura 1 ilustra un diagrama de bloques de un sistema de conversión de energía 10 de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción. El uso del término "ejemplar" simplemente define que es un ejemplo de implementación de la presente descripción. En lo sucesivo, para comprender mejor la presente descripción, el sistema de conversión de energía 10 se ilustra y describe como un sistema de conversión de energía solar. Sin embargo, una persona con conocimientos ordinarios en la materia comprenderá fácilmente que una o más realizaciones descritas en el presente documento no deben limitarse a aplicaciones solares, ciertos aspectos de la descripción pueden aplicarse de manera similar a otros sistemas de conversión de energía, incluyendo sistemas de celdas de combustible, sistemas de energía eólica y sistemas de energía mareomotriz, por ejemplo.

En general, el sistema de conversión de energía solar 10 incluye un convertidor de energía solar 14 configurado para interactuar entre una fuente de energía solar 12 y una red eléctrica 18. Más específicamente, el convertidor de energía solar 14 está configurado para convertir energía en una forma de corriente o voltaje de corriente continua (CC) (en lo sucesivo, en adelante denominado alimentación de CC) generado a partir de una fuente de energía solar 12 en energía en forma de corriente o voltaje de corriente alterna (CA) (en lo sucesivo, denominado alimentación de CA) adecuado para alimentar un sistema eléctrico mostrado como la red eléctrica 18. En una realización, la fuente de energía solar 12 puede incluir uno o más conjuntos fotovoltaicos (conjuntos PV) que tienen múltiples células solares interconectadas que pueden convertir la energía solar en alimentación de CC a través del efecto fotovoltaico. En una realización, el sistema eléctrico 18 puede comprender una red eléctrica de CA, y el sistema de conversión de energía solar está configurado para suministrar alimentación de CA trifásica de frecuencia nominalmente fija.

En una implementación, el convertidor de energía 14 mostrado en la Figura 1 se basa en una estructura de dos etapas que incluye un convertidor del lado PV 142 y un convertidor del lado de la línea 144. El convertidor del lado PV 142 puede comprender un convertidor CC-CC, como un convertidor elevador CC-CC, que aumenta el voltaje de CC recibido desde la fuente de energía 12 y genera un voltaje de CC más alto en un bus de CC 146. El bus de CC 146 puede incluir uno o más condensadores para mantener un nivel de voltaje de CC constante en el bus de CC 146 y, por lo tanto, el flujo de energía del bus de CC 146 a la red eléctrica 18 se puede gestionar. El convertidor 144 del lado de la línea puede comprender un inversor CC-CA que convierte el voltaje de CC en el bus de CC 146 en voltaje de CA adecuado para alimentar a la red eléctrica de CA 18. En otras implementaciones, el convertidor de energía 14 puede basarse en una estructura de convertidor de una sola etapa que incluye un convertidor CC-CA para convertir el voltaje de CC en un bus de CC a voltaje de CA con frecuencia y magnitud del voltaje adecuadas para alimentar la red eléctrica 18.

En una implementación, el sistema de conversión de energía 10 mostrado en la Figura 1 comprende además un controlador de convertidor de energía 16 configurado para regular la salida de potencia PV de la fuente de energía solar 12 y regular la potencia activa o la potencia reactiva en la salida del convertidor del lado de la línea 144. En una implementación, el controlador de convertidor de energía 16 está configurado para tener un controlador del lado PV 162 y un controlador del lado de la línea 164. El controlador del lado PV 162 está configurado para enviar señales de control del lado PV 166 al convertidor del lado PV 142 para regular la salida de energía PV de la fuente de energía solar 12 de acuerdo con varias señales de comando y señales de retroalimentación. El controlador del lado de la línea 164 está configurado para enviar señales de control del lado de la línea 168 al convertidor del lado de la línea 144 para regular la potencia activa o la salida de potencia reactiva del convertidor del lado de la línea 144 de acuerdo con varias señales de comando y señales de retroalimentación. En particular, tal como se muestra en la Figura 1, para tratar eventos transitorios, el controlador del lado de la línea 164 puede configurarse para implementar un algoritmo 230 de limitador de corriente (CL) para limitar la corriente en la salida del convertidor del lado de la línea 144. El controlador del lado de la línea 164 puede configurarse adicionalmente para implementar un algoritmo 290 de limitador de voltaje (VL) para limitar el voltaje del bus de CC en un bus de CC dentro de un límite predefinido. El convertidor del lado PV 162 puede comprender cualquier tipo de topología de convertidor, como un convertidor de medio puente, un convertidor de puente completo o un convertidor en contrafase. El convertidor 144 del lado de la línea puede comprender cualquier tipo de topología de convertidor CC a CA tal como un convertidor de 2 niveles o un convertidor de 3 niveles. El convertidor del lado PV 142 y el convertidor del lado de la línea 144 pueden comprender una pluralidad de dispositivos de conmutación de semiconductores (no mostrados), que incluyen, pero no se limitan a, tiristores conmutados de puerta integrada (IGCT) y transistores bipolares de puerta aislada (IGBT). Los dispositivos de conmutación se activan y desactivan en respuesta a las señales de control del lado PV 166 y las señales de control del lado de la línea 168 respectivamente. Aunque se ilustran dos controladores 162, 164, en otras realizaciones, se puede usar un único controlador para controlar tanto el convertidor del lado PV 142 como el convertidor del lado de la línea 144.

En una implementación, el sistema de conversión de energía 10 mostrado en la Figura 1 puede comprender además un filtro del lado PV 22 que tiene uno o más elementos capacitivos e inductivos para eliminar los componentes ondulados de la salida de alimentación de CC de la fuente de energía solar 12 y bloquear las señales onduladas transmitidas desde el convertidor 142 del lado PV a la fuente de energía solar 12. El sistema de conversión de energía 10 puede incluir además un filtro 24 del lado de la línea que tiene uno o más elementos inductivos o elementos capacitivos (no mostrados) para eliminar señales armónicas para cada fase de la salida de alimentación de CA trifásica del convertidor 144 del lado de la línea.

En una implementación, el sistema de conversión de energía 10 mostrado en la Figura 1 puede comprender además un circuito 26 de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). Para fines de ilustración, se muestra que el circuito 26 del MPPT está ubicado en el exterior del controlador del convertidor de energía 16. Alternativamente, el circuito 26 del MPPT puede configurarse dentro del controlador 16 del convertidor de energía, o más específicamente, configurarse dentro del controlador 162 del lado PV. En una realización, el circuito MPPT 26 puede implementar un algoritmo de perturbación y observación (P&O) para extraer la máxima potencia de la fuente de energía solar 12. En una implementación, el circuito 26 de MPPT recibe una señal de corriente de CC de retroalimentación 112 y una señal de voltaje de CC 114 de retroalimentación medida por un sensor de corriente 28 y un sensor de voltaje 32 colocado en la salida de la fuente de energía solar 12. El circuito 26 de MPPT calcula una potencia real obtenida actualmente desde la fuente de energía solar 12 multiplicando la señal de corriente CC 112 y la señal de voltaje de CC 114. El circuito MPPT 26 compara además la potencia real calculada obtenida actualmente

con una previamente calculada y almacenada para observar la variación de la potencia. Si la variación de la potencia es mayor que cero, la perturbación recomendada posterior se realiza en la misma dirección, de lo contrario se invierte. El circuito MPPT 26 envía entonces una señal de referencia de voltaje o corriente 158 al controlador del lado PV 162, que ajusta las señales de control 166 en consecuencia. Este proceso se repite hasta que se encuentra un punto operativo de máxima potencia o un punto cercano al punto operativo de máxima potencia de la fuente de energía solar 12. En otras realizaciones, se pueden implementar otros algoritmos tales como, por ejemplo, algoritmos de conductancia incremental para extraer la potencia máxima de la fuente de energía solar 12.

Tal como se muestra en la Figura 1, el circuito MPPT 26 se configura además en comunicación eléctrica con el controlador del lado de la línea 164. En la implementación del algoritmo MPPT, se puede generar una señal de referencia de potencia MPPT 159 desde el circuito 26 del MPPT y se suministra al controlador del lado de la línea 164. En una realización, la señal de referencia de potencia MPPT 159 se usa para limitar una señal de comando de potencia utilizada para generar las señales de control del lado de la línea 168 para el convertidor del lado de la línea 144. Como tal, la potencia proporcionada desde la fuente de energía solar 12 y la salida de potencia desde el convertidor de energía 14 pueden estar coordinadas o compensadas.

Refiriéndose adicionalmente a la Figura 1, en operaciones normales, el sistema de conversión de energía 10 o particularmente el controlador 162 del lado PV es responsable de controlar el voltaje de CC que aparece en el bus de CC 146. Más específicamente, el controlador 162 del lado PV recibe una señal de retroalimentación de voltaje de CC 156 medida por un sensor de voltaje de CC colocado en la salida del bus de CC 146. El controlador 162 del lado PV recibe además una señal de comando de voltaje de CC 292. El controlador 162 del lado PV ajusta las señales de control del lado PV 166 de acuerdo con la señal de retroalimentación de voltaje de CC 156 y la señal de comando de voltaje de CC 292, para mantener el voltaje de CC que aparece en el bus de CC 146 a un nivel de voltaje constante. En realizaciones alternativas, el controlador 164 del lado de la línea puede ser responsable de controlar el voltaje de CC que aparece en el bus de CC 146.

También haciendo referencia a la Figura 1, el sistema de conversión de energía 10 o el controlador del lado de la línea 164 pueden configurarse adicionalmente con la capacidad de control de resistencia a eventos transitorios. Por ejemplo, durante eventos transitorios de la red o condiciones de fallo, el controlador 164 del lado de la línea puede implementar un algoritmo de límite de corriente para limitar la corriente de salida del convertidor 144 del lado de la línea de modo que los dispositivos semiconductores que residen en el convertidor 144 del lado de la línea puedan protegerse contra problemas de sobrecorriente. Además, durante eventos transitorios de la red o condiciones de fallo, el controlador del lado de la línea 164 puede implementar un algoritmo de límite de voltaje para limitar el voltaje de CC en el bus de CC 146 dentro de un límite superior y un límite inferior. Como tal, el bus de CC 146 puede protegerse contra sobretensiones y problemas de colapso. A continuación se describirán más detalles del algoritmo de límite de corriente y el algoritmo de límite de voltaje.

La Figura 2 ilustra al menos una parte de un diagrama de control global del controlador 164 del lado de la línea de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción. Los bloques funcionales ilustrados en la Figura 2 pueden implementarse en hardware o software o una combinación de los mismos. En aplicaciones prácticas, el controlador del lado de la línea 164 puede implementarse mediante un microcontrolador o un procesador de señal digital (DSP). En general, tal como se muestra en la Figura 2, en una realización ejemplar, el controlador del lado de la línea 164 incluye un regulador de potencia activa 210 para recibir señales de comando de potencia y de retroalimentación de potencia 212, 214 y generar una señal de comando de ángulo de fase 216, un regulador de potencia reactiva 220 para recibir señales de comando de potencia reactiva y de retroalimentación de potencia reactiva 222, 224 y generar una señal de comando de magnitud del voltaje 226, un limitador de corriente 230 para limitar la señal de comando de ángulo de fase 216 y la señal de comando de magnitud del voltaje 226 de acuerdo con una o más de una señal de corriente de retroalimentación 154, una señal de voltaje de retroalimentación 228, una señal de umbral de corriente máxima permitida 231, y un valor de impedancia 233, y un generador de señal 240 para generar señales de control 168 de acuerdo con la señal de comando de ángulo de fase limitada 232 y la señal de comando de magnitud del voltaje limitada 234.

En la realización ilustrada de la Figura 2, el regulador de potencia activa 210 recibe una señal de comando de potencia 212 y una señal de retroalimentación de potencia 214 y genera una señal de comando de ángulo de fase 216 en base al menos en la señal de comando de potencia 212 y la señal de retroalimentación de potencia 214. La señal de comando de potencia 212 representa la potencia deseada suministrada entre el terminal de salida del convertidor 144 del lado de la línea (véase la Figura 1) y la red 18 y puede ser dictada por un operador de red. La señal de retroalimentación de potencia 214 es la potencia medida real entregada entre el terminal de salida del convertidor del lado de la línea 144 y la red 18. La señal de retroalimentación de potencia 214 puede obtenerse multiplicando una señal de corriente de retroalimentación 154 y una señal de voltaje de retroalimentación 152. La señal de de corriente de retroalimentación 154 y la señal de voltaje de retroalimentación 152 pueden obtenerse a partir de un sensor de corriente 34 y un sensor de voltaje 36 colocados entre el convertidor del lado de la línea 144 y la red 18. Debe señalarse particularmente que el comando de ángulo de fase 216 al que se hace referencia aquí puede tener algunas variaciones. En una realización, la señal de comando de ángulo de fase 216 generada desde el regulador de potencia activa 210 representa un desplazamiento de ángulo de fase deseado o una diferencia entre un voltaje en, o adyacente a la red 18 y un voltaje de CA del convertidor del lado de la línea 144. En otra realización, la señal de comando de ángulo de fase 216 representa un ángulo de fase deseado del voltaje de CA del convertidor

del lado de la línea 144. El ángulo de fase deseado del voltaje de CA del convertidor del lado de la línea 144 se puede obtener combinando el ángulo de fase del voltaje de la red con el desplazamiento del ángulo de fase. Tal como se describe aquí, el voltaje de CA del convertidor del lado de la línea 144 puede ser un voltaje de CA en el terminal de salida del convertidor del lado de la línea 144. Alternativamente, el voltaje de CA del convertidor del lado de la línea 144 puede comprender un voltaje interno del convertidor del lado de la línea 144 teniendo en cuenta la impedancia interna del convertidor del lado de la línea 144. Además, en algunas otras realizaciones, el voltaje de CA puede medirse a lo largo de la línea desde el convertidor del lado de la línea 144.

La Figura 3 ilustra un diagrama de control más detallado del regulador de potencia activa 210 mostrado en la Figura 2 de acuerdo con una realización de la presente descripción. En la realización ilustrada, el regulador de potencia activa 210 incluye un elemento de suma 250, un regulador de potencia 260 y un generador de ángulo de fase 270. El elemento de suma 250 resta la señal de retroalimentación de potencia 214 de la señal de comando de potencia 212 y proporciona una señal de error de potencia 252 que representa una diferencia entre la señal de comando de potencia 212 y la señal de retroalimentación de potencia 214. La señal de error de potencia 252 se suministra al regulador de potencia 260. El regulador de potencia 260 genera una señal de comando de frecuencia 262 de acuerdo con la señal de error de potencia 252. La señal de comando de frecuencia 262 se suministra al generador de ángulo de fase 270. El generador de ángulo de fase 270 genera una señal de comando de ángulo de fase 216 de acuerdo con la señal de comando de frecuencia 262.

La Figura 4 ilustra un diagrama de control más detallado del regulador de potencia 260 mostrado en la Figura 3 de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción. En la realización ilustrada, el regulador de potencia 260 comprende un controlador PI 264 configurado para generar la señal de comando de frecuencia 262 de acuerdo con la señal de error de potencia 252. En una realización, la señal de comando de frecuencia 262 se genera combinando la salida de un elemento proporcional 263 y la salida de un elemento de integración 265 a través de un elemento de suma 267. En la realización ilustrada, el regulador de potencia 260 puede comprender opcionalmente una unidad de compensación 266. En general, la unidad de compensación 266 sirve para asegurar la estabilidad del sistema de conversión de energía 10. En la realización ilustrada, la unidad de compensación 266 comprende un elemento proporcional 269 y un elemento de suma 268. El elemento proporcional 269 proporciona un factor de amortiguación a una señal de error de frecuencia 272 en un factor D. La salida del elemento proporcional 269 se resta de la señal de error de potencia 252 mediante un elemento de suma 261, que proporciona otra señal de error de potencia al elemento de integración 265 para el cálculo adicional de la señal de comando de frecuencia 262. La señal de error de frecuencia 272 se obtiene restando una señal de frecuencia fundamental 271 de la señal de comando de frecuencia 262 en el elemento de suma 268. La señal de frecuencia fundamental 271 representa una velocidad de ángulo nominal del voltaje de CA suministrado a la red eléctrica 18 o una velocidad angular medida obtenida de un circuito de bucle de bloqueo de fase (PLL) (vea la Figura 8)

La Figura 5 ilustra un diagrama de control detallado del regulador de potencia activa 210 mostrado en la Figura 2 de acuerdo con otra realización de la presente descripción. El diagrama de control ilustrado en la Figura 5 es similar al diagrama de control mostrado en la Figura 3. Una de las diferencias es que una unidad de ajuste de comando de potencia activa 289 se proporciona adicionalmente en la Figura 5. La unidad de ajuste de comando de potencia activa 289 está configurada para recibir una señal de comando de potencia 212 y una señal de límite de potencia 219 y generar una señal de comando de potencia limitada 218. En una realización, la señal de límite de potencia 219 es la salida de la señal de referencia de potencia MPPT 159 desde el circuito 26 MPPT (mostrado en la Figura 1). Al limitar la señal de comando de potencia 212 durante los transitorios de la red, se puede aliviar una tensión de integración en los elementos de integración en el regulador de potencia 260 y el generador de ángulo de fase 270. En otra realización, la señal de límite de potencia 219 puede suministrarse a la unidad de ajuste de comando de potencia activa 289 basándose en las limitaciones de hardware del sistema de conversión de energía 10.

La Figura 6 ilustra un diagrama de control detallado de la unidad de ajuste de comando de potencia activa 289 mostrada en la Figura 5 de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción. En la realización ilustrada, la unidad de ajuste de comando de potencia activa 289 incluye un elemento limitador 274, un elemento de suma 276 y un elemento de integración 277. El elemento limitador 274 está configurado para recibir la señal de comando de potencia 212 y restringir la señal de comando de potencia 212 de acuerdo con una señal de límite de ángulo de fase 232 y una señal de control de velocidad de aumento 278. La señal de comando de potencia limitada 275 generada desde el elemento limitador 274 se suministra al elemento de suma 276, que proporciona una señal de error de potencia 279 que representa una diferencia entre la señal de potencia limitada 275 y la señal de potencia de retroalimentación 214. La señal de error de potencia 279 es integrada en el elemento de integración 277 para generar la señal de comando de potencia limitada 218, que se suministra al elemento de suma 250 mostrado en la Figura 5 para la generación de la señal de comando de ángulo de fase 216.

La Figura 7 ilustra un diagrama de control detallado del regulador de potencia activa 210 mostrado en la Figura 2 de acuerdo con otra realización más de la presente descripción. El diagrama de control ilustrado en la Figura 7 es similar a los diagramas de control mostrados en la Figura 3 y la Figura 5. Una de las diferencias es que un circuito 280 de bucle de bloqueo de fase (PLL) se proporciona adicionalmente en la Figura 7. El circuito PLL 280 está configurado para recibir una señal de voltaje de retroalimentación 152 desde la red 18 y generar una señal de referencia de frecuencia 282 y una señal de referencia de ángulo de fase 284 de acuerdo con la señal de voltaje de retroalimentación 152. La señal de referencia de frecuencia 282 se usa para ajustar la señal de comando de

frecuencia 262. La señal de referencia de ángulo de fase 284 se usa para ajustar la señal de comando de ángulo de fase 216, que se describirá con más detalle a continuación.

La Figura 8 ilustra un diagrama de control detallado del generador de ángulo de fase 270 mostrado en la Figura 7 en asociación con el circuito PLL 280 de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción. En la realización ilustrada, el generador de ángulo de fase 270 comprende un elemento de suma 286, un elemento de integración 283 y un elemento de suma 249. El elemento de suma 286 resta la señal de referencia de frecuencia 282 de la señal de comando de frecuencia 262 recibida del regulador de potencia 260, y proporciona una señal de error de frecuencia 281 que representa una diferencia entre la señal de referencia de frecuencia 282 y la señal de comando de frecuencia 262. La señal de error de frecuencia 281 es integrada por el elemento integrador 283 y se genera una señal de desplazamiento de ángulo de fase 285 a partir del elemento integrador 283. La señal de desplazamiento del ángulo de fase 285 puede estar adicionalmente limitada (no se muestra en la Figura 8) dentro de un umbral de ángulo de fase superior y un umbral de ángulo de fase inferior (no se muestra en la Figura 8). El umbral del ángulo de fase superior y el umbral del ángulo de fase inferior están predefinidos o calculados para garantizar que el sistema de conversión de energía sea capaz de atravesar eventos transitorios. Una realización de cálculo de los umbrales de ángulo de fase superior e inferior se describirá más adelante en referencia a la Figura 18 y la Figura 19. La señal de desplazamiento de ángulo de fase limitada 285 se combina con la señal de referencia de ángulo de fase 284 en el elemento de suma 249, que proporciona una salida como la señal de comando de ángulo de fase 216.

La Figura 9 ilustra un diagrama de control detallado del regulador de potencia activa 210 mostrado en la Figura 2 de acuerdo con otra realización más de la presente descripción. El diagrama de control ilustrado en la Figura 9 es similar a los diagramas de control mostrados en la Figura 3, la Figura 5, y la Figura 7. Una de las diferencias es que un limitador de voltaje o un regulador de voltaje límite de CC 290 se proporciona adicionalmente en la Figura 9. En la realización ilustrada, el regulador de voltaje de límite de CC 290 está configurado para recibir una señal de comando de voltaje de CC 292 y una señal de retroalimentación de voltaje de CC 156 y generar una señal de corrección del ángulo de fase 296. La señal de corrección del ángulo de fase 296 se suministra al generador de ángulo de fase 270, que usa la señal de corrección de ángulo de fase 296 para corregir la señal de comando de ángulo de fase 216.

La Figura 10 ilustra un diagrama de control más detallado del regulador de voltaje límite de CC 290 mostrado en la Figura 9 de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción. En la realización ilustrada, el regulador de voltaje de límite de CC 290 incluye un limitador de voltaje 310, un elemento de suma 320, un primer dispositivo lógico 340, un regulador de voltaje 360 y un segundo dispositivo lógico 380. El limitador de voltaje 310 se ajusta con un valor de voltaje límite superior y un valor de voltaje límite inferior para limitar la señal de retroalimentación 156 de voltaje de CC de entrada y proporcionar una señal de voltaje de CC limitada 312 dentro del rango de voltaje definido por el valor de voltaje límite superior y el valor de voltaje límite inferior. El elemento de suma 320 resta la señal de retroalimentación de voltaje de CC 156 de la señal de voltaje de CC limitada 312 para proporcionar una señal de error de voltaje de CC 322. En operaciones normales, el voltaje de CC que aparece en el bus de CC 146 está ubicado dentro del valor de voltaje límite superior y el valor de voltaje límite inferior, de modo que la señal de error de voltaje de CC 322 proporcionada desde el elemento de suma 320 es cero. En este caso, el primer elemento lógico 340 y el segundo elemento lógico 380 están desconectados, de modo que no se suministra ninguna señal de corrección del ángulo de fase 296 al generador de ángulo de fase 270 mostrado en la Figura 9. Cuando ocurre un evento transitorio de la red, como un evento de resistencia a baja tensión, el voltaje de CC que aparece en el bus de CC 146 puede caer temporalmente por debajo del límite inferior o ascender por encima del límite superior debido al desequilibrio de potencia. En este caso, la señal de error de voltaje de CC 322 proporcionada desde el elemento de suma 320 no es cero, y el primer elemento lógico 340 y el segundo elemento lógico 380 están encendidos, de modo que el regulador de voltaje 360 proporciona la señal de corrección del ángulo de fase 296 a el generador de ángulo de fase 270, que se describirá con más detalle a continuación en referencia a la Figura 11.

La Figura 11 ilustra un diagrama de control detallado del generador de ángulo de fase 270 mostrado en la Figura 9 en asociación con el circuito PLL 280 de acuerdo con una realización ejemplar de la presente descripción. El diagrama de control mostrado en la Figura 11 es similar al diagrama de control descrito anteriormente en referencia a la Figura 8. Una de las diferencias es que, en una realización, se proporciona además otro elemento de suma 287 en el generador de ángulo de fase 270. El elemento de suma 287 combina la señal de corrección de ángulo de fase 296 y la señal de desplazamiento de ángulo de fase 285 y produce una señal de ángulo de fase combinada 289. En una realización, la señal de ángulo de fase combinada 289 se suministra directamente al elemento de suma 262 para la generación de la señal de comando de fase 216. En otra realización, la señal de ángulo de fase combinada 289 se puede suministrar a un limitador 288. El limitador 288 está configurado para restringir la señal de ángulo de fase combinada 289 dentro de un límite de ángulo de fase superior y un límite de ángulo de fase inferior. Un propósito de limitar la señal de ángulo de fase 289 es asegurar que el sistema de conversión de energía 10 pueda resistir eventos transitorios. La salida del limitador 288 se combina en el elemento de suma 262 con la señal de referencia de ángulo de fase 284 para la generación de la señal de comando de ángulo de fase 216.

La Figura 12 ilustra un diagrama de control detallado del regulador de potencia activa 210 mostrado en la Figura 2 de acuerdo con otra realización más de la presente descripción. El diagrama de control en la Figura 12 es similar al diagrama de control de la Figura 9. Una diferencia es que el regulador de voltaje límite de CC 290 genera una señal de corrección de frecuencia 298 de acuerdo con la señal de comando de CC 292 y la señal de retroalimentación de

CC 156 en lugar de una señal de corrección de ángulo de fase. Haciendo referencia de nuevo a la Figura 11, la señal de corrección de frecuencia 298 puede ser suministrada al elemento de suma 286 para la generación de la señal de error de frecuencia 281 y la generación adicional de la señal de comando de frecuencia 262 y la señal de comando de ángulo de fase 216.

5 La Figura 13 ilustra un diagrama de control detallado del regulador de potencia activa 210 mostrado en la Figura 2 de acuerdo con otra realización más de la presente descripción. El diagrama de control en la Figura 13 es similar al diagrama de control de la Figura 9 y la Figura 12. Una diferencia es que el regulador de voltaje de límite de CC 290 genera una señal de corrección de potencia 299 de acuerdo con la señal de comando de CC 292 y la señal de retroalimentación de CC 156. La señal de corrección de potencia 299 se suministra al elemento de suma 250 para la generación de la señal de error de potencia 252 y la generación posterior de la señal de comando de frecuencia 262 y la señal de comando de ángulo de fase 216.

Haciendo referencia de nuevo a la Figura 2, el regulador de potencia reactiva 220 del controlador del lado de la línea 164 recibe una señal de comando de potencia reactiva 222 y una señal de potencia reactiva de retroalimentación 224 y genera una señal de magnitud del voltaje 226 en base al menos a la señal de comando de potencia reactiva 222 y la señal de potencia reactiva de retroalimentación 224. La señal de comando de potencia reactiva 222 representa la potencia reactiva deseada entregada entre la salida del convertidor del lado de la línea 144 (véase la Figura 1) y la red 18 y puede ser dictada por un operador de red. La señal de retroalimentación de potencia reactiva 224 es la potencia reactiva medida real entregada entre la salida del convertidor del lado de la línea 144 y la red 18. La señal de retroalimentación de potencia reactiva 224 puede obtenerse multiplicando una señal de corriente de retroalimentación 154 y una señal de voltaje de retroalimentación 152. La señal de comando de magnitud del voltaje 226 representa una magnitud del voltaje deseada del voltaje de CA del convertidor del lado de la línea 144. El voltaje de CA del convertidor del lado de la línea 144 puede ser un voltaje de CA en el terminal de salida del convertidor del lado de la línea 144. Alternativamente, el voltaje de CA puede ser un voltaje interno del convertidor del lado de la línea 144 teniendo en cuenta la impedancia interna del convertidor del lado de la línea 144.

25 La Figura 14 ilustra un diagrama de control detallado del regulador de potencia reactiva 220 de la Figura 2 de acuerdo con una realización ejemplar. En la realización ilustrada, el regulador de potencia reactiva 220 incluye un primer elemento de suma 610, un regulador VAR 620, un segundo elemento de suma 630 y un regulador de voltaje 640. El primer elemento de suma 610 resta la señal de retroalimentación de potencia reactiva 224 del comando de potencia reactiva 222 y genera una señal de error de potencia reactiva 612. El regulador VAR 620 genera una señal de comando de voltaje de la red 622 de acuerdo con la señal de error de potencia reactiva 612. La señal de comando de voltaje de la red 622 representa un voltaje deseado a alcanzar en la red o adyacente a ella 18. El segundo elemento de suma 330 resta una señal de retroalimentación de voltaje de la red 214 de la señal de comando de voltaje de la red 622 y produce una señal de error de voltaje 632. El regulador de voltaje 640 genera la señal de comando de magnitud del voltaje 226 de acuerdo con la señal de error de voltaje 632.

35 La Figura 15 ilustra un diagrama de control detallado del regulador de potencia reactiva 220 mostrado en la Figura 2 de acuerdo con otra realización ejemplar. El diagrama de control es similar al diagrama de control mostrado en la Figura 14. Como una realización alternativa, una unidad de ajuste de comando de potencia reactiva 650 se proporciona adicionalmente en la Figura 15. La unidad de ajuste de comando de potencia reactiva 650 está configurada para limitar la señal de comando de potencia reactiva 222 de acuerdo con una señal de límite de potencia reactiva 654 y generar una señal de comando de potencia reactiva limitada 652 en consecuencia. La señal de comando de potencia reactiva limitada 652 se usa para seguir la regulación, tal como se indicó anteriormente con respecto a la Figura 14, para generar la señal de comando de magnitud del voltaje 226. Uno de los propósitos de incluir la unidad de ajuste de comando de potencia reactiva 650 es asegurar que el sistema de conversión de energía 10 pueda proporcionar la corriente reactiva deseada a la red 18 durante eventos transitorios.

45 Haciendo referencia de nuevo a la Figura 2, en una realización, el limitador de corriente 230 comprende un limitador de corriente fasorial y está configurado para proporcionar límites en la señal de comando de ángulo de fase 216 generada desde el regulador de potencia activa 210 en referencia a las Figuras 3-13. El limitador de corriente fasorial 230 también está configurado para proporcionar límites en la señal de comando de magnitud del voltaje 226 generada desde el regulador de potencia reactiva 220 en referencia a las Figuras 14-15. Cuando se produce un evento transitorio en la red eléctrica 18, una o ambas señales de comando de ángulo de fase 216 y la señal de comando de magnitud del voltaje 226 están limitadas por el limitador de corriente fasorial 230 de acuerdo con varios comandos y señales, como por ejemplo una señal umbral de corriente 231 por ejemplo. La señal de comando de ángulo de fase limitada resultante 232 generada a partir del limitador de corriente fasorial 230 o la señal de comando de magnitud del voltaje limitada 234 son utilizadas a continuación por el generador de señal 240 para ajustar las señales de control del lado de la línea 168 (mostradas en la Figura 1). Con esto, durante los eventos transitorios, la corriente que fluye desde el controlador 144 del lado de la línea se controla indirectamente regulando el voltaje de CA asociado con el controlador 144. del lado de la línea. En otras palabras, el sistema de conversión de energía 10 puede atravesar los eventos transitorios reduciendo o eliminando la posibilidad de que los dispositivos semiconductores que residen en el convertidor 144 del lado de la línea estén dañados debido a problemas de sobrecorriente.

De aquí en adelante, haciendo referencia a las Figuras 16-18, se proporcionará una descripción detallada de cómo se implementa el limitador de corriente fasorial 230 para proporcionar límites en la señal de comando de ángulo de fase 216 y la señal de comando de magnitud del voltaje 226.

5 La Figura 16 ilustra un modelo de circuito simplificado de un convertidor 144 del lado de la línea en asociación con la red 18. El convertidor 144 del lado de la línea se simplifica al incluir una fuente de voltaje interno 67 y una impedancia interna 68. La fuente de voltaje 67 genera un voltaje interno 362 en un punto donde la fuente de voltaje 67 y la impedancia interna 68 están conectadas. La fuente de voltaje interno 67 genera un voltaje terminal 364 en un punto donde la impedancia interna 68 y la impedancia de la red 72 están conectadas. El punto donde la impedancia de la red 72 y la red 18 están conectadas es el voltaje de la red 368. Se entiende que el voltaje terminal 364 del convertidor del lado de la línea 144 puede derivarse en función del voltaje de la red 368 y la caída de voltaje 365 a través de la impedancia de la red 72. La caída de voltaje 365 a través de la impedancia de la red se puede derivar de la corriente 367 que fluye a través de la impedancia de la red 72 y la impedancia de la red 72. En una realización, la corriente 367 que fluye a través de la impedancia de la red 72 se puede controlar controlando el voltaje terminal 364 del convertidor del lado de la línea 144. Además, teniendo en cuenta la impedancia interna 68, el voltaje interno 362 del convertidor del lado de la línea 144 puede derivarse en base al voltaje de la red 368 y la caída de voltaje 369 a través de la impedancia interna 68 y la impedancia de la red 72. En un ejemplo, la corriente 367 que fluye a través de la impedancia interna 68 y la impedancia de la red 72 se puede gestionar controlando el voltaje interno 362 del convertidor del lado de la línea 144.

20 La Figura 17 ilustra un diagrama fasorial del voltaje del terminal 364, el voltaje de la red 368 y la caída de voltaje 367 a través de la impedancia de la red 72. En la Figura 17, una curva de capacidad de voltaje 502 se ilustra como un círculo discontinuo. El centro de la curva de capacidad 502 se define por el punto final del voltaje de la red 368. El radio de la curva de capacidad 502 se define por una caída de tensión máxima permitida a través de la impedancia de la red 72. La caída de tensión máxima permitida puede derivarse de una corriente máxima permitida y la impedancia de la red 72. El voltaje terminal 364 debe controlarse para que su punto final se posicione en el círculo discontinuo 502 o dentro de una región circular 508 rodeada por el círculo discontinuo 502. Por lo tanto, la diferencia de ángulo de fase entre el voltaje terminal 364 y el voltaje de la red 368 debe controlarse dentro de un ángulo de fase máximo 371 y un ángulo de fase mínimo 372. El ángulo de fase máximo 371 se define mediante una línea discontinua 504 que se extiende desde la tangente de origen hasta la parte superior de la curva de capacidad 502. El mínimo del ángulo de fase 372 se define por una línea discontinua 506 que se extiende desde la tangente de origen hasta la parte inferior de la curva de capacidad 502. Además, la magnitud del voltaje terminal 364 del convertidor del lado de la línea 144 deben controlarse dentro de un umbral de voltaje máximo y un umbral de voltaje mínimo. El umbral de voltaje mínimo está definido por una línea discontinua 512 que se extiende desde el origen hasta un punto donde el eje horizontal X cruza la porción izquierda de la curva de capacidad 502. El umbral de voltaje máximo está definido por una línea discontinua 514 que se extiende desde el origen hasta un punto donde el eje horizontal X cruza la porción derecha de la curva de capacidad 502.

35 La Figura 18 ilustra un diagrama de bloques detallado del limitador de corriente fasorial 230 mostrado en la Figura 2 de acuerdo con una realización ejemplar. En la realización ilustrada, el limitador de corriente fasorial 230 incluye una primera unidad de cálculo 410, una segunda unidad de cálculo 420 y una tercera unidad de cálculo 430. La primera unidad de cálculo 410 está configurada para calcular una caída máxima de voltaje 412 a través de la impedancia de la red 72 según la señal de corriente máxima permitida 231 y el valor de impedancia 233 de la impedancia de la red 72. La señal de corriente máxima permitida 231 puede obtenerse de acuerdo con las clasificaciones de corriente del convertidor del lado de la línea 144. El valor de impedancia 233 puede obtenerse usando la señal de error de corriente a través del controlador PI. La caída de voltaje máxima permitida calculada 412 se suministra a la segunda unidad de cálculo 420 y a la tercera unidad de cálculo 430. La segunda unidad de cálculo 420 calcula una señal de límite de ángulo de fase máximo 422 y una señal de límite de ángulo de fase mínimo 424 según la caída de voltaje máxima permitida 412 y una señal de retroalimentación de voltaje de la red 228. La tercera unidad de cálculo 430 calcula una señal de magnitud del voltaje máximo 432 y una señal de magnitud del voltaje mínimo 434 de acuerdo con la caída de voltaje máxima permitida 412 y la señal de retroalimentación de voltaje de la red 228.

50 La Figura 19 ilustra otra realización ejemplar del limitador de corriente fasorial 230 mostrado en la Figura 2. En la realización ilustrada, la señal de límite de ángulo de fase máximo 422 y la señal de límite de ángulo de fase mínimo 424 generadas a partir de la segunda unidad de cálculo 420 se usan adicionalmente para calcular la señal de magnitud del voltaje máximo 432 y la señal de magnitud del voltaje mínimo 434 por la tercera unidad de cálculo 430. Se puede entender que el límite de magnitud del voltaje del voltaje terminal 364 se puede calcular más fácilmente ya que el ángulo de fase está limitado dentro del ángulo de fase máximo y el ángulo de fase mínimo.

55 Como se describió anteriormente con respecto a las Figuras 18-19, la señal de límite de ángulo de fase máximo 422 y la señal de límite de ángulo de fase mínimo 424 derivadas del limitador de corriente fasorial 230 se usan para limitar la señal de comando de ángulo de fase 216 (véase la Figura 2) generada desde el regulador de potencia activa 210, y se produce una señal de comando de ángulo de fase limitada 232 (véase la Figura 2). Además, la señal de magnitud del voltaje máximo 432 y la señal de magnitud del voltaje mínimo 434 se usan para limitar la señal de comando de magnitud del voltaje 226 (ver Figura 2), y se produce una señal de comando de magnitud del voltaje limitada 234 (ver Figura 2). La señal de comando de ángulo de fase limitado 232 y la señal de comando de magnitud del voltaje limitada 234 se suministran al generador de señal 240, que genera las señales de control del

lado de la línea 168 para el convertidor del lado de la línea 144. En una implementación, el generador de señal 240 puede ser un generador de señal de modulación de la anchura de los pulsos (PWM) para generar señales de patrón PWM para las señales de control del lado de la línea 168. Debido a que las señales de control del lado de la línea 168 se generan basándose, al menos en parte, se puede gestionar en la corriente máxima permitida, la corriente que fluye desde el convertidor 144 del lado de la línea. Como resultado, el sistema de conversión de energía 10 puede atravesar los eventos transitorios.

La Figura 20 ilustra un diagrama de control detallado del controlador del lado de la línea 164 mostrado en la Figura 1 de acuerdo con otro ejemplo de realización. El diagrama de control mostrado en la Figura 20 es similar al diagrama de control mostrado en la Figura 2. Una de las diferencias es que una unidad de congelación y restablecimiento 244 se proporciona además en el controlador del lado de la línea 164. En general, la unidad de congelación y restablecimiento 244 está configurada para congelar uno o más elementos integradores en asociación con el controlador del lado de la línea 164 mientras el sistema de conversión de energía 10 se está recuperando de los eventos transitorios. La unidad de congelación y restablecimiento 244 está configurada además para restablecer estos integradores después de la recuperación. En una realización, tal como se muestra en la Figura 20, la unidad de congelación y restablecimiento 244 está acoplada al regulador de potencia activa 210 y al regulador de potencia reactiva 220. La unidad de congelación y restablecimiento 244 recibe la señal de retroalimentación de voltaje de la red 228 y genera señales de congelación 246, 248 utilizadas para congelar uno o más elementos integradores en asociación con el regulador de potencia activa 210 y el regulador de potencia reactiva 220.

La Figura 21 ilustra un diagrama de control detallado de un regulador de potencia 260 del regulador de potencia activa 210 en el que se incluye una característica anti-saturación. El diagrama de control mostrado en la Figura 21 es similar al diagrama de control mostrado en la Figura 4. Una de las diferencias es que dos dispositivos de conmutación 336, 338 están incluidos en el controlador PI 264 del regulador de potencia 260. Los dispositivos de conmutación 336, 338 pueden desconectarse en respuesta a la señal de congelación 246 que indica que el sistema de conversión de energía 10 se está recuperando de un evento transitorio. Cuando no hay un evento transitorio o el evento transitorio particular ha finalizado, los dispositivos de conmutación 336, 338 se pueden encender, de modo que el controlador PI 264 puede realizar operaciones normales.

La Figura 22 ilustra un diagrama de flujo de un método para congelar y restablecer el sistema de conversión de energía de acuerdo con una realización ejemplar. El método 3000 puede programarse con instrucciones de software almacenadas en un medio legible por ordenador, que cuando es ejecutado por un procesador, realiza varios pasos del método 3000. El medio legible por ordenador puede incluir medios volátiles y no volátiles, extraíbles y no extraíbles implementados en cualquier método o tecnología. El medio legible por ordenador incluye, entre otros, RAM, ROM, EEPROM, memoria flash u otra tecnología de memoria, CD-ROM, discos versátiles digitales (DVD) u otro almacenamiento óptico, casetes magnéticos, cinta magnética, almacenamiento en disco magnético u otros dispositivos de almacenamiento magnético, o cualquier otro medio no transitorio que pueda usarse para almacenar la información deseada y al que pueda acceder un sistema de ejecución de instrucciones.

En una implementación, el método 3000 puede comenzar en el bloque 3002. En el bloque 3002, se detecta un estado del voltaje en un punto entre el terminal de salida del convertidor de energía y la red eléctrica. El estado de voltaje detectado puede comprender un estado de alto voltaje, un estado de voltaje nominal y un estado de bajo voltaje. Más específicamente, como un ejemplo no limitador, el estado de alto voltaje puede representar que el voltaje de la red es 1,1 veces mayor que un voltaje nominal. El estado de voltaje nominal puede representar que el voltaje de la red es mayor que 0,9 veces el voltaje nominal y menor que 1.1 veces el voltaje nominal. El estado de bajo voltaje puede representar que el voltaje de la red es menor que 0,9 veces el voltaje nominal.

En el bloque 3004, se realiza una primera determinación en cuanto a si el voltaje detectado se cae a un valor menor que un valor de voltaje inferior o se aumenta a un valor mayor que un valor de voltaje superior. En una realización, el valor de voltaje inferior puede ser 0,9 veces el voltaje nominal y el valor de voltaje superior puede ser 1,1 veces el voltaje nominal. Si la determinación es positiva, significa que el sistema de conversión de energía está entrando en un evento transitorio o está experimentando una condición de fallo. Después de la determinación positiva, el procedimiento pasa al bloque 3006. Si la determinación es negativa, significa que el sistema de conversión de energía está funcionando normalmente, y el procedimiento vuelve al bloque 3002 para continuar detectando el estado de voltaje.

En el bloque 3006, se envía una señal de congelación al determinar que el sistema de conversión de energía está entrando en un evento transitorio o está experimentando una condición de fallo. En una realización, tal como se muestra en la Figura 20, las señales de congelación 246 y 248 se transmiten desde la unidad de congelación y restablecimiento 244 para congelar uno o más elementos integradores asociados con el regulador de potencia activa 210 y el regulador de potencia reactiva 220.

En el bloque 3008, se realiza una segunda determinación sobre si el estado de voltaje detectado está pasando de un estado de alto voltaje a un estado de voltaje nominal o está pasando de un estado de bajo voltaje a un estado de voltaje nominal. En caso afirmativo, el procedimiento va al bloque 3010, y si no, el procedimiento vuelve al bloque 3008 nuevamente.

En el bloque 3010, una vez que se ha alcanzado un estado de voltaje nominal, se envía una primera señal indicadora. La primera señal indicadora indica que el voltaje de la red ha vuelto a un voltaje nominal.

En el bloque 3012, se registra una duración de tiempo para representar el período de tiempo durante el cual el voltaje de la red permaneció en el nivel de voltaje nominal.

- 5 En el bloque 3014, se realiza una tercera determinación en cuanto a si la duración de tiempo en que el voltaje de la red permaneció en el nivel de voltaje nominal alcanza un valor de tiempo preestablecido. En una realización, como un ejemplo no limitativo, el valor del tiempo presente puede ser de 10 milisegundos. Si se determina que la duración de tiempo en que el voltaje de la red permaneció en el nivel de voltaje nominal alcanza el valor de tiempo preestablecido, el procedimiento pasa al bloque 3016, y si no, el procedimiento pasa al bloque 3008 para verificar si la recuperación aún está en progreso.
- 10

- En el bloque 3016, se envía una segunda señal indicadora. La segunda señal indicadora indica que el voltaje de la red se ha mantenido en el voltaje nominal durante un valor de tiempo preestablecido. En este caso, se puede determinar que el sistema de conversión de energía se está recuperando realmente del evento transitorio o de la condición de fallo. Con la primera señal indicadora enviada en el bloque 3010 y la segunda señal indicadora enviada en el bloque 3016, los elementos integradores del sistema de conversión de energía que se han congelado en el bloque 3006 se pueden restablecer para realizar operaciones de integración normales.
- 15

- En el bloque 3018, después del proceso de recuperación, se restablece la primera señal indicadora y se borra la duración del tiempo registrado para la siguiente determinación de la recuperación del sistema de conversión de energía. Después del bloque 3018, el procedimiento vuelve al bloque 3002 para determinar aún más el estado del voltaje.
- 20

- Si bien la invención se ha descrito haciendo referencia a realizaciones ejemplares, los expertos en la materia entenderán que se pueden hacer varios cambios y se pueden sustituir elementos equivalentes por los mismos sin apartarse del alcance de la invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas. Además, se pueden hacer muchas modificaciones para adaptar una situación o material particular a las enseñanzas de la invención sin apartarse del alcance de la misma. Por lo tanto, se pretende que la invención no se limite a la realización particular descrita como el mejor modo contemplado para llevar a cabo esta invención, sino que la invención incluirá todas las realizaciones que caen dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.
- 25

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de conversión de energía (10), que comprende:

un bus de CC (146) para recibir energía de corriente continua (CC);

5 un convertidor del lado de la línea (144) acoplado al bus de CC (146) para convertir la alimentación de CC en el bus de CC en alimentación de corriente alterna (CA); y

un controlador de la fuente de voltaje (164) para proporcionar señales de control al convertidor del lado de la línea (144) para permitir que el convertidor del lado de la línea regule la alimentación de CA, comprendiendo el controlador de la fuente de voltaje:

10 un regulador de potencia activa (210) adaptado para generar una señal de comando de frecuencia interna (262) en base a una señal de comando de potencia (212) y a una señal de retroalimentación de potencia (214), y para generar una señal de comando de ángulo de fase (216) integrando la señal de comando de frecuencia interna (262);

15 un regulador de potencia reactiva (220) adaptado para generar una señal de comando de magnitud del voltaje (226) en base a una señal de comando de potencia reactiva (222) y a una señal de retroalimentación de potencia reactiva (224);

caracterizado por que comprende además:

un limitador de corriente (230) adaptado para, durante un evento transitorio, limitar la señal de comando de ángulo de fase (216) y la señal de comando de magnitud del voltaje (226) en base, al menos en parte, a un umbral de corriente eléctrica;

20 un generador de señal (240) adaptado para generar las señales de control para el convertidor del lado de la línea (144) en base a la señal de comando de ángulo de fase limitada (232) y la señal de comando de magnitud del voltaje limitada (234) desde el limitador de corriente (230);

25 un limitador de voltaje (290) adaptado para generar una señal de corrección de frecuencia (298) para la señal de comando de frecuencia interna (262) o la señal de corrección de ángulo de fase (296) para la corrección de la señal de comando de ángulo de fase (216) si una señal de retroalimentación de voltaje del bus de CC (156) es superior a un valor de voltaje límite superior o inferior a un valor de voltaje límite inferior durante el evento transitorio.

30 2. El sistema de conversión de energía de la reivindicación 1, en el que el sistema de conversión de energía (10) comprende además un dispositivo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) (26) para generar una señal de referencia de potencia MPPT (159), en el que el controlador de la fuente de voltaje (164) además comprende una unidad de ajuste de comando de potencia (289) configurada para restringir la señal de comando de potencia (212) de acuerdo con la señal de referencia de potencia MPPT (159).

35 3. El sistema de conversión de energía de la reivindicación 1 o 2, en el que el controlador de la fuente de voltaje (164) comprende además una unidad de congelación para determinar si el sistema de conversión de energía (10) está entrando al evento transitorio o recuperándose del evento transitorio mediante la detección de un voltaje de retroalimentación en la salida del convertidor del lado de la línea (144), y generar una señal de estado utilizada para congelar uno o más elementos integradores del regulador de potencia activa (210) hasta que se determine que el sistema de conversión de energía se ha recuperado del evento transitorio, en el que al menos se proporciona un dispositivo de conmutación (336, 338) en serie de uno o más elementos integradores y la unidad de congelación está adaptada para apagar el dispositivo de conmutación (336, 338) durante el evento transitorio.

45 4. El sistema de conversión de energía de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el limitador de corriente (230) está configurado para calcular un umbral de magnitud del voltaje (412) en base al menos en parte al umbral de corriente eléctrica (231) y a una impedancia (233) en el terminal de salida del convertidor del lado de la línea, y además para calcular una señal de límite de ángulo de fase (422,424) para la señal de comando de ángulo de fase (216) en base al menos en parte al umbral de magnitud del voltaje calculado (412) y a un voltaje de la red de retroalimentación (152).

50 5. El sistema de conversión de energía de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el sistema de conversión de energía (10) comprende además un circuito de bucle de bloqueo de fase (PLL) (280) para generar una señal de referencia de frecuencia (282) o una señal de referencia de ángulo de fase (284) de un voltaje de la red, y el regulador de potencia activa (210) está configurado además para generar la señal de comando de ángulo de fase (216) ajustando la señal de comando de frecuencia interna (262) de acuerdo con la señal de referencia de frecuencia (282) o ajustando la señal de comando de ángulo de fase (216) según la señal de referencia del ángulo de fase (284).

- 5 6. El sistema de conversión de energía de cualquier reivindicación precedente, en el que la señal de retroalimentación de potencia reactiva (224) se obtiene midiendo la salida de alimentación de CA del convertidor del lado de la línea, y en el que el controlador de la fuente de voltaje (164) está configurado para usar la señal de comando de magnitud del voltaje (226) al generar las señales de control proporcionadas al convertidor del lado de la línea.
7. El sistema de conversión de energía de la reivindicación 6, en el que:
- el controlador de la fuente de voltaje (164) está configurado para recuperarse del evento transitorio al recibir un voltaje de retroalimentación (152) a la salida del convertidor del lado de la línea (144); o
- 10 el limitador de corriente (230) está configurado para calcular un umbral de magnitud del voltaje (412) en base al menos en parte al umbral de corriente eléctrica (231) y a una impedancia (233) en el terminal de salida del convertidor del lado de la línea, y para calcular además un límite de magnitud del voltaje (432,434) en la señal de comando de magnitud del voltaje (226) en base al menos en parte al umbral de magnitud del voltaje calculado (412) y a un voltaje de la red de retroalimentación (152); o
- 15 el limitador de corriente (230) está configurado para calcular un umbral de magnitud del voltaje (412) en base al menos en parte al umbral de corriente eléctrica (231) y a una impedancia (233) en el terminal de salida del convertidor del lado de la línea, para calcular un límite del ángulo de fase (422,424) en base al menos en parte al umbral de magnitud del voltaje (412) y a un voltaje de la red de retroalimentación (152), y para calcular un límite de magnitud del voltaje (432,434) en la señal de comando de magnitud del voltaje (226) en base al menos en parte al límite del ángulo de fase (422,424) y al voltaje de la red de retroalimentación (152).
- 20 8. Un método para hacer funcionar un convertidor del lado de la línea (144) en un sistema de conversión de energía (10) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, comprendiendo el método:
- generar señales de control para el convertidor del lado de la línea (144) en base al menos en parte a una señal de comando de potencia y a una señal de retroalimentación de potencia;
- 25 generar una señal de comando de frecuencia interna (262) en base a una señal de comando de potencia (212) y una señal de retroalimentación de potencia (214), y generar una señal de comando de ángulo de fase (216) integrando la señal de comando de frecuencia interna (262);
- generar una señal de comando de magnitud del voltaje (226) en base a una señal de comando de potencia reactiva (222) y una señal de retroalimentación de potencia reactiva (224);
- 30 limitar, durante un evento transitorio, la señal de comando de ángulo de fase (216) y la señal de comando de magnitud del voltaje (226) en base al menos en parte a un umbral de corriente eléctrica;
- generar las señales de control para el convertidor del lado de la línea (144) basándose en la señal de comando de ángulo de fase limitada (262) y la señal de comando de magnitud del voltaje limitado (226) desde el limitador de corriente (230);
- 35 generar una señal de corrección de frecuencia (298) para la señal de comando de frecuencia interna (262) o una señal de corrección de ángulo de fase (296) para corregir la señal de comando de ángulo de fase (216) si una señal de retroalimentación de voltaje del bus de CC (156) es mayor que un valor de voltaje límite superior o menor que un valor de voltaje límite inferior durante el evento transitorio.
9. El método de la reivindicación 8, que comprende además:
- 40 congelar uno o más elementos integradores del sistema de conversión de energía (10) al determinar que el sistema de conversión de energía (10) está experimentando el evento transitorio apagando un dispositivo de conmutación (336, 338) dispuesto en serie de uno o más elementos integradores durante el evento transitorio; y
- restablecer el uno o más elementos integrantes del sistema de conversión de energía (10) al determinar que el sistema de conversión de energía se ha recuperado.
10. El método de la reivindicación 8 o 9, que comprende además:
- 45 calcular un umbral de magnitud del voltaje (412) en base al menos en parte al umbral de corriente eléctrica (231) y a una impedancia (233) en el terminal de salida del convertidor del lado de la línea;
- calcular una señal de límite de ángulo de fase (422,424) en base al menos en parte al umbral de magnitud del voltaje calculado (412) y a un voltaje de la red de retroalimentación (152);
- 50 proporcionar un límite en la señal de comando de ángulo de fase (216) usando la señal de límite de ángulo de fase (422,424).

11. El método de una de las reivindicaciones 8 a 10, que comprende además:

usar un circuito de circuito cerrado de fase (PLL) (280) para generar una señal de referencia de frecuencia (282) o una señal de referencia de ángulo de fase (284) de un voltaje de la red;

5 ajustar la señal de comando de frecuencia interna (262) de acuerdo con la señal de referencia de frecuencia (282) o ajustar la señal de comando de ángulo de fase (216) de acuerdo con la señal de referencia de ángulo de fase (284).

12. El método de una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 11, en el que la señal de potencia reactiva de retroalimentación (224) se obtiene midiendo la salida de alimentación de CA del convertidor del lado de la línea y utilizando la señal de comando de magnitud del voltaje (226) al generar las señales de control.

13. El método de una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 12, que comprende además:

10 calcular un umbral de magnitud del voltaje (412) en base al menos en parte al umbral de corriente eléctrica (231) y a una impedancia (233) en el terminal de salida del convertidor del lado de la línea;

calcular un límite de magnitud del voltaje (432,434) en base al menos en parte al umbral de magnitud del voltaje calculado (412) y a un voltaje de la red de retroalimentación (152);

15 proporcionar un límite en la señal de comando de magnitud del voltaje (226) usando el límite de magnitud del voltaje (432,434);

calcular un límite de ángulo de fase (422,424) en base al menos en parte al umbral de magnitud del voltaje (412) y al voltaje de la red de retroalimentación (152).

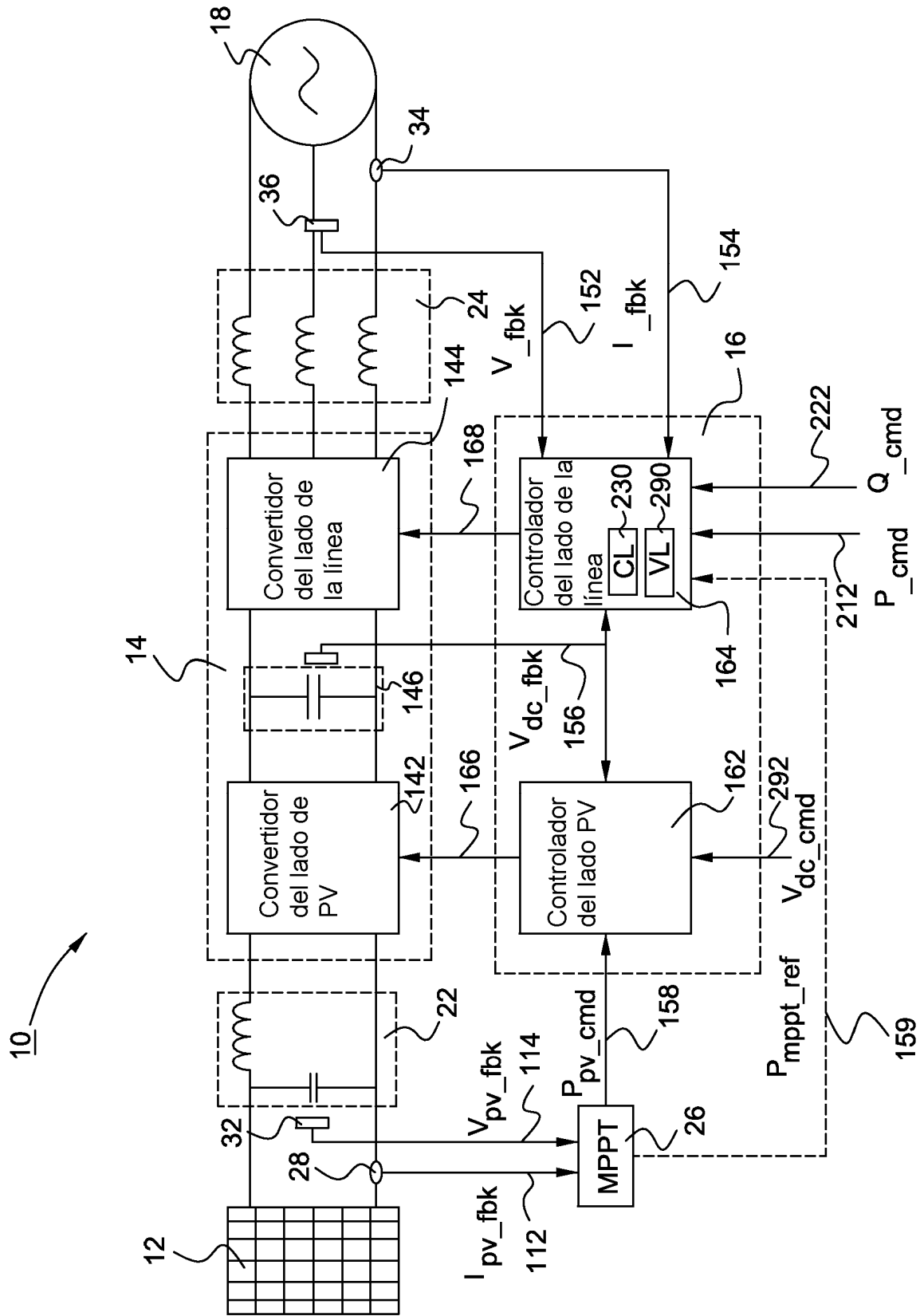


FIG. 1

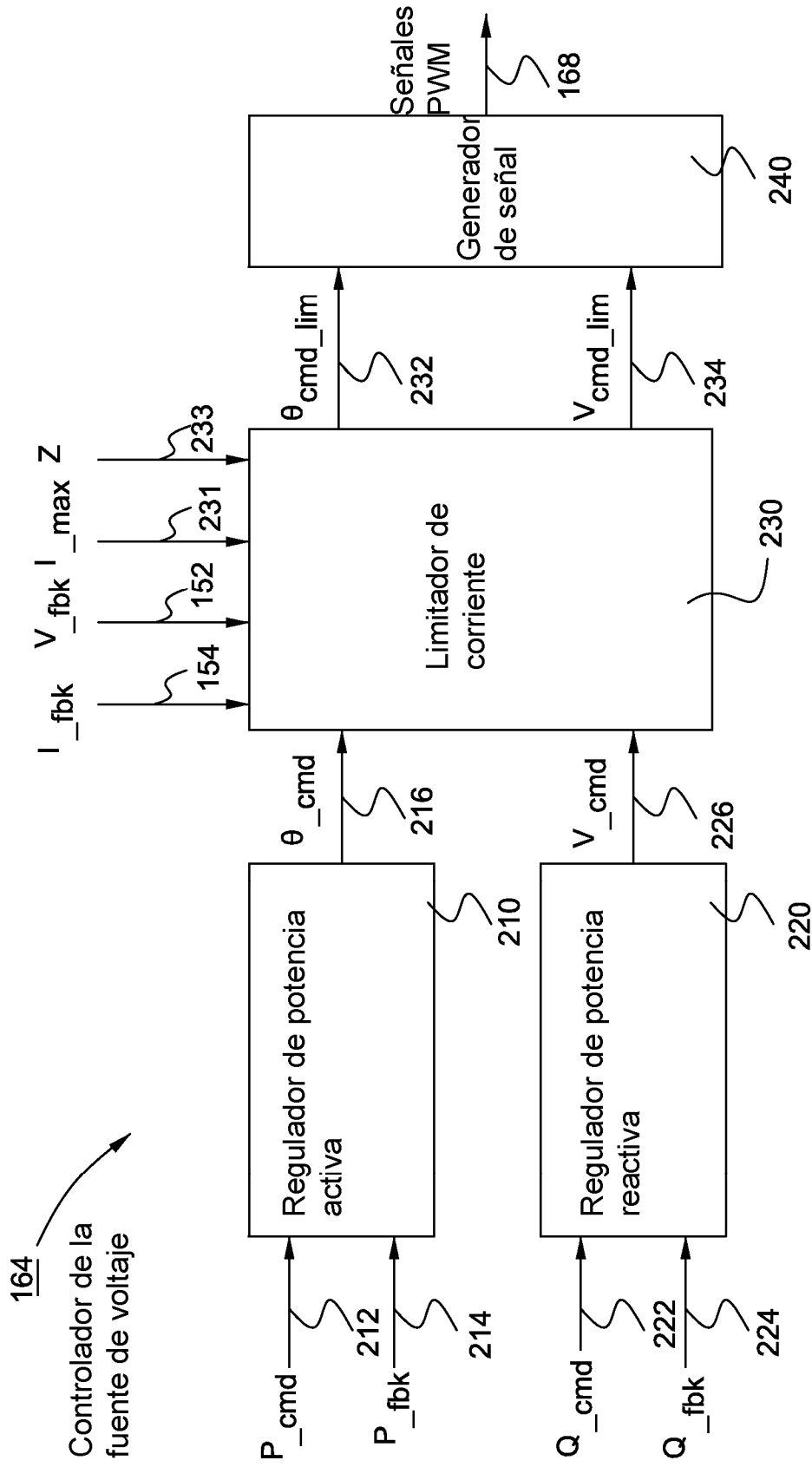


FIG. 2

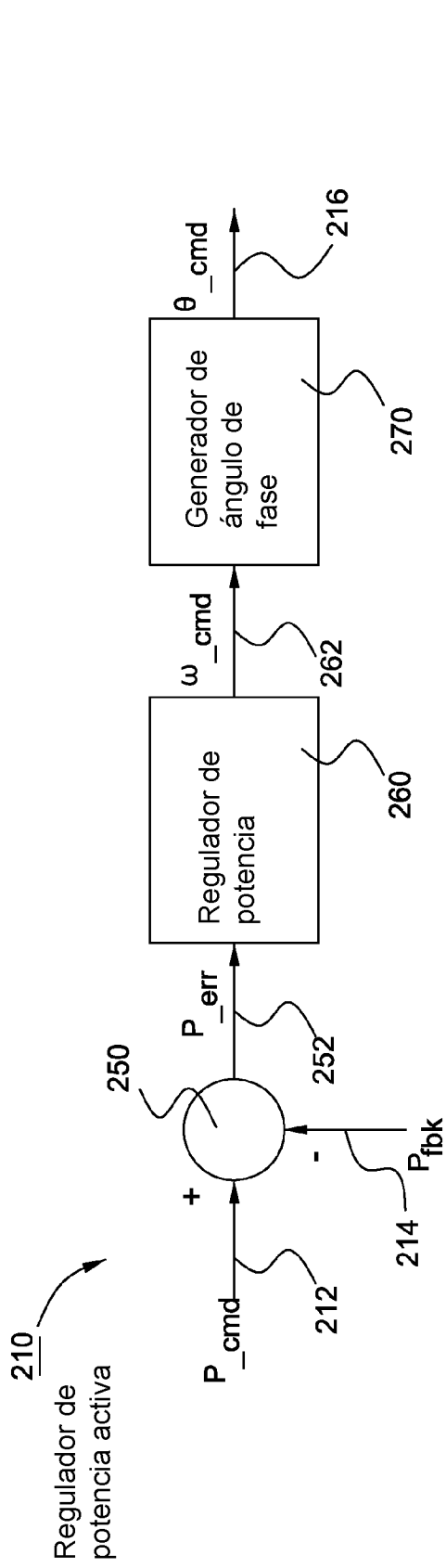


FIG. 3

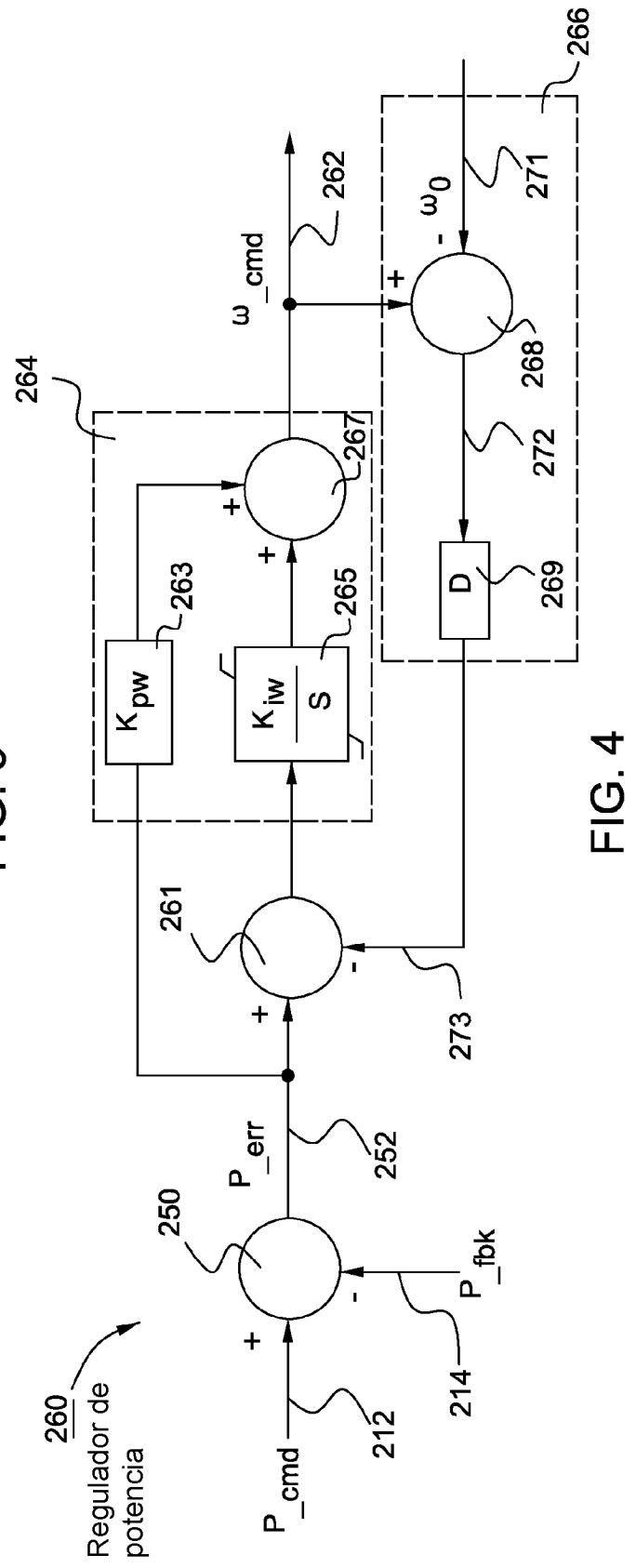


FIG. 4

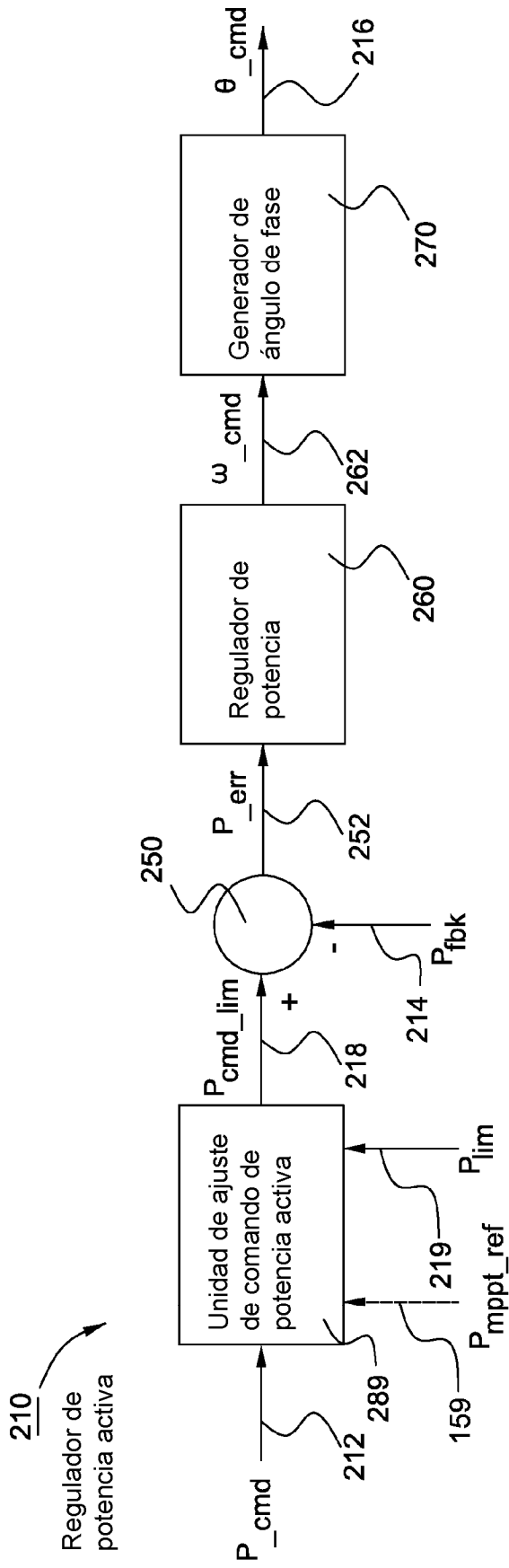


FIG. 5

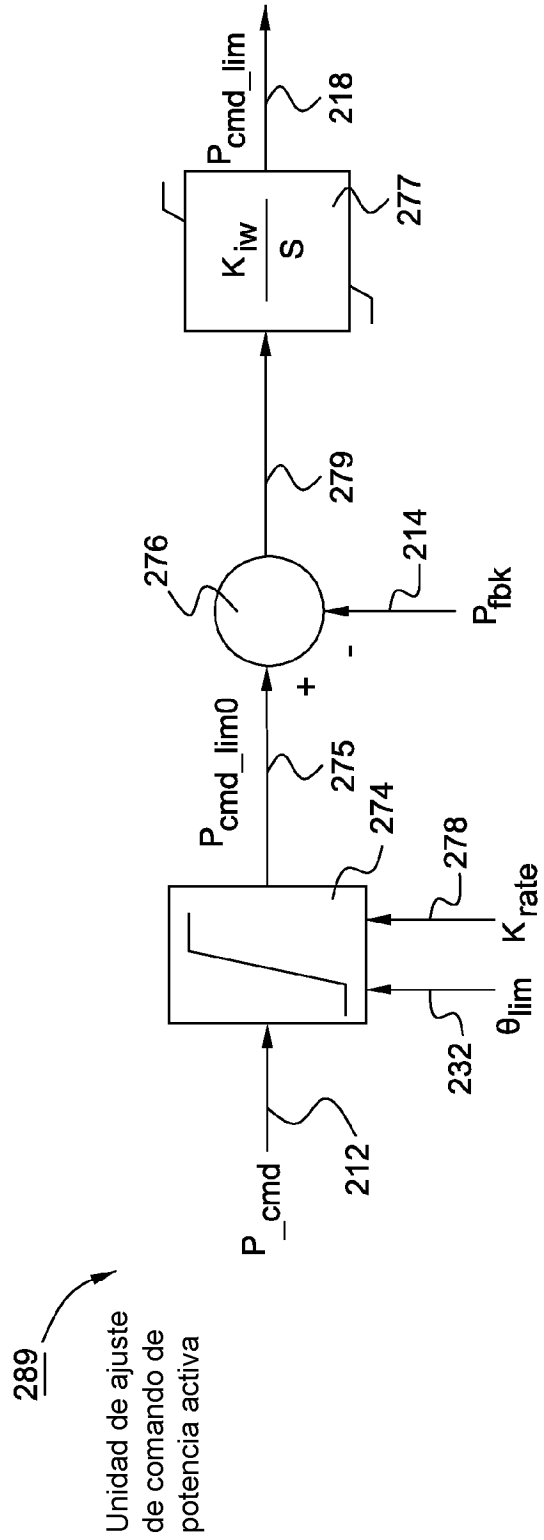


FIG. 6

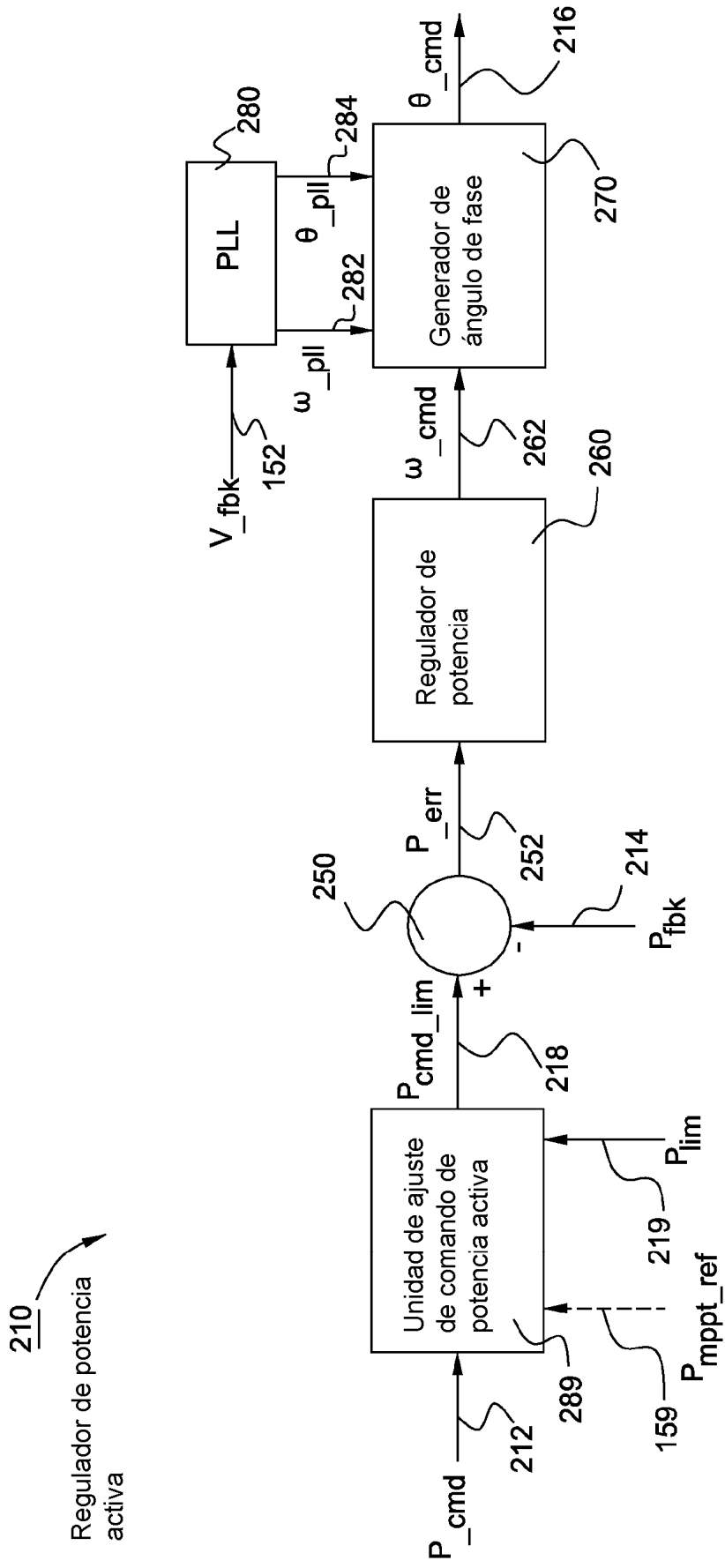


FIG. 7

270
Generador de
ángulo de fase

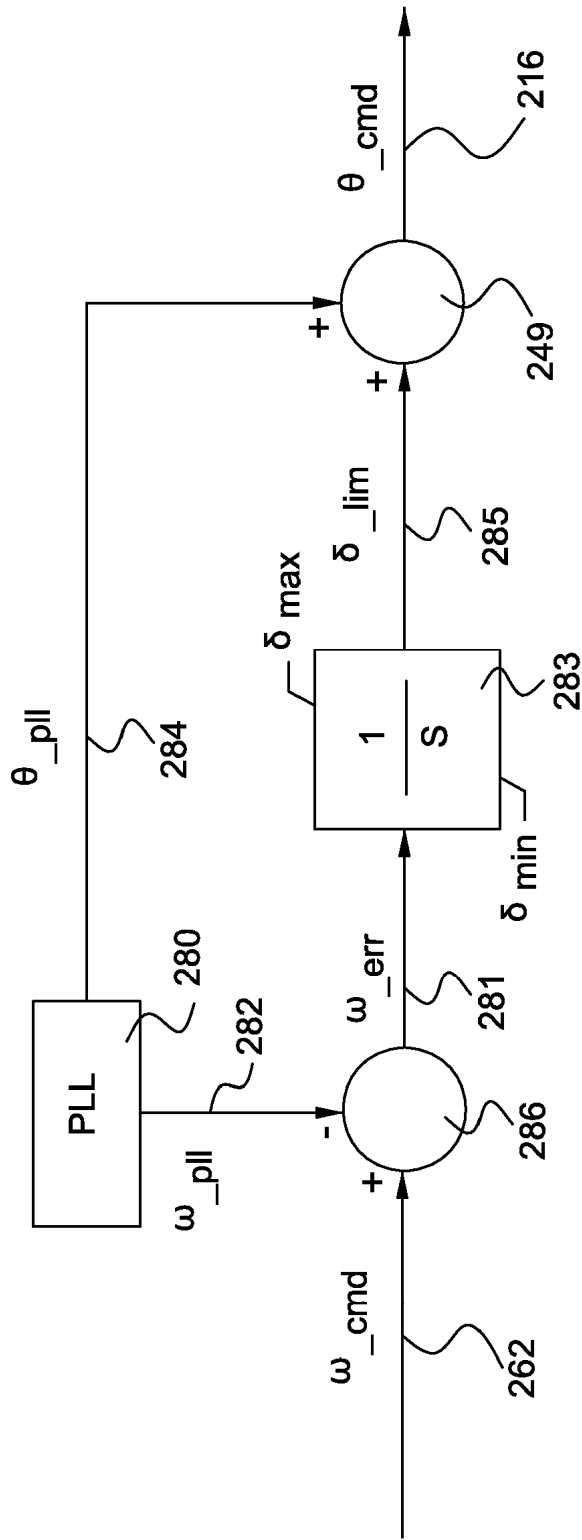


FIG. 8

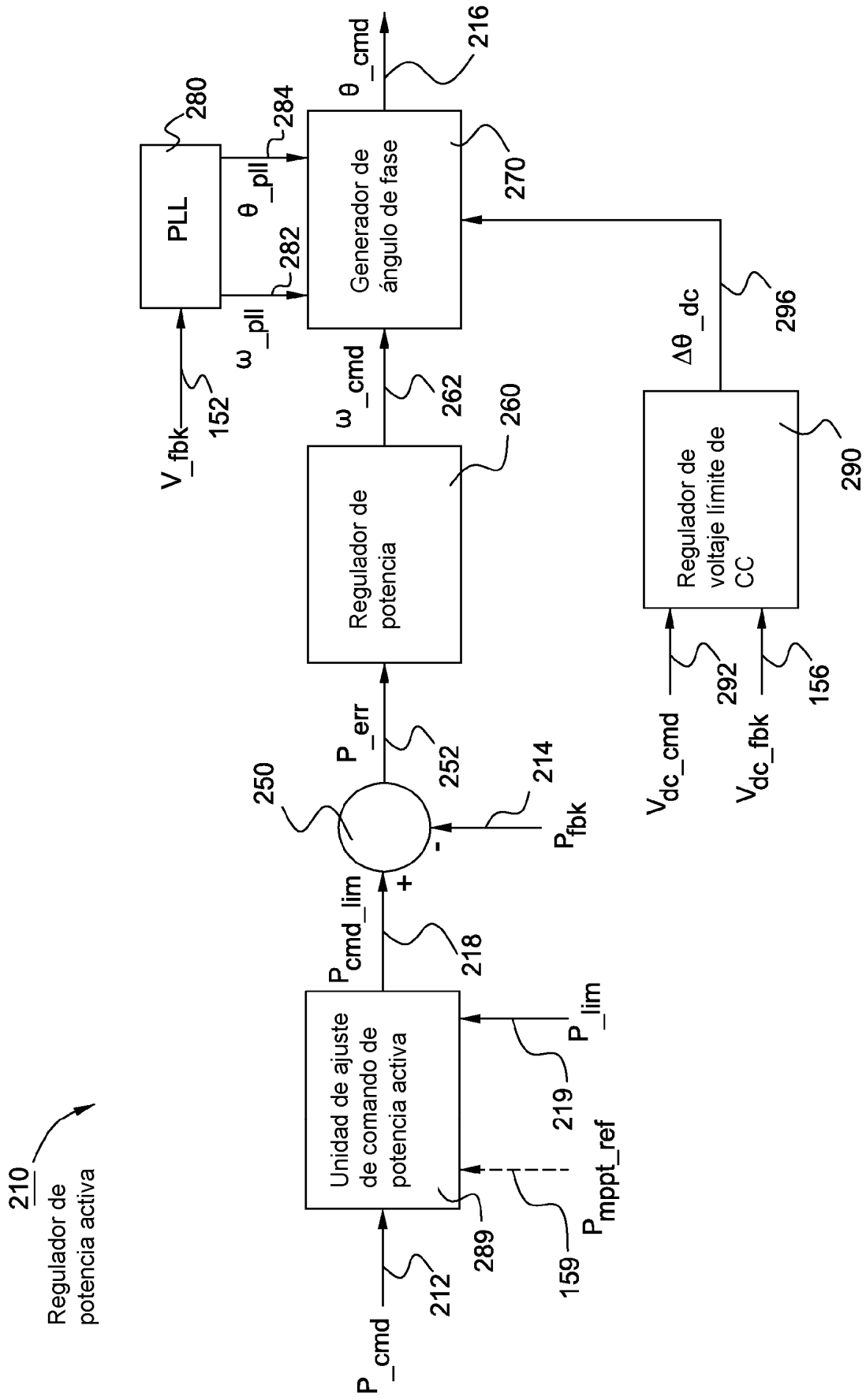


FIG. 9

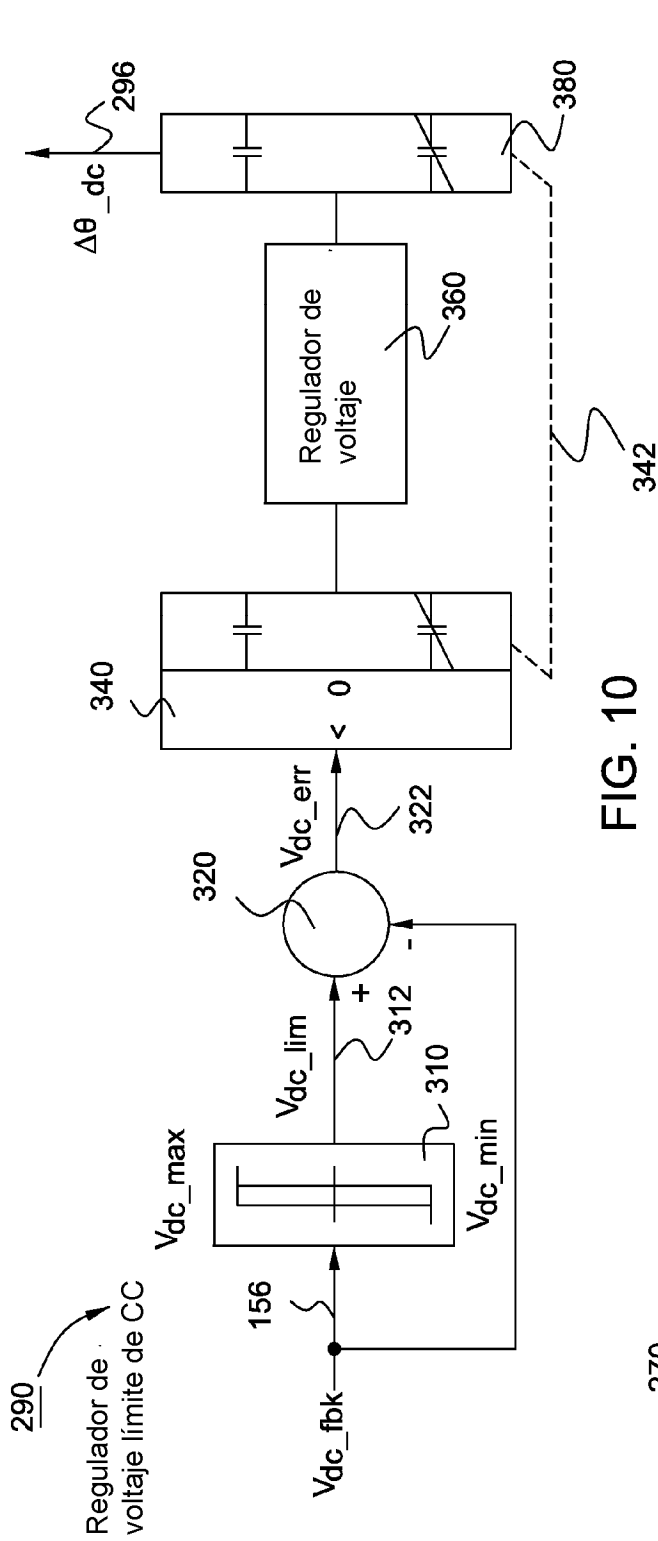


FIG. 10

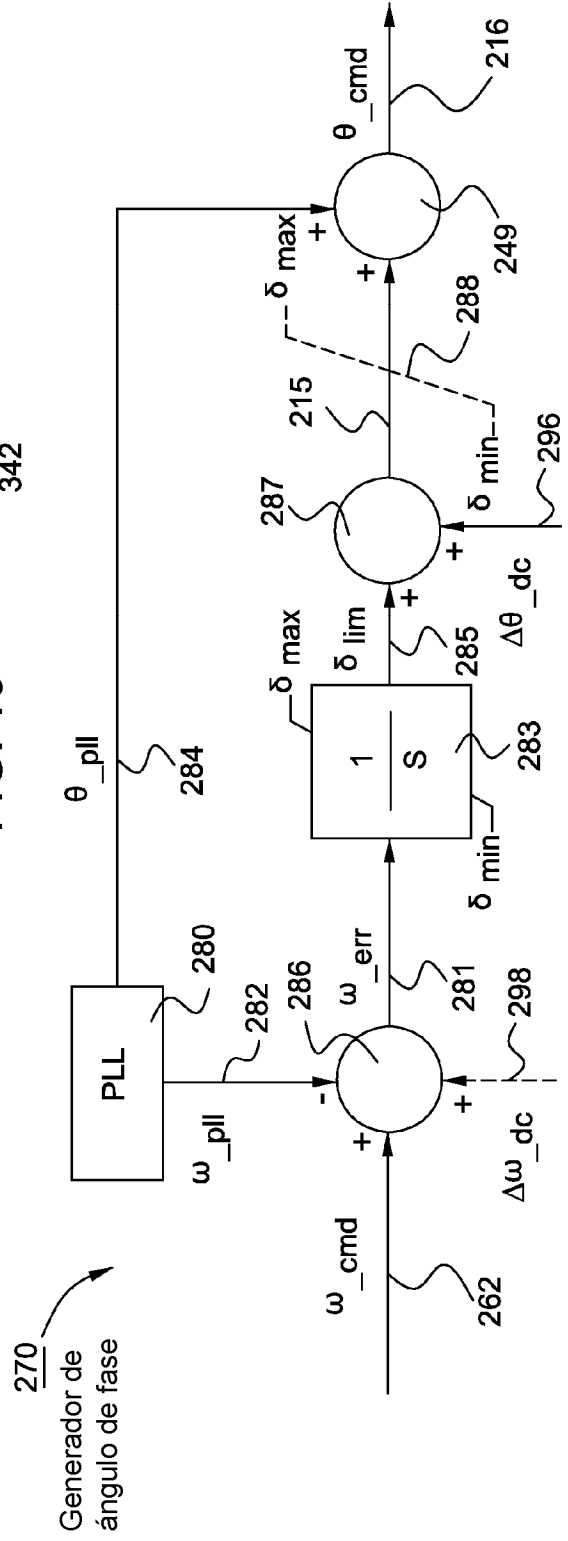
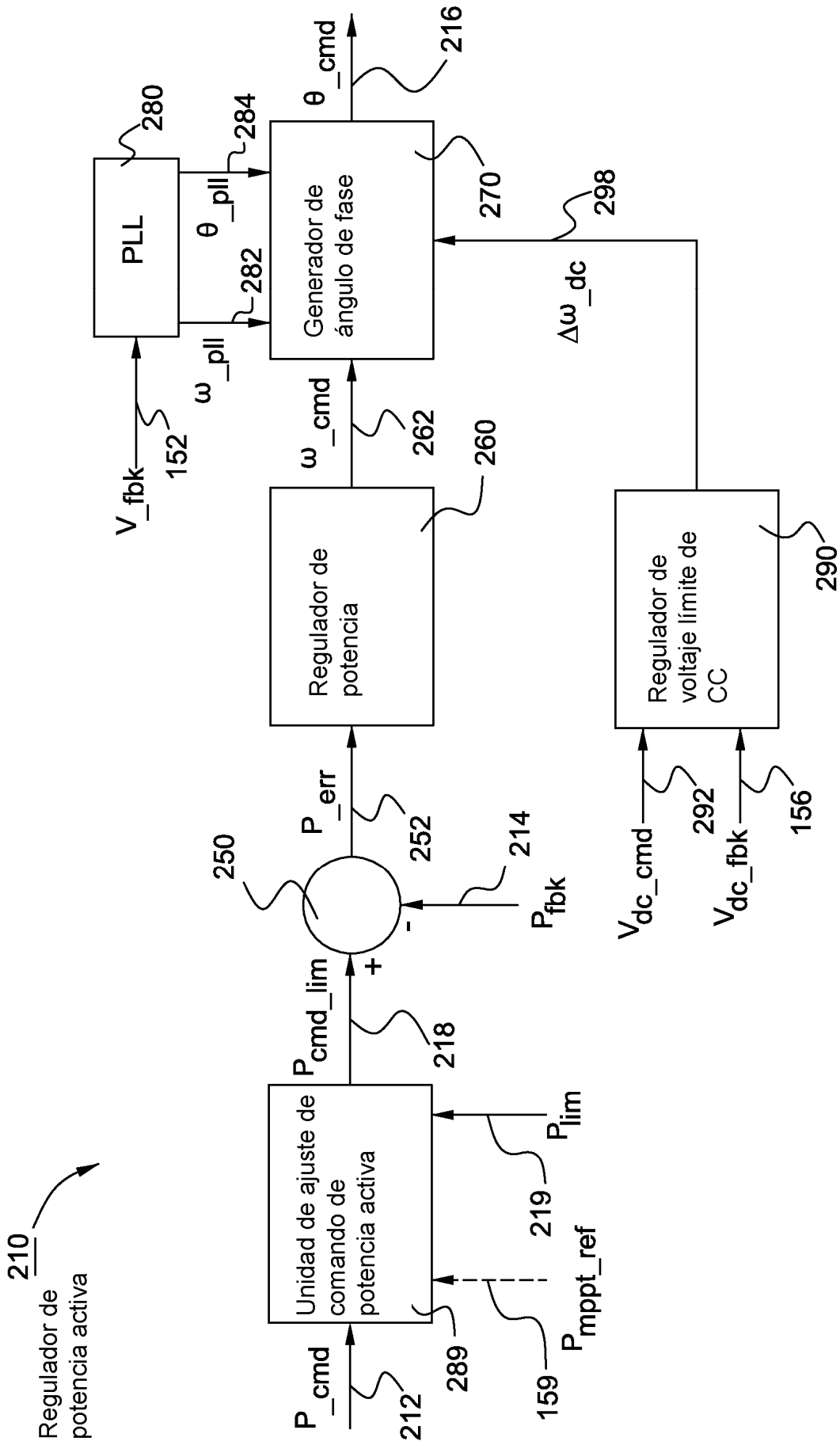


FIG. 11



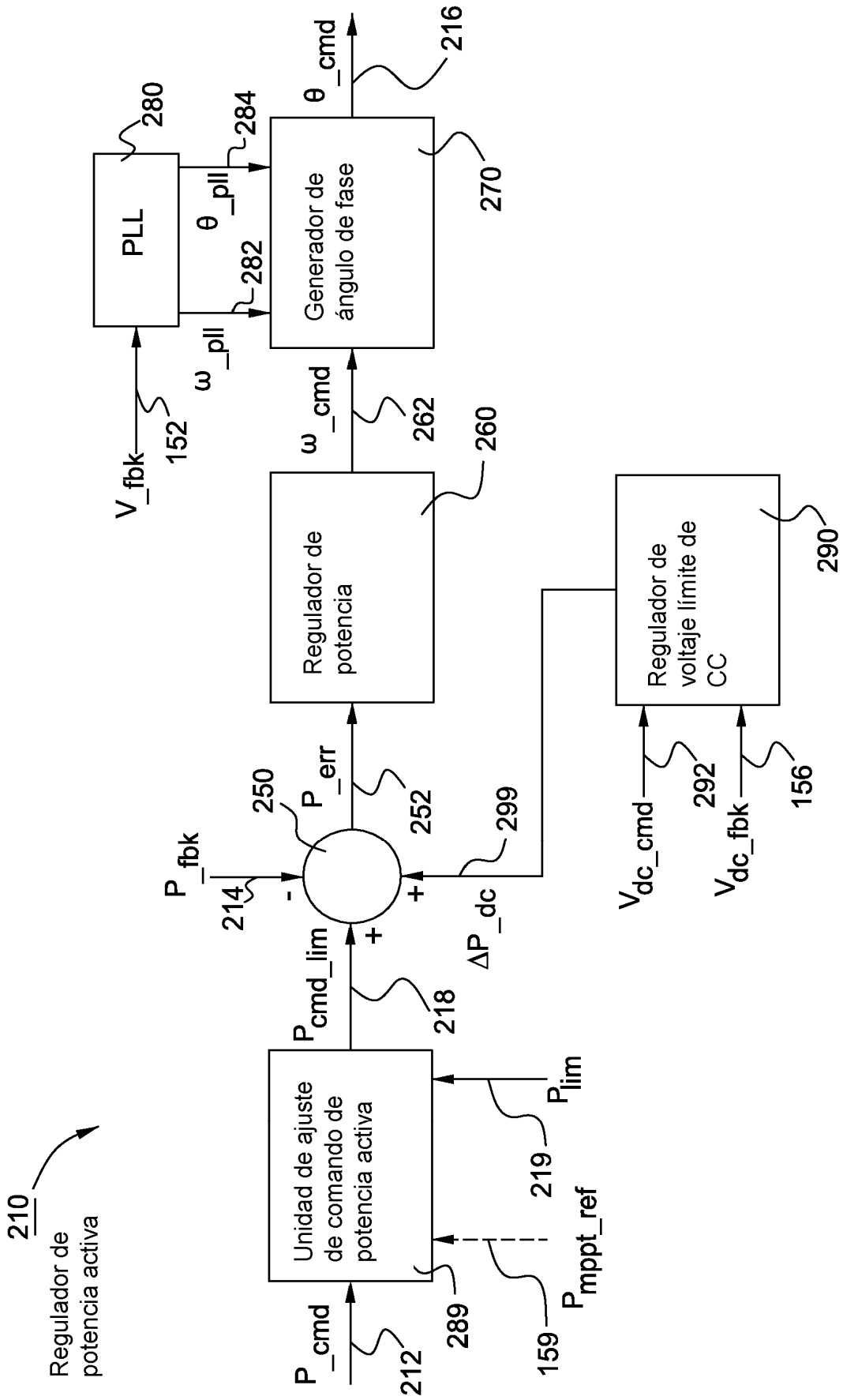


FIG. 13

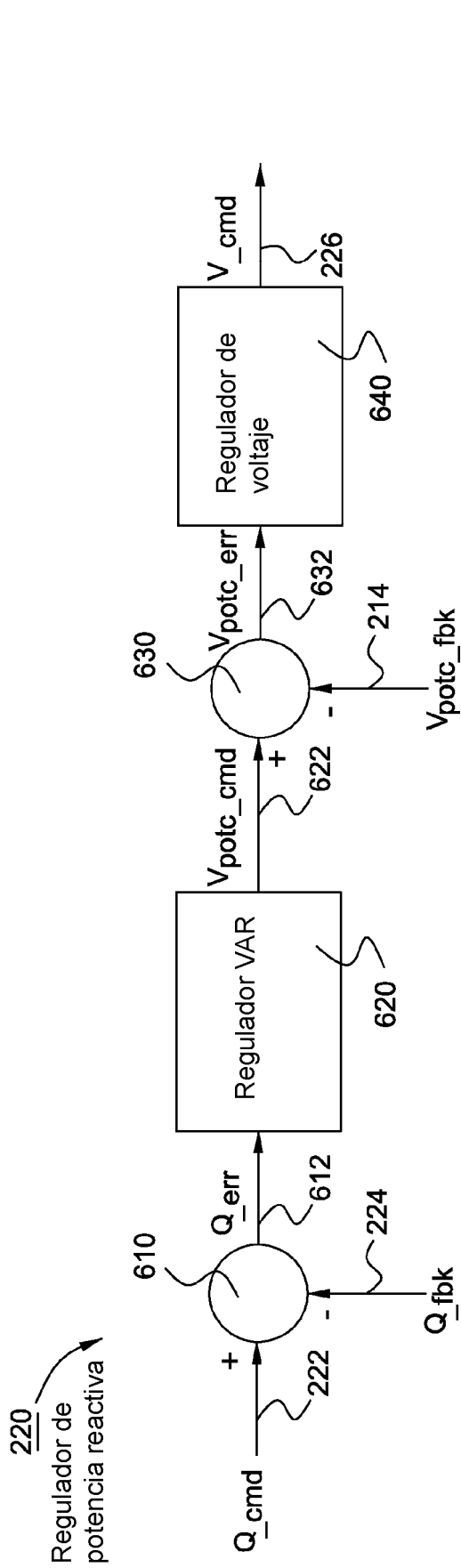


FIG. 14

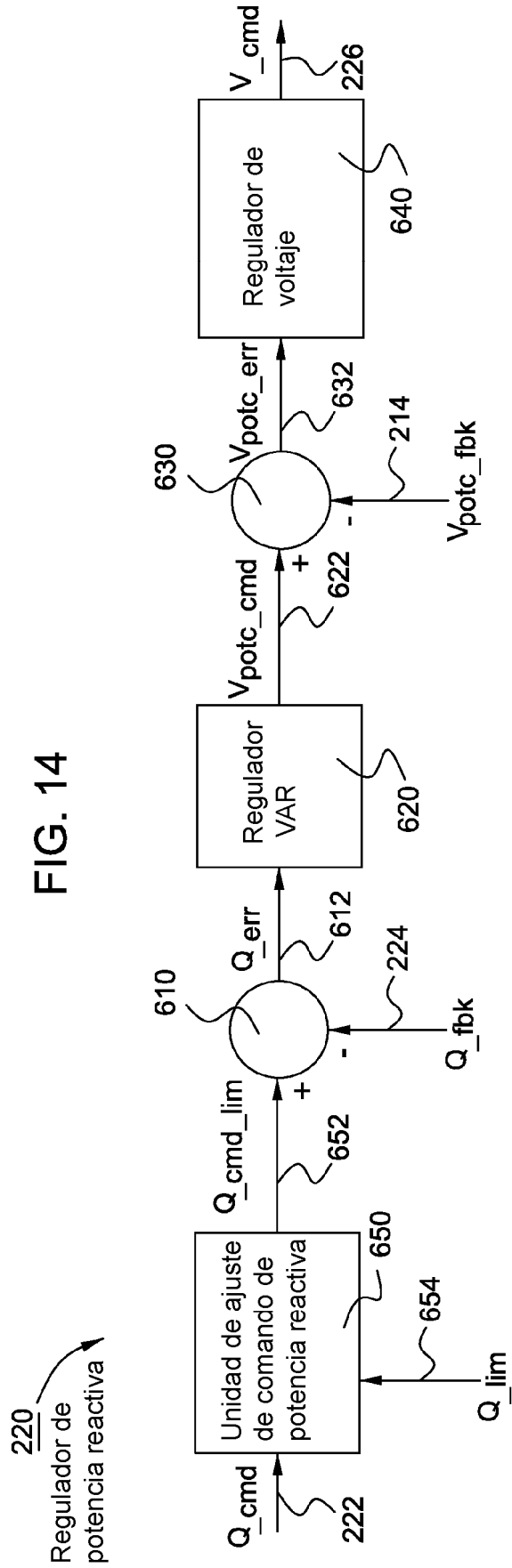


FIG. 15

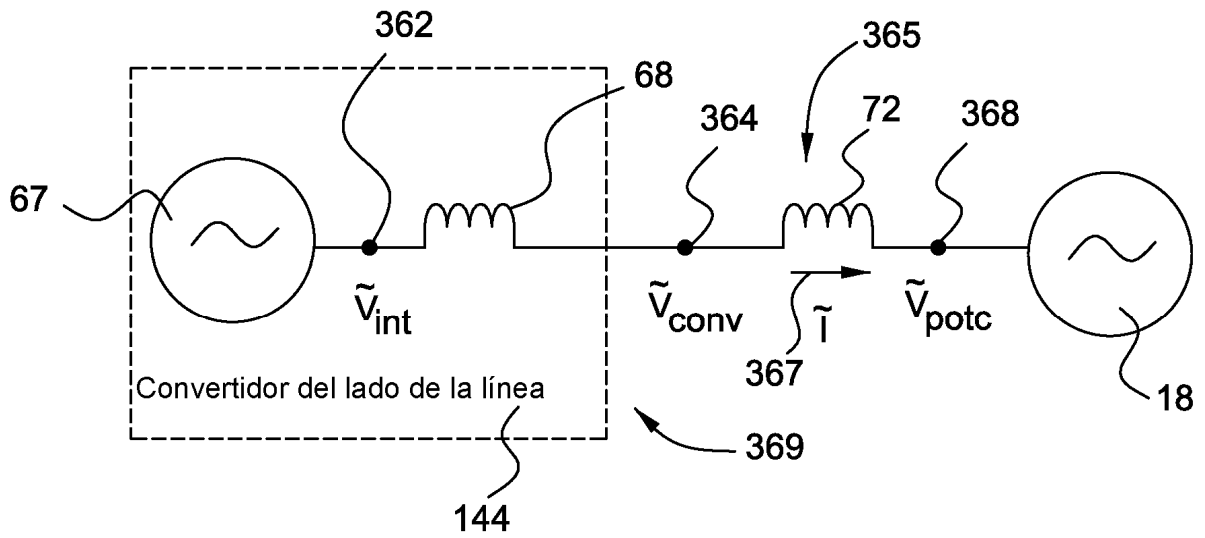


FIG. 16

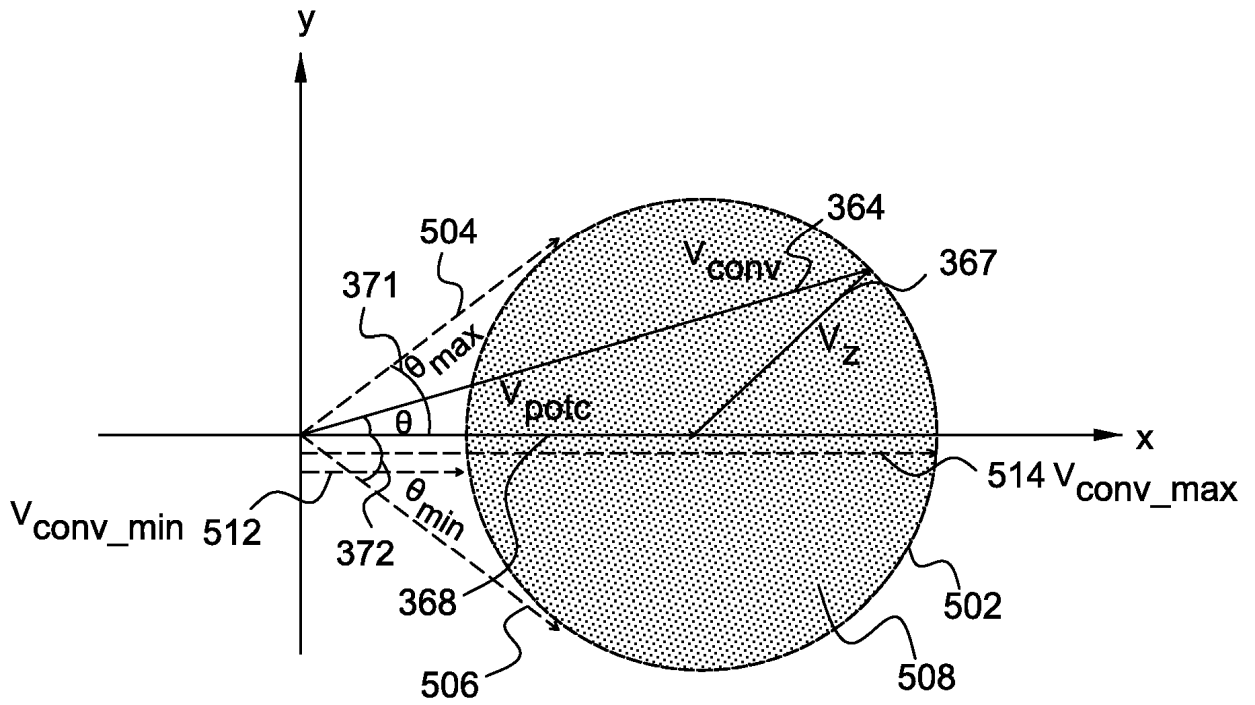


FIG. 17

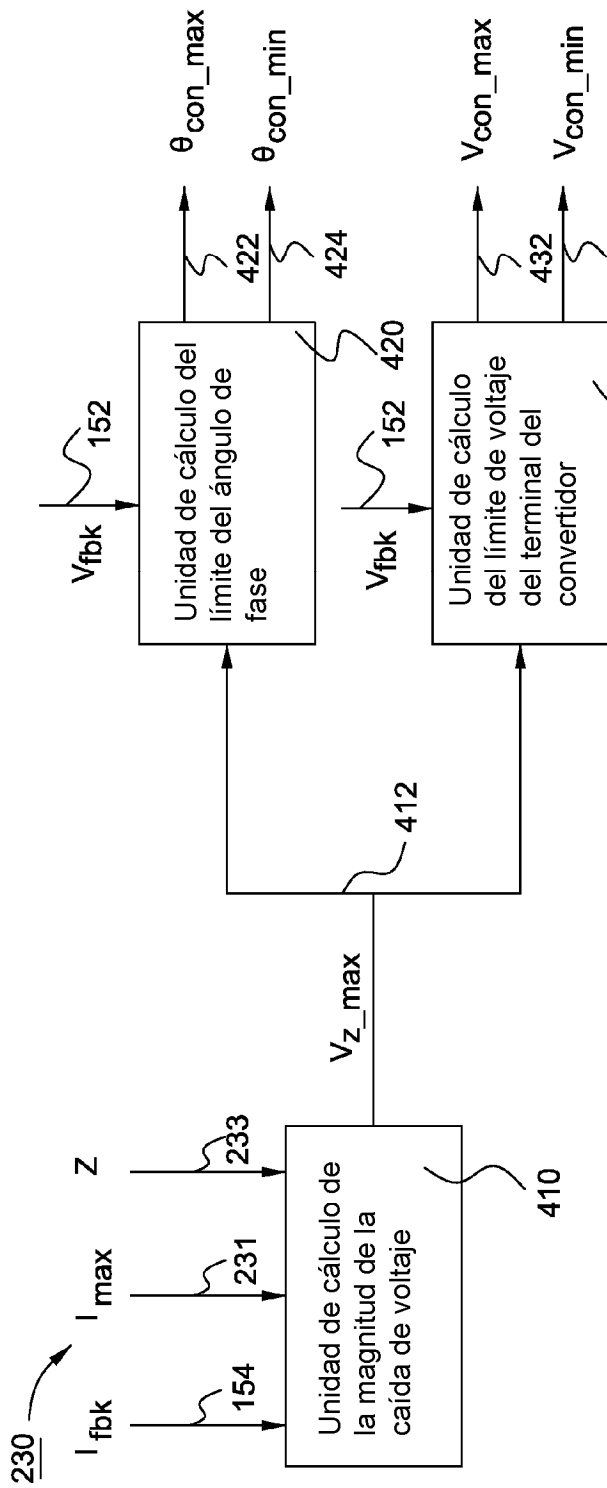


FIG. 18

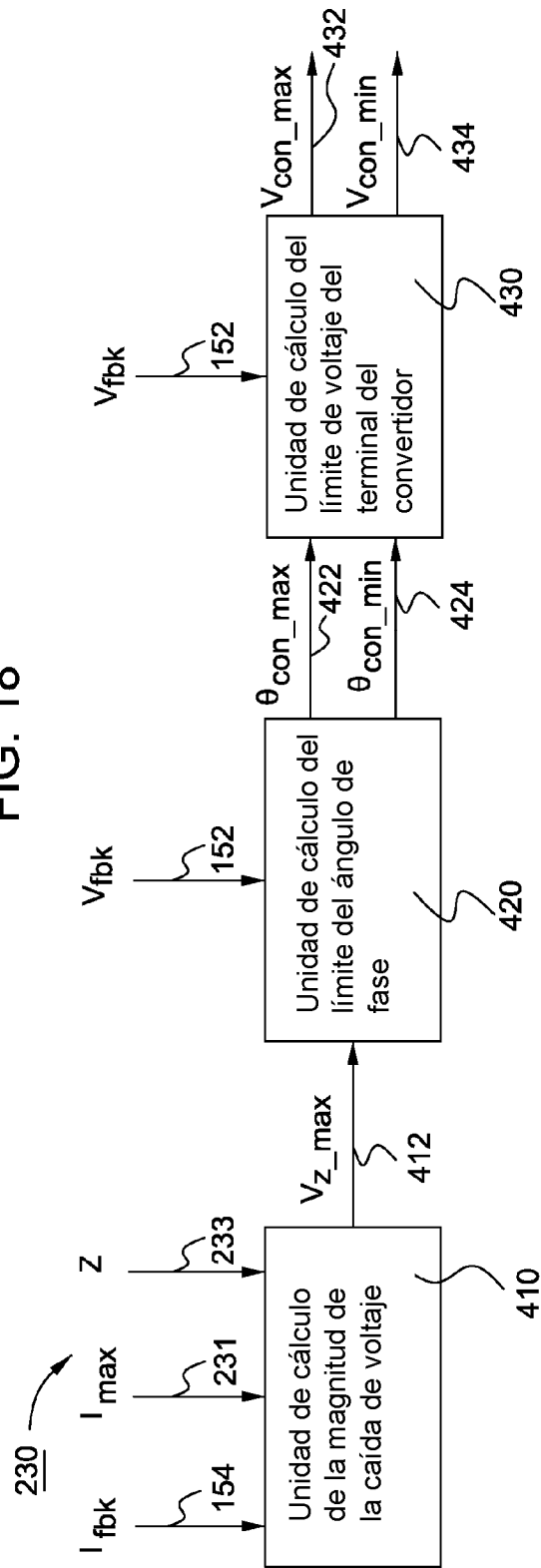


FIG. 19

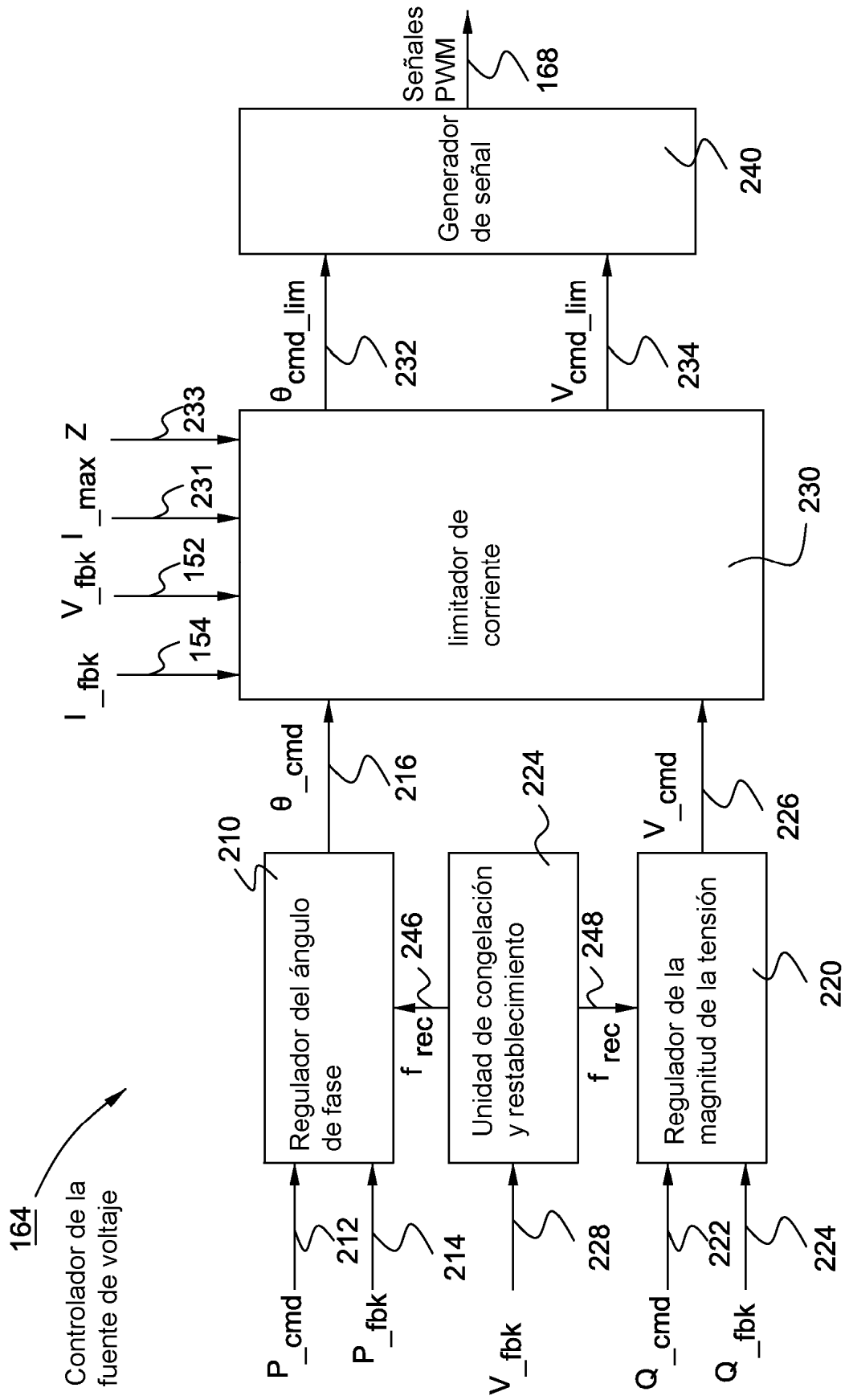


FIG. 20

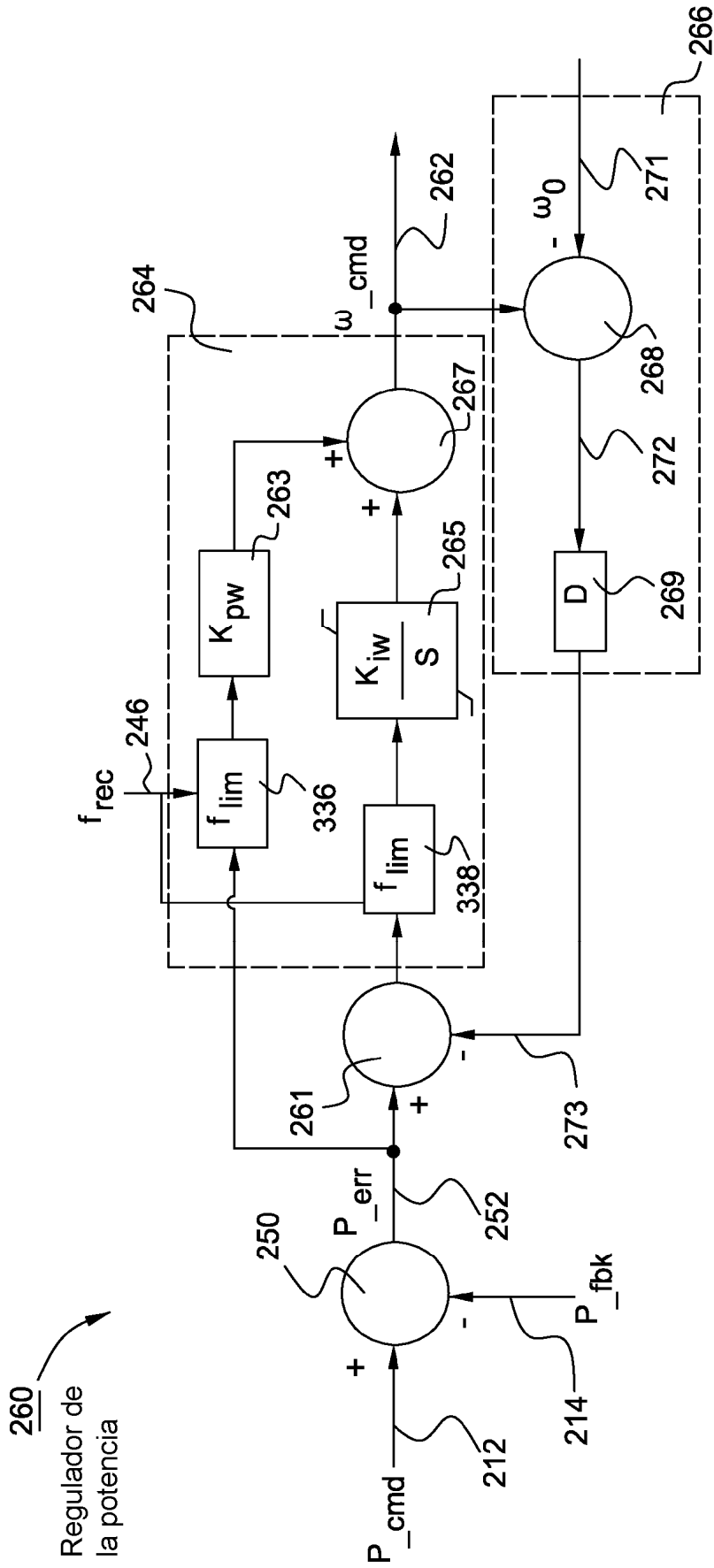


FIG. 21

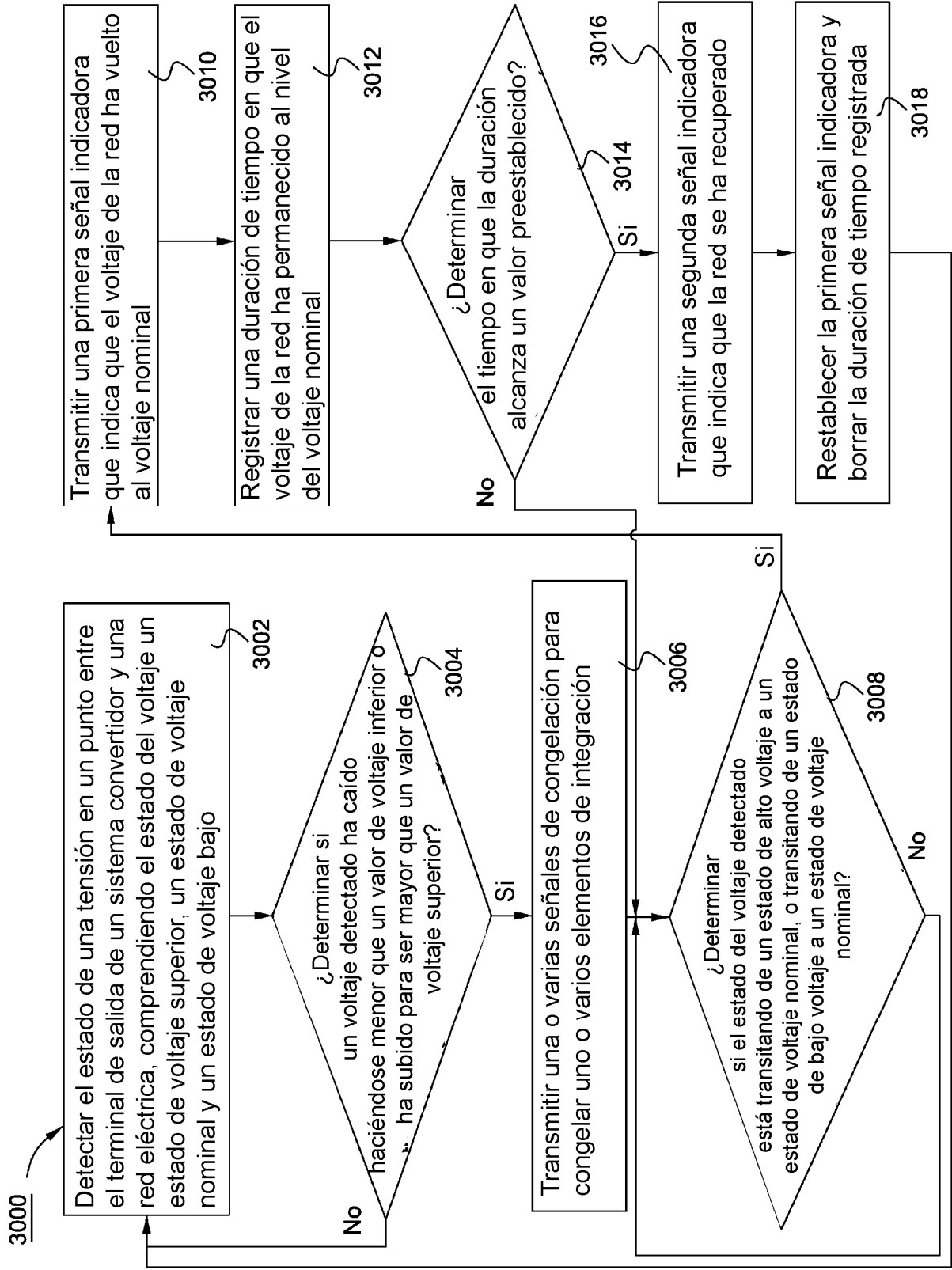


FIG. 22