

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 883 827**

51 Int. Cl.:

H02J 3/38 (2006.01)

H02P 9/00 (2006.01)

H02P 9/10 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.02.2016 E 16155653 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.05.2021 EP 3065251**

54 Título: **Sistema y procedimiento para estabilizar la interacción subsíncrona de un generador de turbina eólica**

30 Prioridad:

27.02.2015 US 201514633452

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

09.12.2021

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**REN, WEI y
LARSEN, EINAR VAUGHN**

74 Agente/Representante:

FORTEA LAGUNA, Juan José

ES 2 883 827 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Sistema y procedimiento para estabilizar la interacción subsíncrona de un generador de turbina eólica

- 5 **[0001]** La presente invención se refiere en general al campo de los generadores de turbina eólica y, más en particular, a los sistemas y procedimientos para estabilizar la interacción subsíncrona (SSI) de un generador de turbina eólica mediante un diseño de control simétrico.
- 10 **[0002]** La energía eólica se considera una de las fuentes de energía más limpias y más respetuosas con el medio ambiente actualmente disponibles, y a este respecto la atención que atraen las turbinas eólicas ha experimentado un incremento. Una turbina eólica moderna incluye típicamente una torre, un generador, una multiplicadora, una góndola y un rotor que incluye una o más palas de rotor. En muchas turbinas eólicas, el rotor está unido a la góndola y está acoplado al generador a través de la multiplicadora. El rotor y la multiplicadora están montados sobre una estructura de soporte de bancada localizada dentro de la góndola. Más específicamente, en muchos casos, la multiplicadora está montada en la bancada por medio de uno o más soportes o brazos de par de torsión. Las palas de rotor captan energía cinética del viento usando principios de perfil aerodinámico conocidos. Las palas de rotor transmiten la energía cinética en forma de energía de rotación para hacer girar un eje que acopla las palas de rotor a una multiplicadora o, si no se usa una multiplicadora, directamente a un eje de generador del generador. La multiplicadora se puede usar para aumentar la velocidad de rotación inherentemente baja del rotor de turbina para que el generador convierta eficazmente energía mecánica en energía eléctrica, que se proporciona a una red de suministro.
- 20 **[0003]** La transmisión de energía eólica desde ubicaciones remotas a unos centros de carga o a unas redes troncales principales de transmisión requiere largas líneas de transmisión. Los condensadores en serie son una solución de transmisión económica y consolidada para abordar los problemas de resistencia del sistema, estabilidad de la red y perfil de tensión de las líneas de transmisión largas. En algunos casos, los generadores de turbina eólica pueden ser propensos a problemas de interacción subsíncrona (SSI) cuando el generador está conectado a la red a través de líneas de transmisión compensadas en serie.
- 30 **[0004]** Más específicamente, las turbinas eólicas pueden interactuar con las resonancias de red creadas por la compensación del condensador en serie, causando de este modo daños y/o funcionamiento incorrecto de la turbina eólica si no se abordan dichas interacciones. Además, los generadores eólicos reaccionan a los transitorios de red de acuerdo con sus características físicas y lógica de control. Al reaccionar a las corrientes subsíncronas causadas por resonancias en serie en la red, dichas reacciones pueden afectar a la amortiguación de la resonancia. El fenómeno se ha denominado interacción subsíncrona (SSI). La SSI es benigna en muchos casos, pero en otros casos, puede dar lugar a una inestabilidad eléctrica. Cuando hay inestabilidad, las corrientes y tensiones subsíncronas aumentan hasta que se produce un evento no lineal. Véase, por ejemplo, US 2013/0176751 y WO 2012/159989.
- 40 **[0005]** Un procedimiento comúnmente usado para estudiar la interacción subsíncrona es el análisis de escaneo de frecuencias. Un análisis de escaneo de frecuencias típico incluye establecer una condición de funcionamiento en régimen permanente del sistema que se está probando, inyectar una señal de perturbación de corriente (o tensión) al sistema en régimen permanente, restar la tensión y corriente del sistema perturbado por sus cantidades de régimen permanente para adquirir el cambio delta de señal pequeña, realizar una transformada rápida de Fourier (FFT), calcular el valor de fasor a la frecuencia de pruebas y calcular la impedancia del sistema. Las etapas se pueden repetir en otras frecuencias del intervalo de interés.
- 45 **[0006]** Además, como se muestra en la FIG. 1, el análisis de escaneo de frecuencias trata el generador de turbina eólica 12 y la red de energía eléctrica 14 del circuito 10 como dos subsistemas separados. Cuando los dos subsistemas 12, 14 están conectados entre sí, el resultado es equivalente a sumar sus respectivas impedancias. Así pues, una inestabilidad potencial se indica mediante una resistencia negativa a una frecuencia de resonancia (es decir, reactancia cero). Por ejemplo, como se muestra en la FIG. 2, se ilustran unos gráficos correspondientes de resistencia frente a frecuencia y reactancia frente a frecuencia, respectivamente, para el circuito 10. Más específicamente, se identifican dos frecuencias de resonancia 15, 17 (por ejemplo, a aproximadamente 10 Hz y aproximadamente 51 Hz) a partir de los gráficos de impedancia de frecuencia generados por el circuito 10. Como se muestra, ambas frecuencias de resonancia 15, 17 tienen amortiguación negativa ya que las resistencias asociadas son negativas, indicándose de ese modo una inestabilidad potencial del sistema.
- 50 **[0007]** Aunque el análisis de frecuencias mencionado anteriormente se ha usado ampliamente para la evaluación de SSI, los resultados de dichas pruebas pueden ser engañosos debido a las deficiencias del procedimiento. Por ejemplo, una de dichas deficiencias es el efecto de las frecuencias de acoplamiento como se ilustra en las FIGS. 3-5. Más específicamente, la FIG. 3 ilustra un diagrama de bloques de una función de control simplificada que convierte una cantidad de corriente alterna (a-c) trifásica (por ejemplo, X_{abc}) en una coordenada de rotación en cuadratura directa (d-q), multiplica la cantidad d-q por dos ganancias (K_d y K_q) por separado y, a continuación, convierte inversamente el resultado de nuevo en una cantidad de a-c (por ejemplo, Y_{abc}). Una transformación d-q en general se refiere a una transformación matemática que hace girar el marco de referencia de sistemas trifásicos
- 60
- 65

con el objeto de simplificar el análisis de los circuitos trifásicos. La entrada X_{abc} y la salida Y_{abc} pueden ser tensión, corriente o combinaciones de las mismas. Como se muestra en las FIGS. 4 y 5, se ejecutan dos pruebas con diferentes valores de K_d y K_q usando la función de control. Las transformaciones de ABC a DQ y de DQ a ABC están basadas en la frecuencia fundamental, por ejemplo, 60 Hz. La FIG. 4 ilustra una comparación de la entrada y la salida tanto en el dominio temporal como en el espectro de frecuencias de una primera prueba, por ejemplo, cuando $K_d = K_q = 1,0$. Como se muestra, la salida es igual a la entrada. En una segunda prueba, como se muestra en la FIG. 5, K_d es diferente de K_q (es decir, el control se vuelve asimétrico) y la salida resultante Y_{abc} contiene un componente de frecuencia adicional 16 que no está en la entrada.

[0008] Como se muestra en la FIG. 6, se ilustra un gráfico que ilustra el efecto del efecto de frecuencias de acoplamiento descrito anteriormente. Como se muestra, el gráfico compara la impedancia calculada a partir de las dos condiciones de red. Si no hay ningún efecto de frecuencias de acoplamiento, el cálculo da como resultado la misma impedancia de generador para ambas condiciones, de modo que las curvas se deben superponer. La distinción entre las dos curvas de la FIG. 6, sin embargo, demuestra el impacto de las frecuencias de acoplamiento. Además, las impedancias de frecuencia resultantes del generador de las dos condiciones de red brindan indicaciones opuestas a la estabilidad de SSI del sistema. Por ejemplo, cuando la conexión a la red es más fuerte (curva 18), la resistencia del generador es positiva en todo el intervalo de frecuencias subsíncronas y, por lo tanto, indica que no hay inestabilidad de SSI. Por el contrario, cuando la conexión a la red es más débil (curva 20), la resistencia de generador es negativa en el intervalo de frecuencias subsíncronas, planteándose de ese modo el problema de una potencial inestabilidad de SSI. Así pues, el efecto de las frecuencias de acoplamiento complica la evaluación de SSI para generadores de turbina eólica. Además, el efecto de las frecuencias de acoplamiento contribuye a aumentar la dificultad del diseño del sistema, ya que tratar de diseñar un sistema estable para el número infinito de contextos de red es casi imposible.

[0009] Considerando lo mencionado anteriormente, sería ventajoso un sistema y procedimiento que mejore la amortiguación de interacción subsíncrona (SSI) de un generador de turbina eólica utilizando un diseño de control simétrico.

[0010] Diversos aspectos y ventajas de la invención se expondrán en parte en la siguiente descripción, o pueden quedar claros a partir de la descripción, o se pueden descubrir a través de la puesta en práctica de la invención.

[0011] En consecuencia, se proporciona la presente invención, definida por las reivindicaciones adjuntas.

[0012] Se pueden realizar variaciones y modificaciones a estos modos de realización ejemplares de la presente divulgación. Estas y otras 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 en, y constituyen una parte de, la presente memoria descriptiva, ilustran unos modos de realización de la invención y, junto con la descripción, sirven para explicar los principios de la invención. En los dibujos:

la FIG. 1 ilustra un diagrama de circuito que puede dar como resultado una interacción subsíncrona inestable (SSI) de acuerdo con una estructura convencional;

la FIG. 2 ilustra diversos gráficos de resistencia frente a frecuencia y de reactancia frente a frecuencia, respectivamente;

la FIG. 3 ilustra un diagrama de bloques de una función de control para convertir una cantidad de a-c en una cantidad de d-q de acuerdo con un modo de realización de la presente divulgación;

la FIG. 4 ilustra diversos gráficos de las cantidades de a-c de entrada y salida frente al tiempo y la frecuencia, respectivamente, que ilustran en particular un control simétrico que no tiene ninguna salida de frecuencia de acoplamiento;

la FIG. 5 ilustra diversos gráficos de las cantidades de a-c de entrada y salida frente al tiempo y la frecuencia, respectivamente, que ilustran en particular un control asimétrico que crea una salida de frecuencia de acoplamiento;

la FIG. 6 ilustra diversos gráficos de impedancia frente a frecuencia y de impedancia frente a frecuencia, respectivamente, para diferentes condiciones de red de acuerdo con una estructura convencional;

la FIG. 7 ilustra un diagrama esquemático de un sistema de control para una turbina eólica de acuerdo con un modo de realización de la presente divulgación;

la FIG. 8 ilustra un diagrama de bloques de un modo de realización de unos componentes adecuados de un sistema de control de una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación;

la FIG. 9 ilustra un diagrama de bloques de control simplificado de acuerdo con una estructura convencional,

que ilustra particularmente la generación de referencias de corriente de eje d y de eje q;

la FIG. 10 ilustra un diagrama de bloques de control simplificado de acuerdo con un modo de realización de la presente divulgación, que ilustra en particular la generación de referencias de corriente de eje d y de eje q que proporcionan un control simétrico del generador de turbina eólica;

la FIG. 11 ilustra diversos gráficos de impedancia frente a frecuencia e impedancia frente a frecuencia, respectivamente, para diferentes condiciones de red de acuerdo con un modo de realización de la presente divulgación;

la FIG. 12 ilustra un diagrama de circuito de acuerdo con un modo de realización de la presente divulgación, que ilustra en particular un evento de inserción proporcionado por un condensador de compensación en serie;

la FIG. 13 ilustra un gráfico que compara la respuesta transitoria del generador de turbina eólica antes y después de que se implemente la tecnología de control de la presente divulgación de acuerdo con un modo de realización de la presente divulgación; y

la FIG. 14 ilustra un diagrama de flujo de un modo de realización de un procedimiento para estabilizar la interacción subsíncrona (SSI) de un generador de turbina eólica mediante un diseño de control simétrico.

[0013] Se hace referencia en detalle ahora a unos modos de realización de la invención, uno o más ejemplos de los cuales se ilustran en los dibujos. Cada ejemplo se proporciona a modo de explicación de la invención, no como de limitación de la invención. De hecho, resultará evidente para los expertos en la técnica que se pueden realizar diversas modificaciones y variaciones en la presente invención. Por ejemplo, se pueden usar características ilustradas o descritas como parte de un modo de realización con otro modo de realización para obtener otro modo de realización más.

[0014] En general, la presente divulgación está dirigida a un sistema y procedimiento para estabilizar la interacción subsíncrona de un generador de turbina eólica conectado a una red eléctrica. Más específicamente, el sistema y procedimiento están configurados para hacer funcionar el generador de turbina eólica usando tecnología de control directo-en cuadratura (d-q). Por ejemplo, el sistema mide una cantidad de corriente alterna (a-c) de la red eléctrica y convierte la cantidad de a-c en una cantidad d-q (por ejemplo, coordenadas de rotación) en un controlador del generador de turbina eólica. La cantidad d-q se proporciona a continuación a un bucle de control d-q dentro del controlador de turbina eólica. A continuación, el sistema se configura para alterar una función de transferencia del bucle de control d-q con un componente de control simétrico en el bucle de control d-q. Por tanto, el sistema genera, por medio del bucle de control d-q, una señal de referencia d-q (por ejemplo, una o más referencias de corriente) para el generador de turbina eólica en base a la función de transferencia alterada para lograr un control simétrico del generador de turbina eólica. Así pues, el sistema genera una señal de control para el generador de turbina eólica en base, al menos en parte, a la(s) señal(es) de referencia d-q y hace funcionar el generador en base a la señal de control.

[0015] Controlar el generador de turbina eólica de esta manera proporciona muchas ventajas que no están presentes en los sistemas de control de técnica anterior. Por ejemplo, la presente divulgación logra una amortiguación de interacción subsíncrona mejorada usando controles internos en lugar de depender de enfoques externos. Por lo tanto, la presente divulgación es menos compleja y, por lo tanto, más económica que las soluciones previas. Además, el procedimiento asegura una amortiguación positiva del generador de turbina eólica frente a la interacción subsíncrona.

[0016] Con el fin de poner en contexto las enseñanzas de la presente invención, se analiza ahora una revisión de unos aspectos de unos componentes para generar electricidad usando una turbina eólica que contiene un convertidor electrónico de energía. Sin embargo, se debe entender que el procedimiento de control de la presente divulgación también se puede aplicar a otros convertidores usados en sistemas de almacenamiento de energía en batería, inversores solares, compensadores de var estáticos (STATCOM) y similares.

[0017] En referencia a la FIG. 7, se muestra un modo de realización ejemplar de unos aspectos del sistema de turbina eólica 100. Como se muestra, un rotor 106 incluye una pluralidad de palas de rotor 108 acopladas a un buje rotativo 110, que conjuntamente definen una hélice. La hélice está acoplada a una multiplicadora 118 opcional, que a su vez está acoplada a un generador 120. De acuerdo con la presente divulgación, el generador 120 puede ser un generador de doble alimentación 120 (DFG).

[0018] El DFG 120 está acoplado típicamente a un bus de estator 154 y a un conjunto de convertidor de energía 162 por medio de un bus de rotor 156. El bus de estator 154 proporciona una salida de energía trifásica desde un estator (no ilustrado por separado) del DFG 120, y el bus de rotor 156 proporciona una salida de energía trifásica de un rotor (no ilustrado por separado) del DFG 120. En referencia particular al conjunto de convertidor de energía 162, el DFG 120 está acoplado por medio del bus de rotor 156 a un convertidor de lado de rotor 166. El convertidor de lado de rotor 166 está acoplado a un convertidor de lado de línea 168 que, a su vez, está acoplado a un bus de

lado de línea 188. En configuraciones ejemplares, el convertidor de lado de rotor 166 y el convertidor de lado de línea 168 están configurados para un modo de funcionamiento normal en una disposición de modulación de impulsos en anchura (PWM) de tres fases y dos niveles usando dispositivos de conmutación de transistor bipolar de puerta aislada (IGBT). El convertidor de lado de rotor 166 y el convertidor de lado de línea 168 pueden estar acoplados por medio de un enlace de CC 136 al otro lado del cual se halla el condensador de enlace de CC 138.

[0019] En configuraciones típicas, diversos contactores de línea y disyuntores que incluyen, por ejemplo, un disyuntor de red 182, se pueden incluir para aislar los diversos componentes según sea necesario para el funcionamiento normal del DFG 120 durante la conexión a, y la desconexión de, la red eléctrica 184. Un disyuntor de sistema 178 acopla el bus de sistema 160 a un transformador 180, que está conectado a la red eléctrica 184 por medio del disyuntor de red 182. Además, diversos disyuntores y conmutadores dentro del sistema de turbina eólica 100, que incluyen el disyuntor de red 182, el disyuntor de sistema 178, el conmutador de sincronización de estator 158, el disyuntor de convertidor 186 y el contactor de línea 172, están configurados para conectar o desconectar unos buses correspondientes, por ejemplo, cuando el flujo de corriente es excesivo y puede dañar los componentes del sistema de turbina eólica 100 o por otras consideraciones de funcionamiento. También se pueden proporcionar componentes de protección adicionales (no mostrados).

[0020] En operación, la energía generada en el DFG 120 por el rotor en rotación 106 se proporciona por medio de una ruta doble a una red eléctrica 184. Las rutas dobles están definidas por el bus de estator 154 y el bus de rotor 156. En el lado del bus de rotor 156, la energía trifásica sinusoidal de a-c se convierte en energía de corriente continua (CC) mediante el conjunto de conversión de energía 162. La energía convertida del conjunto de conversión de energía 162 se combina con la energía del estator del DFG 120 para proporcionar energía trifásica que tiene una frecuencia que se mantiene sustancialmente constante, por ejemplo, a un nivel de a-c de 60 Hz. El conjunto de conversión de energía 162 compensa o ajusta la frecuencia de la energía trifásica del rotor del DFG 120 cuando se producen cambios.

[0021] El conjunto de conversión de energía 162 puede incluir también un controlador 174 para controlar el funcionamiento del convertidor de lado de rotor 166 y del convertidor de lado de línea 168. Cabe destacar que el controlador 174, en modos de realización típicos, está configurado como una interfaz entre el conjunto de conversión de energía 162 y un sistema de control 170 del sistema 100. En modos de realización adicionales, el conjunto de conversión de energía 162 recibe señales de control desde, por ejemplo, el sistema de control 170 por medio del controlador 174. Las señales de control están basadas, entre otras cosas, en condiciones detectadas o características de funcionamiento del sistema de turbina eólica 100. Típicamente, las señales de control permiten el control del funcionamiento del conjunto de conversión de energía 162. Por ejemplo, se puede usar retroalimentación en forma de velocidad detectada del DFG 120 para controlar la conversión de la energía de salida del bus de rotor 156 para mantener un suministro de energía trifásica adecuado y equilibrado. El sistema de control 170 también puede usar otra retroalimentación de otros sensores para controlar el conjunto de conversión de energía 162, que incluye, por ejemplo, retroalimentaciones de tensiones y corriente del bus de estator y de rotor. Usando las diversas formas de información de retroalimentación y, por ejemplo, conmutando señales de control, se puede generar de cualquier manera conocida unas señales de control de conmutador de sincronización de estator y señales (de disparo) de control de disyuntor de sistema.

[0022] En referencia ahora a la FIG. 8, se ilustra un diagrama de bloques de un modo de realización de unos componentes adecuados que se pueden incluir dentro del controlador 174 (o sistema de control 170) de acuerdo con unos aspectos de la presente materia objeto. Como se muestra, el controlador 174 puede incluir uno o más procesadores 173 y dispositivos de memoria asociados 175 configurados para realizar una variedad de funciones implementadas por ordenador (por ejemplo, que realizan los procedimientos, las etapas, los cálculos y similares divulgados en el presente documento). Como se usa en el presente documento, el término "procesador" no solo se refiere a circuitos integrados que en la técnica aparecen 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.

[0023] Adicionalmente, el (los) dispositivo(s) de memoria 175 puede(n) comprender, en general, un(os) elemento(s) de memoria que incluye(n), pero no se limita(n) a, un medio legible por ordenador (por ejemplo, una memoria de acceso aleatorio (RAM)), un medio no volátil legible por ordenador (por ejemplo, una memoria *flash*), un disco flexible, una memoria de solo lectura en disco compacto (CD-ROM), un disco magnetoóptico (MOD), un disco versátil digital (DVD) y/u otros elementos de memoria adecuados. Además, el controlador 174 también puede incluir un módulo de comunicaciones 176 para facilitar las comunicaciones entre el controlador 174 y los diversos componentes del sistema de turbina eólica 100. Por ejemplo, el módulo de comunicaciones 176 puede incluir una interfaz de sensor 177 (por ejemplo, uno o más convertidores analógico-digital) para permitir que las señales transmitidas por uno o más sensores 183, 185, 187 se conviertan en señales que el controlador 174 pueda comprender y procesar. Se debe apreciar que los sensores 183, 185, 187 pueden estar acoplados comunicativamente al módulo de comunicaciones 176 usando unos medios adecuados cualesquiera. Por ejemplo, como se muestra en la FIG. 8, los sensores 183, 185, 187 están acoplados a la interfaz de sensor 177 por medio de una conexión alámbrica. Sin embargo, en otros modos de realización, los sensores 183, 185, 187 se pueden acoplar a la interfaz de sensor 177 por medio de una conexión inalámbrica, por ejemplo, usando cualquier protocolo

de comunicaciones inalámbricas adecuado conocido en la técnica. Así pues, el procesador 173 puede estar configurado para recibir una o más señales desde los sensores 183, 185, 187.

5 **[0024]** Los sensores 183, 185, 187 del sistema de turbina eólica 100 pueden ser unos sensores adecuados cualesquiera configurados para medir cualquier condición de funcionamiento o carga en, o cerca de, la turbina eólica. Por ejemplo, los sensores pueden incluir sensores de pala para medir un ángulo de pitch de una de las palas de rotor 108 o para medir una carga que actúa sobre una de las palas de rotor 108; sensores de generador para monitorizar el generador (por ejemplo, par de torsión, velocidad de rotación, aceleración y/o salida de energía); y/o diversos sensores de viento para medir diversos parámetros del viento. Además, los sensores 183, 185, 187
10 pueden estar localizados cerca del suelo de la turbina eólica, en la góndola o en un mástil meteorológico de la turbina eólica. También se debe entender que se puede emplear cualquier número o tipo de sensores y en cualquier ubicación. Por ejemplo, los sensores pueden ser acelerómetros, sensores de presión, sensores de ángulo de ataque, sensores de vibración, sensores de MIMU, sistemas de cámara, sistemas de fibra óptica, anemómetros, veletas, sensores de detección y alcance sónicos (SODAR), láseres de infrarrojos, sensores de detección y alcance
15 de luz (LIDAR), radiómetros, tubos de Pitot, radiosondas, otros sensores ópticos y/o cualquier otro sensor adecuado.

[0025] En referencia ahora a las FIGS. 9 y 10, se ilustran diversos diagramas de bucle de control que el controlador 174 puede implementar para generar una señal de control para el generador de turbina eólica. Por ejemplo, dichos bucles de control están configurados para generar consignas de corriente y/o tensión constantes y estables para el DFG 120. Más específicamente, la FIG. 9 ilustra un diagrama de bucle de control 150 para generar referencias de corriente (por ejemplo, I_q^* e I_d^*) de acuerdo con la estructura convencional. Por el contrario, la FIG. 10 ilustra un diagrama de bucle de control 200 para generar señales de referencia d-q (por ejemplo, referencias de corriente d-q I_q^* e I_d^*) para mejorar la amortiguación de interacción subsíncrona del DFG 120 creando un diseño de control simétrico por medio de uno o más componentes de control simétrico 202, 204 de acuerdo con la presente divulgación. Más específicamente, como se muestra, los componentes de control simétrico 202, 204 corresponden a una pluralidad de filtros 202, 204 que alteran las funciones de transferencia del bucle d-q para lograr un control simétrico.

30 **[0026]** Como se muestra en la FIG. 10, la referencia de corriente de eje q I_q^* regula la tensión del DFG 120 y la referencia de corriente de eje d I_d^* regula el par de torsión del DFG 120. Por esta razón, los dos ejes se pueden diseñar en base a filosofías diferentes y, por consiguiente, volver asimétricos (es decir, con las funciones de transferencia de los dos ejes diferentes). Más específicamente, la referencia de corriente de eje q I_q^* es la salida del regulador de tensión que controla la magnitud de tensión en bornes V del DFG 120 en base a una referencia de tensión V^* . Por ejemplo, como se muestra en la FIG. 10, el bucle de control 200 calcula la referencia de corriente de eje q determinando una derivada integral proporcional (PI) de la tensión en bornes V del DFG 120 y filtrando la derivada por medio del filtro 202.

40 **[0027]** Además, el bucle de control 200 calcula la referencia de corriente de eje d I_d^* en función de una referencia de par de torsión T^* y un flujo magnético Ψ . Más específicamente, la referencia de corriente de eje I_d^* se calcula a partir de la referencia de par de torsión T^* dividiendo la referencia de par de torsión T^* por el flujo magnético Ψ como se muestra en N/D, es decir, el numerador se divide por el denominador. Además, el flujo magnético Ψ en general es proporcional a la magnitud de la tensión en bornes V del DFG 120. Así pues, en determinados modos de realización, el bucle de control 200 determina el flujo magnético Ψ en función de la tensión en bornes V del DFG 120, filtrando la tensión en bornes V y multiplicando la tensión en bornes filtrada por un multiplicador, por ejemplo K. Más específicamente, en determinados modos de realización, el multiplicador K puede ser una función de la frecuencia de tensión del estator (por ejemplo, $1/\omega_s$).

50 **[0028]** Desde el punto de vista de la señal pequeña, la función de transferencia entre la tensión en bornes V del DFG 120 y las referencias de corriente I_q^* e I_d^* se puede expresar como:

$$\delta 1_q^* = -G_{p1} \cdot \delta V \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$\delta 1_d^* \approx -\frac{T}{KV_0^2} \delta V \quad \text{Ecuación (2)}$$

55 donde G_{PI} es la función de transferencia del regulador de PI y

V_0 es la magnitud de tensión en régimen permanente.

60 **[0029]** Como se muestra en las ecuaciones (1) y (2), la función de transferencia de V a I_d^* depende de la(s) condición(es) de funcionamiento del DFG 120. Por ejemplo, con una energía de salida baja cuando T está cerca de cero, la ganancia de V a I_d^* también está cerca de cero. Además, la diferencia entre los dos ejes crea un control asimétrico y, por consiguiente, el efecto de frecuencias de acoplamiento descrito en el presente documento (por ejemplo, FIG. 5). En el contexto del DFG 120, el funcionamiento de baja energía/baja velocidad normalmente

presenta la condición más desafiante, ya que la resistencia del rotor 106 alcanza su valor más negativo en el intervalo de frecuencias subsíncronas. Por tanto, el sistema 200 de la presente divulgación incluye uno o más componentes de control simétrico 202, 204 (por ejemplo, uno o más filtros o compensadores de control) como se ilustra en la FIG. 10 para abordar en particular el funcionamiento de baja energía/baja velocidad del DFG 120. Más específicamente, en determinados modos de realización, los componentes de control simétrico 202, 204 se pueden aplicar a la ruta de control en cada uno de los dos (o en ambos) ejes de modo que las funciones de transferencia resultantes son similares entre sí (por ejemplo, vuelven a guardar simetría) en un determinado intervalo de frecuencias (es decir, el intervalo de frecuencias subsíncronas). Un compensador de control como se describe en el presente documento se refiere en general a un componente de un sistema de control que mejora una respuesta en frecuencia no deseada en un sistema de retroalimentación y control.

[0030] Más específicamente, en determinados modos de realización, los componentes de control simétrico 202, 204 pueden ser filtros “notch” con una frecuencia de bloqueo de aproximadamente 30 Hz (que en general es la mediana del intervalo de frecuencias subsíncronas). Sin embargo, los expertos en la técnica deben entender que la frecuencia de bloqueo puede ser cualquier frecuencia adecuada y que puede variar dependiendo del sistema. Con la inclusión de los filtros 202, 204 en la ruta de V a I_{dq}^* , como se muestra en la FIG. 10, la diferencia entre los dos ejes se reduce eficazmente para el intervalo de frecuencias alrededor de la frecuencia de bloqueo, es decir, donde típicamente se encuentra inestabilidad de SSI. Mientras tanto, los filtros 202, 204 permiten suficiente ancho de banda para que las señales de control de baja frecuencia (es decir, baja frecuencia en el marco de rotación d-q) pasen sin mucha atenuación o retardo de fase. Además, como se muestra en la FIG. 10, el filtro 204 se incluye para la entrada V para la generación de I_D , pero no para la referencia de par de torsión T^* . En dicho modo de realización, la ausencia de un filtro para la referencia de par de torsión T^* evita tener que variar las características mecánicas del sistema, ya que la referencia de par de torsión T^* no se ve afectada por el filtro.

[0031] Los filtros 202, 204 como se describen en el presente documento pueden ser unos filtros adecuados cualesquiera conocidos en la técnica. Por ejemplo, en determinados modos de realización, los filtros 202, 204 pueden incluir filtros de supresión de banda o filtros de rechazo de banda. Un filtro de supresión de banda o de rechazo de banda en general se refiere a un filtro que deja pasar la mayoría de las frecuencias sin alterarlas, pero que atenúa las señales de un intervalo específico hasta niveles muy bajos. Así pues, los filtros de supresión de banda son lo opuesto a los filtros de paso de banda que dejan pasar frecuencias dentro de un determinado intervalo y rechazan (atenúan) las frecuencias fuera de ese intervalo. Más específicamente, los filtros 202, 204 pueden ser filtros “notch” que son filtros de supresión de banda con una banda de supresión estrecha (es decir, un factor de Q alto). Todavía en modos de realización adicionales, los filtros 202, 204 pueden incluir filtros de paso de banda que son una combinación de filtros de paso bajo y de paso alto. Por tanto, en modos de realización particulares, los filtros 202, 204 pueden incluir un filtro de paso bajo seguido de un filtro de paso alto en serie. Un filtro de paso bajo en general se refiere a un filtro que deja pasar señales con una frecuencia menor que una frecuencia de corte determinada y atenúa señales con frecuencias mayores que la frecuencia de corte. La cantidad de atenuación para cada frecuencia depende del diseño del filtro. Un filtro de paso bajo es lo opuesto a un filtro de paso alto, que es un filtro que deja pasar señales con una frecuencia mayor a una determinada frecuencia de corte y atenúa las señales con frecuencias menores que la frecuencia de corte. En otros modos de realización más, los filtros 202, 204 pueden incluir filtros de media móvil.

[0032] En referencia ahora a la FIG. 11, se ilustra un gráfico que ilustra unas ventajas potenciales de la presente divulgación. Como se muestra, el efecto de frecuencias de acoplamiento analizado en referencia a la FIG. 5 se reduce significativamente como se refleja en las correspondientes impedancias de frecuencia de generador 218, 220 en diferentes condiciones de red en la mayor parte del intervalo de frecuencias subsíncronas (por ejemplo, hasta que la resistencia está positivamente alta y la SSI no es motivo de preocupación).

[0033] Las ventajas de la tecnología de control de la presente divulgación se evaluaron en una simulación en dominio temporal de su eficacia para estabilizar los transitorios de SSI y se ilustran adicionalmente en las FIGS. 12 y 13. Más específicamente, la FIG. 12 ilustra un diagrama de circuito 190 de acuerdo con la presente divulgación que tiene un condensador de compensación en serie 192 configurado para proporcionar un evento de inserción como se describe en el presente documento. Antes de la instalación del condensador de compensación en serie 192, la relación de cortocircuito (SCR) de la red entre el bus infinito 194 y el lado de alta tensión del transformador de turbina eólica 180 era de aproximadamente 0,77 pu. Después de abrir el conmutador de derivación del condensador de compensación en serie 192, la SCR de la red se incrementó hasta 1,34 pu. Como se muestra en la FIG. 13, se ilustra un gráfico que compara la respuesta transitoria del DFG 120 antes y después de añadir uno o más de los filtros 202, 204 a la ruta de referencia de corriente. Como se muestra, la tecnología de control de la presente divulgación (curva 196) estabiliza la SSI en comparación con las tecnologías de control de técnica anterior (curva 198).

[0034] En referencia ahora a la FIG. 14, se ilustra un diagrama de flujo de un procedimiento 300 para hacer funcionar un generador de turbina eólica conectado a una red eléctrica usando una tecnología de control d-q de acuerdo con la presente divulgación. Como se muestra en 302, el procedimiento 300 incluye medir una cantidad de a-c de la red eléctrica. En 304, el procedimiento 300 incluye convertir la cantidad de a-c en una cantidad de d-q en un controlador del generador de turbina eólica. En 306, el procedimiento 300 incluye filtrar la cantidad de d-q

en un bucle de control del controlador por medio de al menos un filtro. En 308, el procedimiento incluye generar una señal de control para el generador de turbina eólica en base a la cantidad de d-q filtrada. Además, en 310, el procedimiento incluye hacer funcionar el generador de turbina eólica en base a la señal de control para estabilizar la interacción subsíncrona del generador de turbina eólica.

5

[0035] En esta descripción escrita se usan ejemplos para divulgar la invención, que incluyen el modo preferente, y asimismo para permitir que cualquier experto en la técnica lleve a la práctica la invención, lo cual incluye fabricar y usar cualquier dispositivo o sistema y realizar cualquier procedimiento incorporado. El alcance patentable de la invención está definido por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento (300) para hacer funcionar un generador de turbina eólica (120) conectado a una red eléctrica (184) usando tecnología de control directo-en cuadratura (d-q), comprendiendo el procedimiento:
- 5 medir (302) una cantidad de corriente alterna (a-c) de la red eléctrica (184);
- convertir (304) la cantidad de a-c en una cantidad de d-q en un controlador (174) del generador de turbina eólica (120); **caracterizado por:**
- 10 proporcionar (306) la cantidad de d-q a un bucle de control d-q (200) dentro del controlador (174), comprendiendo dicho bucle de control d-q (200) una primera ruta de control para determinar una referencia de corriente de eje q I_{q^*} para regular una tensión del generador de turbina eólica (120) y una segunda ruta de control para determinar una referencia de corriente de eje d I_{d^*} para regular un par de torsión del generador de turbina eólica (120);
- 15 alterar (308), con unos respectivos primero y segundo componentes de control simétrico (202, 204), una respectiva función de transferencia de la primera y segunda rutas de control del bucle de control d-q (200) de modo que las funciones de transferencia resultantes son similares entre sí en el intervalo de frecuencias subsíncronas;
- 20 generar (310) la referencia de corriente de eje q I_{q^*} y la referencia de corriente de eje d I_{d^*} para el generador de turbina eólica (120) en base a las funciones de transferencia alteradas para lograr un control simétrico del generador de turbina eólica (120);
- 25 generar (312) una señal de control para el generador de turbina eólica (120) en base a la referencia de corriente de eje q I_{q^*} y la referencia de corriente de eje d I_{d^*} ; y
- 30 hacer funcionar (314) el generador de turbina eólica (120) en base a la señal de control para estabilizar una interacción subsíncrona del generador de turbina eólica (120).
2. El procedimiento (300) de la reivindicación 1, en el que los componentes de control simétrico (202, 204) comprenden al menos uno de uno o más filtros o un compensador de control.
- 35 3. El procedimiento (300) de la reivindicación 2, en el que el uno o más filtros comprenden al menos uno de un filtro "notch", un filtro de paso bajo, un filtro de paso alto, o combinaciones de los mismos.
4. El procedimiento (300) de cualquier reivindicación precedente, en el que el generador de turbina eólica (120) comprende un generador de doble alimentación que tiene un estator y un rotor, estando acoplado el rotor a la red eléctrica (184) por medio de un conjunto de conversión de energía (162), comprendiendo el conjunto de conversión de energía (162) un convertidor de energía de lado de rotor (166) y un convertidor de energía de lado de red (168), en el que el bucle de control d-q (200) está configurado para controlar una tensión del rotor por medio del convertidor de energía de lado de rotor (166).
- 40 5. El procedimiento (300) de cualquier reivindicación precedente, en el que generar la señal de control para el generador de turbina eólica (120) en base a la referencia de corriente de eje q I_{q^*} y la referencia de corriente de eje d I_{d^*} comprende además proporcionar una referencia de corriente de eje d y una referencia de corriente de eje q al convertidor de lado de rotor, determinar la señal de control en función de la referencia de corriente de eje d I_{d^*} y la referencia de corriente de eje q I_{q^*} por medio del convertidor de lado de rotor (166), y proporcionar la señal de control al generador de turbina eólica (120), en el que los componentes de control simétrico (202, 204) alteran la función de transferencia de la referencia de corriente de eje d y la referencia de corriente de eje q para lograr un control simétrico del generador de turbina eólica (120).
- 45 6. El procedimiento (300) de cualquier reivindicación precedente, que comprende además calcular la referencia de corriente de eje q I_{q^*} determinando una derivada integral proporcional de una tensión en bornes del generador de turbina eólica (120) y filtrando la derivada.
- 50 7. El procedimiento (300) de cualquier reivindicación precedente, que comprende además calcular la referencia de corriente de eje d I_{d^*} en función de una referencia de par de torsión y un flujo magnético, en el que el procedimiento comprende además determinar el flujo magnético en función de una tensión en bornes. del generador de turbina eólica (120), filtrar la tensión en bornes, y multiplicar la tensión en bornes filtrada por un multiplicador.
- 55 8. Un sistema (100) para hacer funcionar un generador de doble alimentación (120) conectado a una red eléctrica (184) usando una tecnología de control directo-en cuadratura (d-q), comprendiendo el sistema (100):
- 60 65

uno o más sensores (183, 185, 187) configurados para medir una cantidad de corriente alterna (a-c) de la red eléctrica (184); **caracterizado por:**

5 un controlador (174) acoplado comunicativamente a un procesador (173), comprendiendo el procesador (173) un bucle de control d-q (200), comprendiendo dicho bucle de control d-q (200) una primera ruta de control para determinar una referencia de corriente de eje q I_q^* para regular una tensión del generador de doble alimentación (120) y una segunda ruta de control para determinar una referencia de corriente de eje d I_d^* para regular un par de torsión del generador de doble alimentación (120) y unos respectivos primero y
10 segundo componentes de control simétrico (202, 204), estando configurado el bucle de control d-q (200) para realizar las operaciones, comprendiendo las operaciones:

convertir la cantidad de a-c en una cantidad de d-q;

15 proporcionar la cantidad de d-q al bucle de control d-q (200) dentro del controlador (174);

alterar, con los respectivos primero y segundo componentes de control simétrico (202, 204), una respectiva función de transferencia del bucle de control d-q (200) de modo que las funciones de transferencia resultantes son similares entre sí en el intervalo de frecuencias subsíncronas;

20 generar la referencia de corriente de eje q I_q^* y la referencia de corriente de eje d I_d^* para el generador de doble alimentación (120) en base a las funciones de transferencia alteradas para lograr un control simétrico del generador de doble alimentación (120);

25 generar una señal de tensión-corriente para el generador de doble alimentación (120) en base a la referencia de corriente de eje q I_q^* y la referencia de corriente de eje d I_d^* ; y

hacer funcionar el generador de doble alimentación (120) en base a la señal de tensión-corriente para estabilizar una interacción subsíncrona del generador de doble alimentación (120).

30 9. El sistema (100) de la reivindicación 8, en el que los componentes de control simétrico (202, 204) comprenden al menos uno de uno o más filtros o un compensador de control.

35 10. El sistema (100) de la reivindicación 9, en el que el uno o más filtros comprenden al menos uno de un filtro "notch", un filtro de paso bajo, un filtro de paso alto, o combinaciones de los mismos.

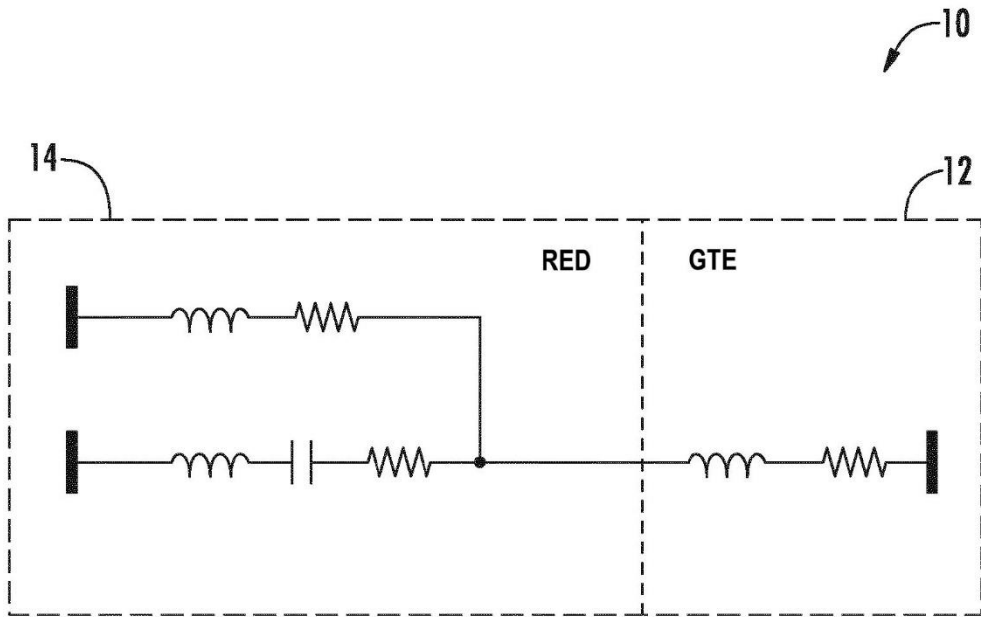


FIG. 1

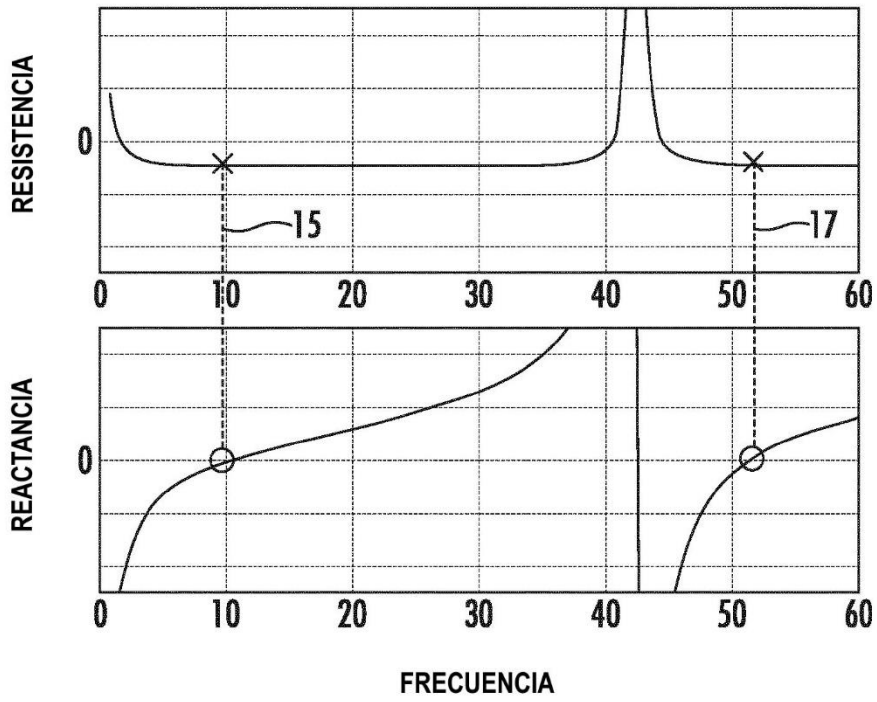


FIG. 2

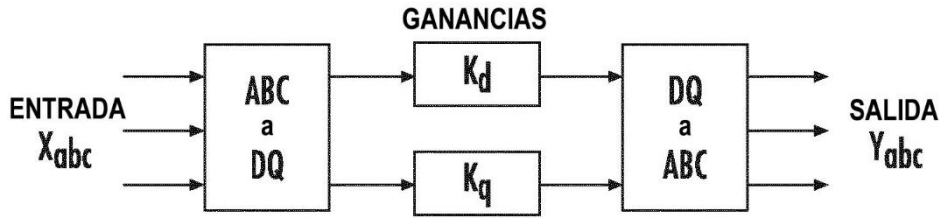
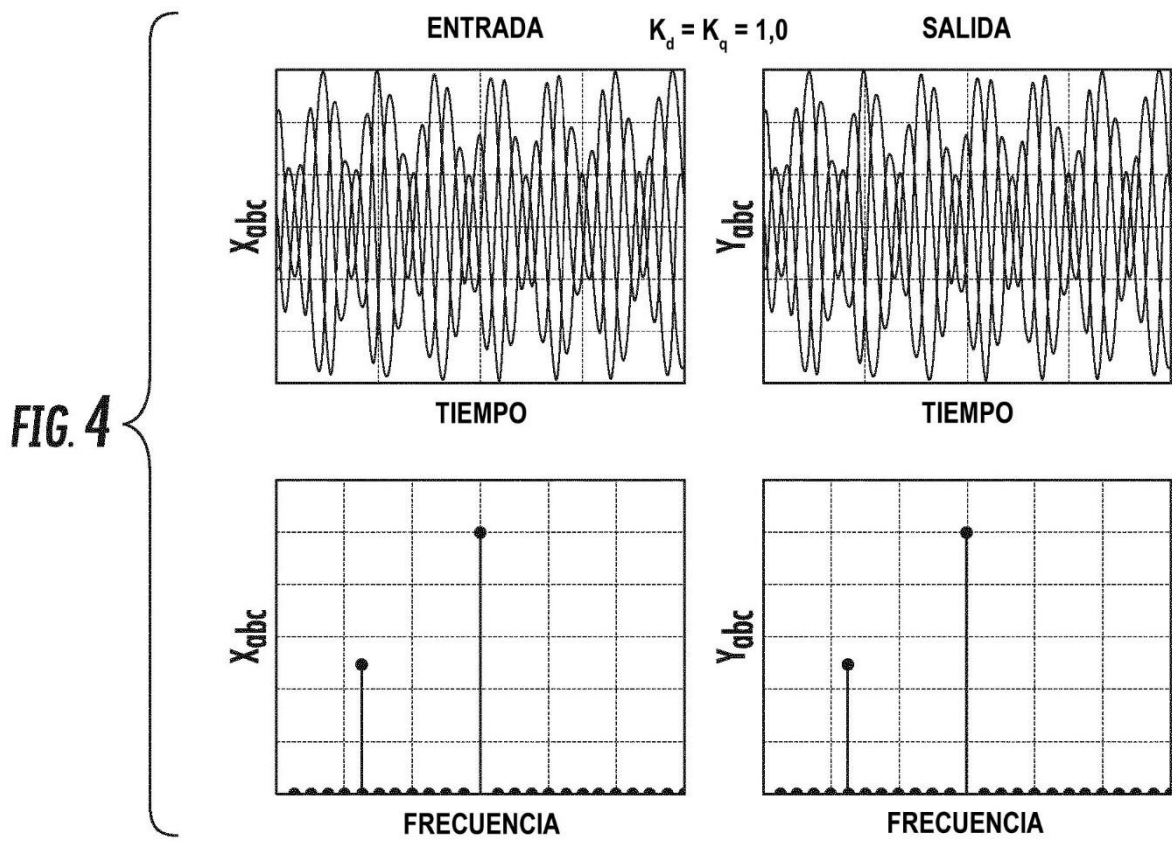
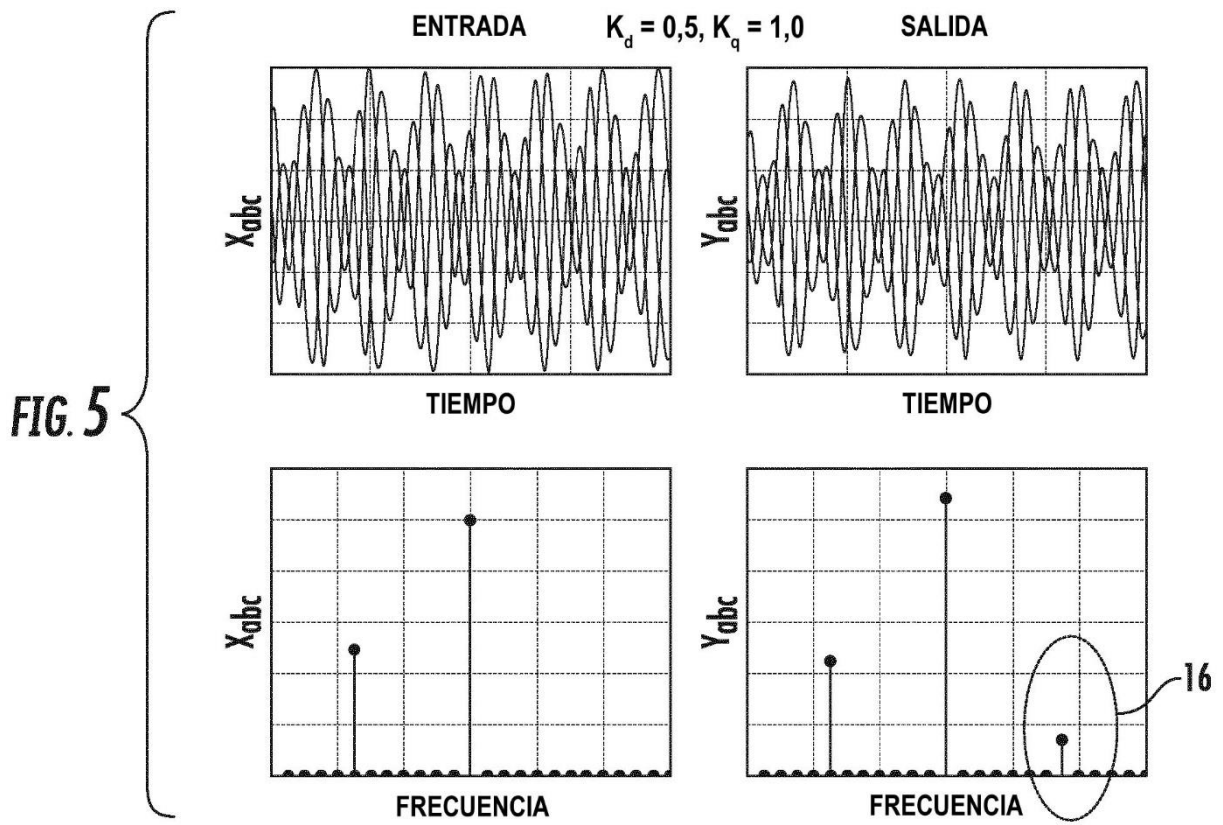


FIG. 3





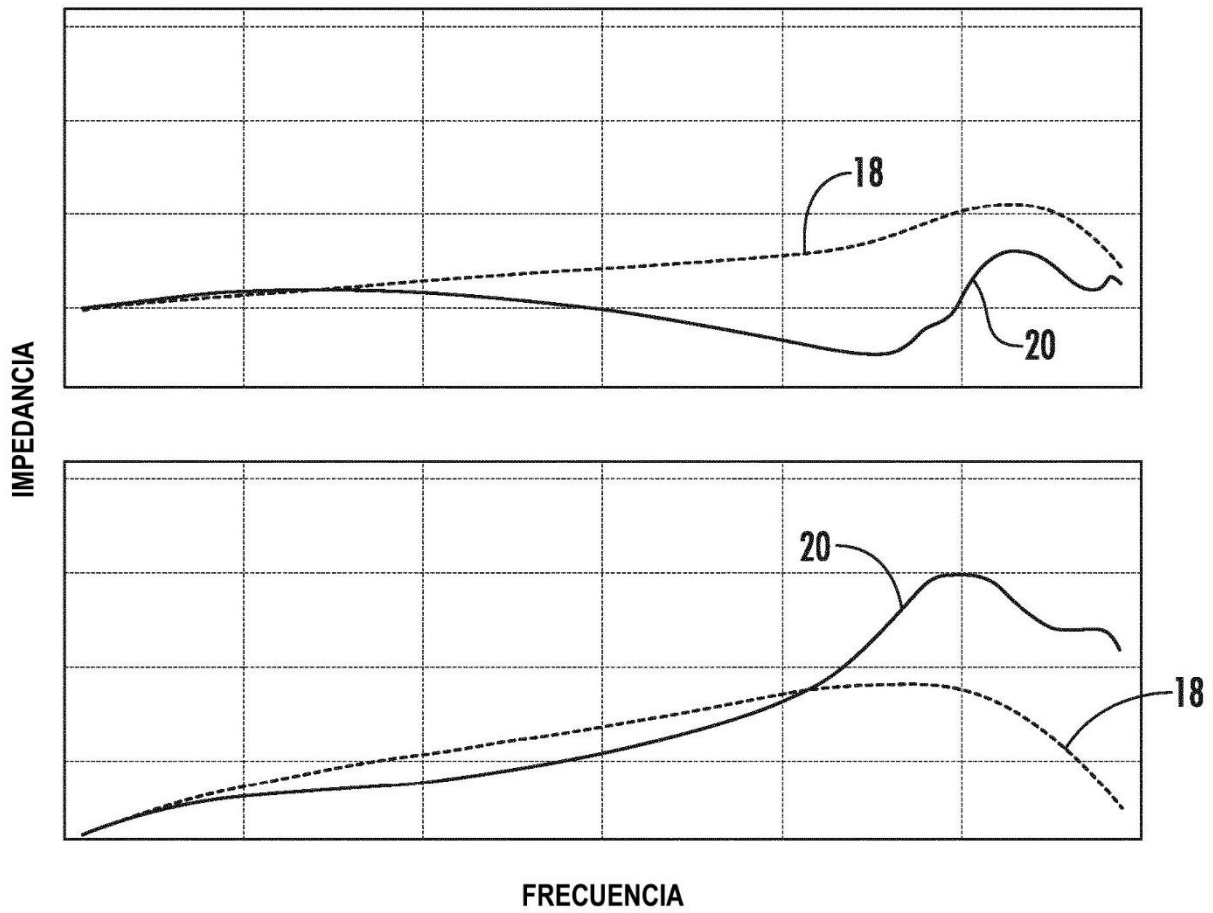


FIG. 6

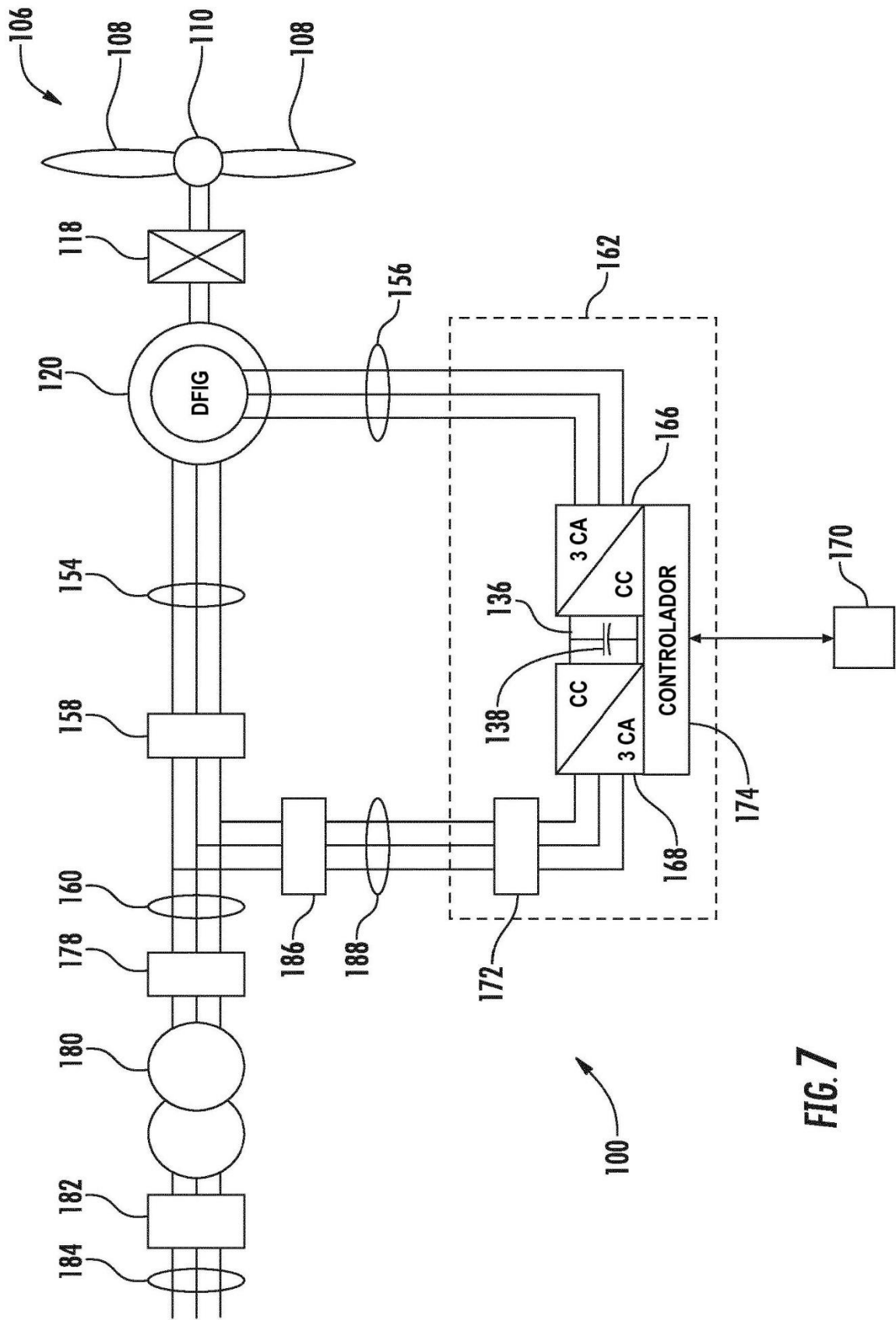


FIG. 7

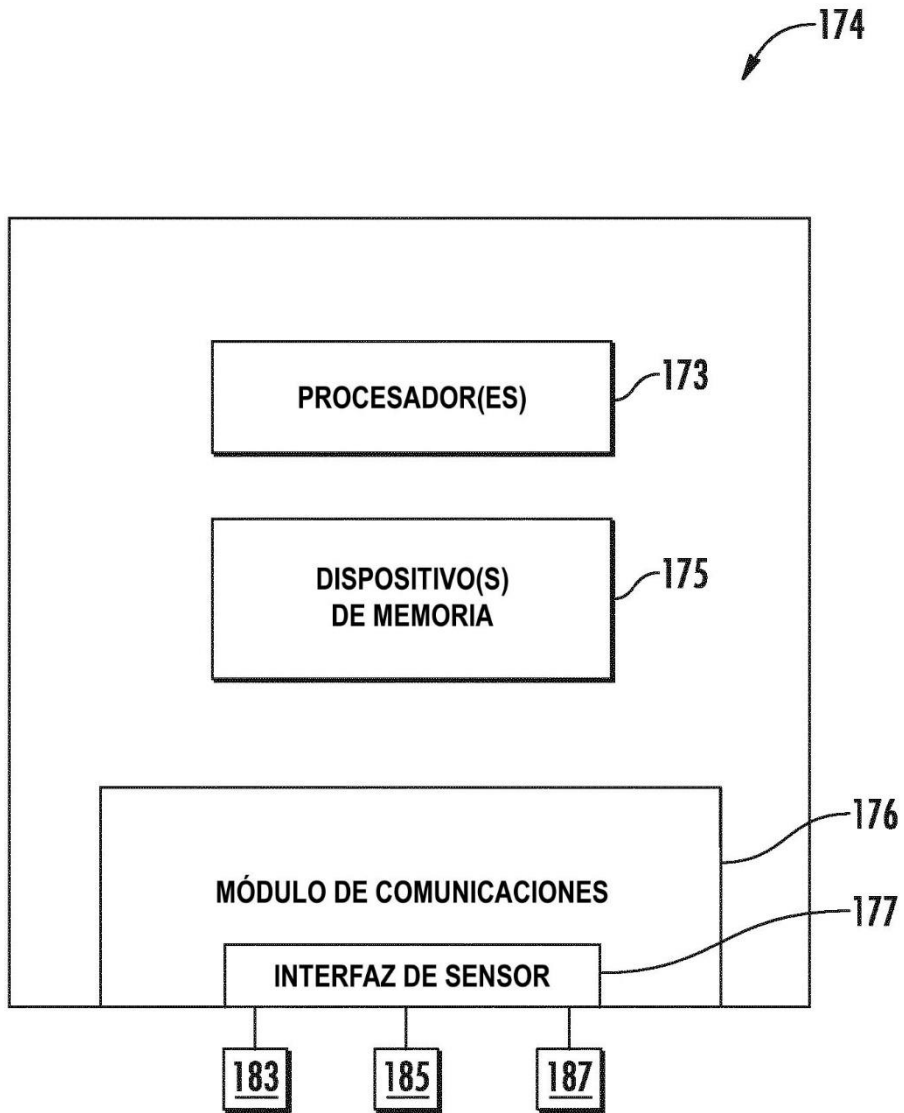


FIG. 8

FIG. 9

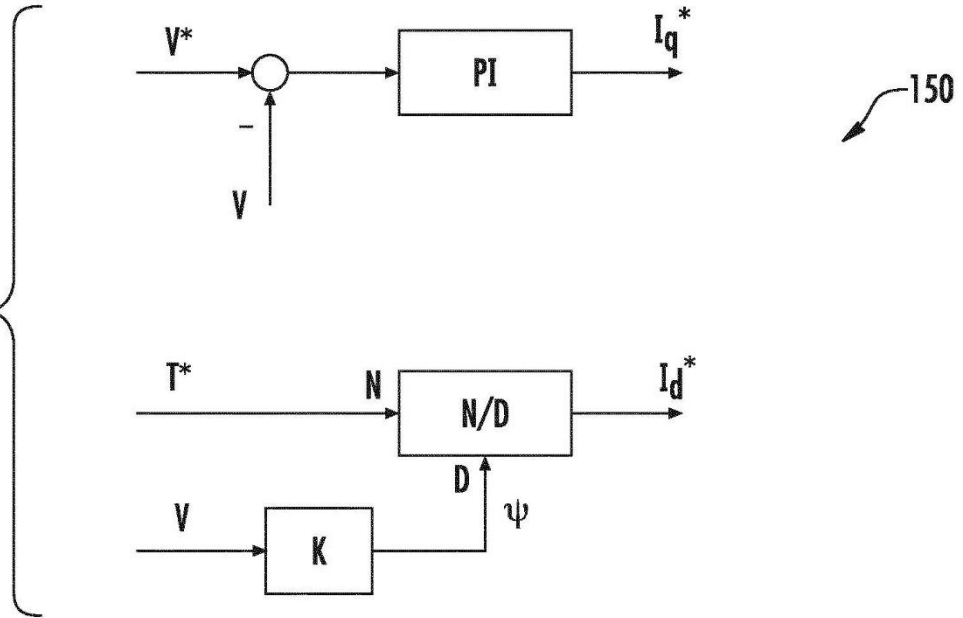
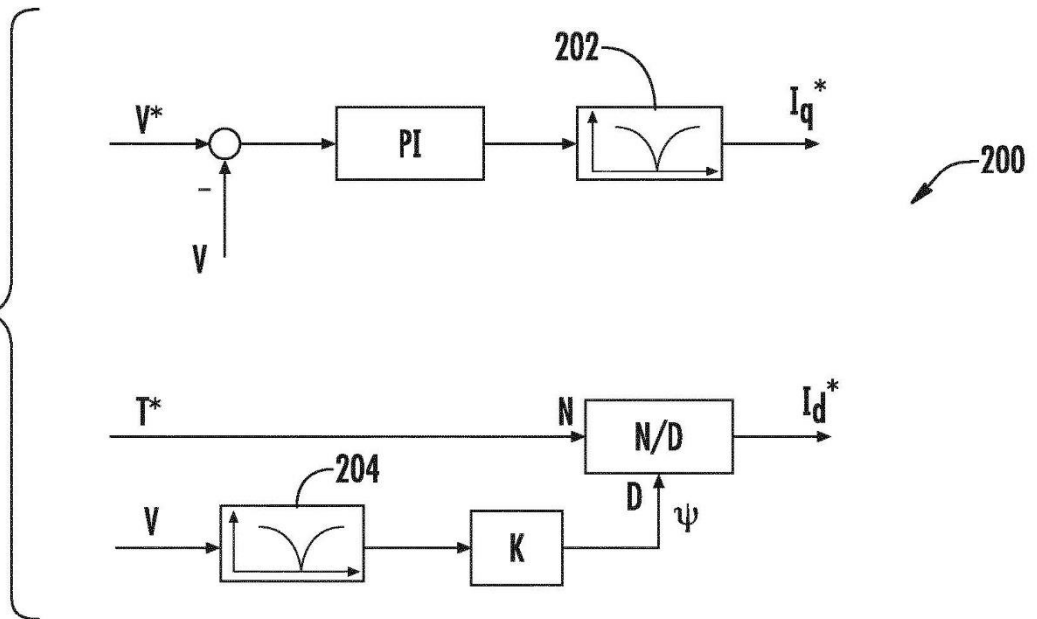


FIG. 10



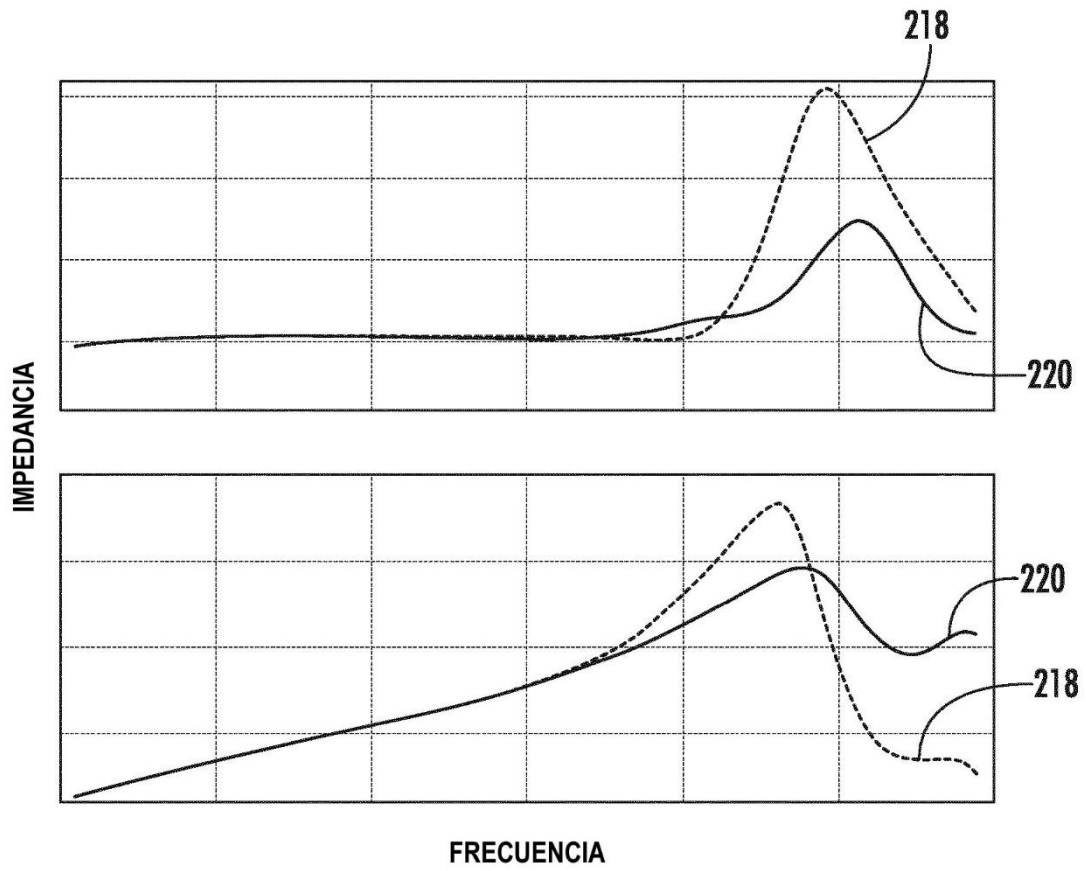


FIG. 11

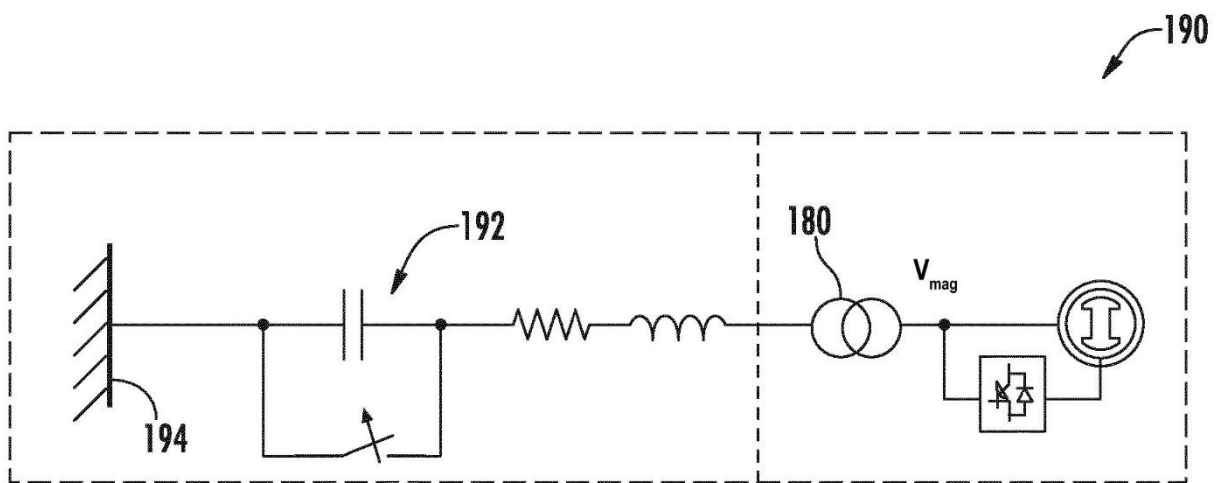


FIG. 12

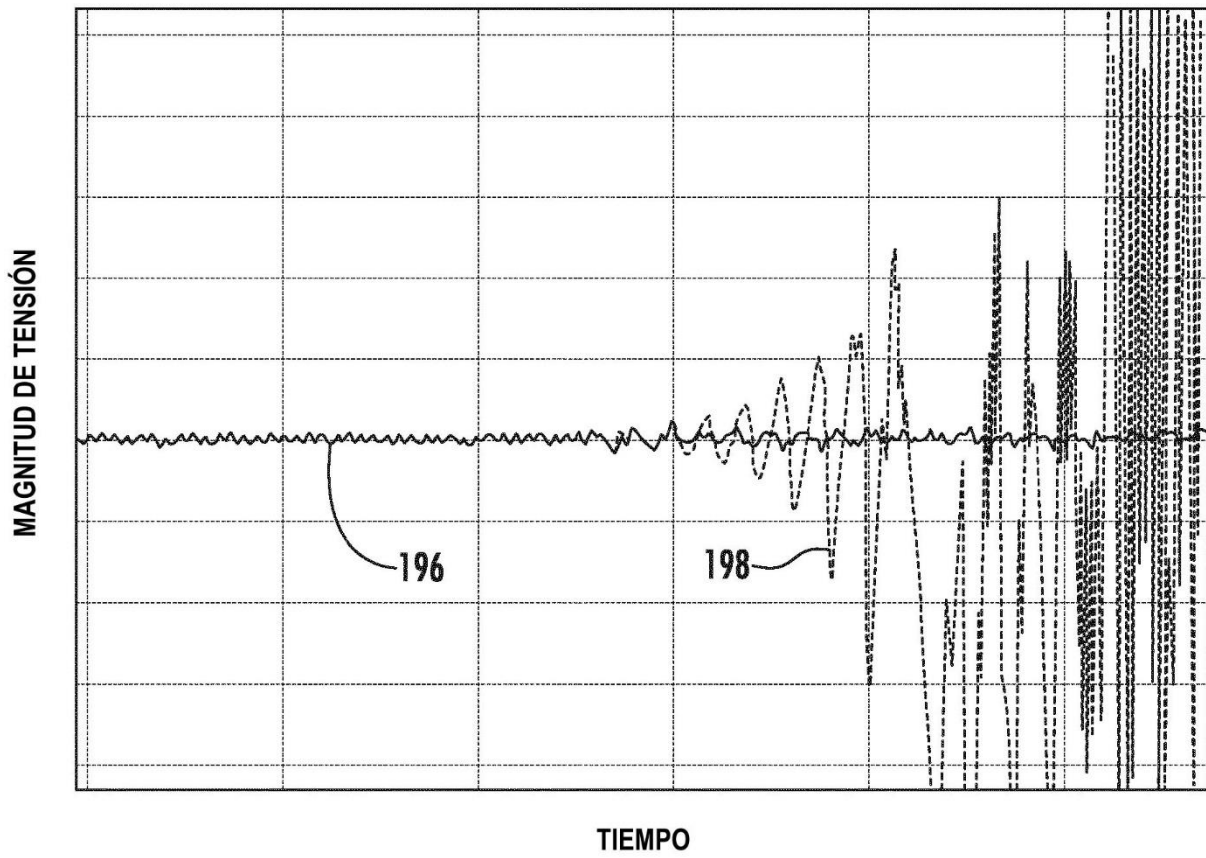


FIG. 13

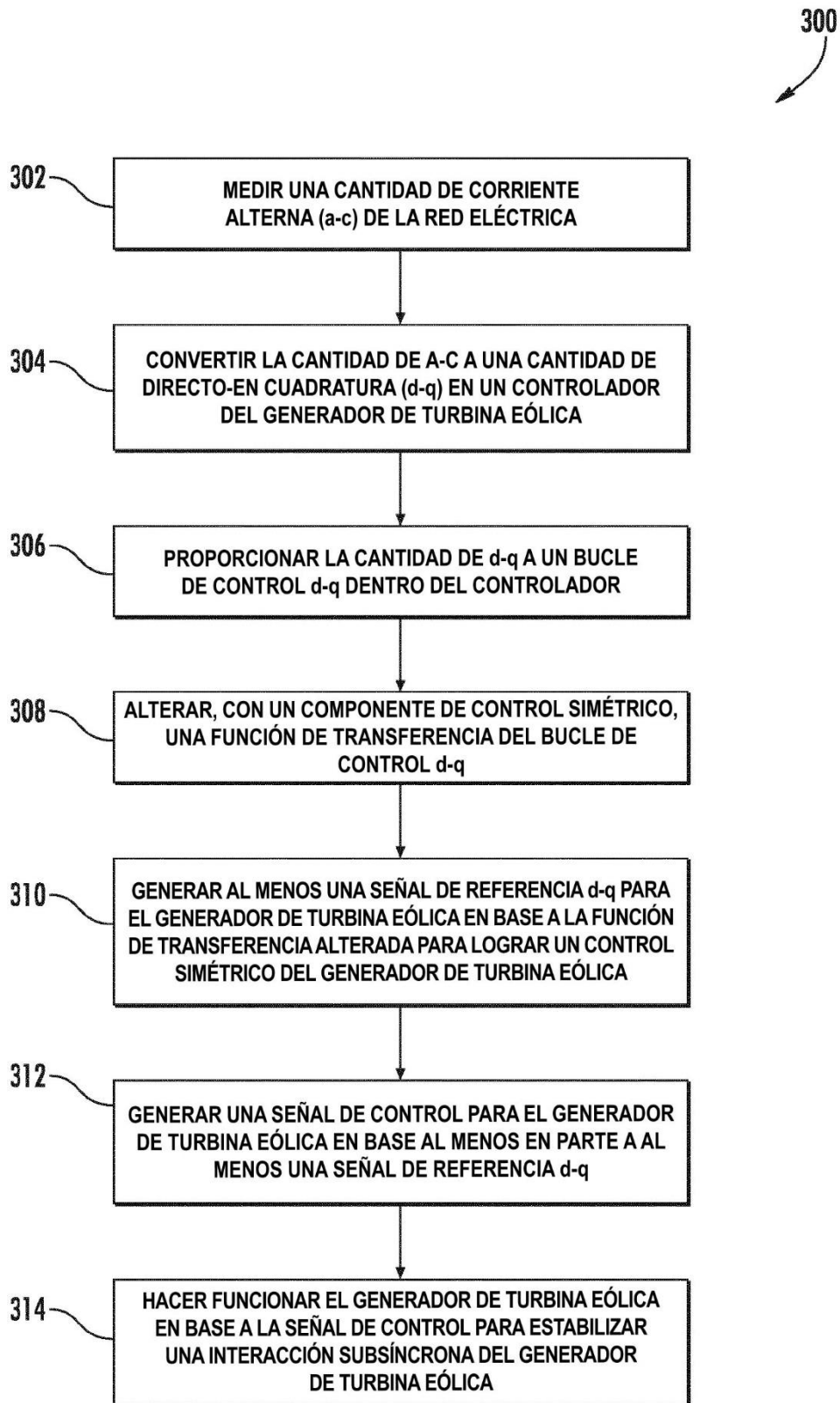


FIG. 14