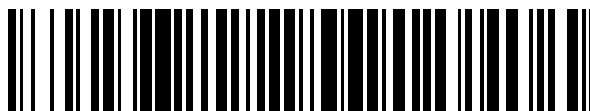


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 753 821**

51 Int. Cl.:

H02M 1/12 (2006.01)

H02M 5/458 (2006.01)

H02P 21/05 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.01.2010** **E 10000878 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **31.07.2019** **EP 2355317**

54 Título: **Dispositivo de controlador de corriente y método de control vectorial para controlar la conversión de potencia**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
14.04.2020

73 Titular/es:

SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT (100.0%)
Werner-von-Siemens-Strasse 1
80333 München, DE

72 Inventor/es:

BROGAN, PAUL BRIAN y
JONES, RODNEY

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 753 821 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

Dispositivo de controlador de corriente y método de control vectorial para controlar la conversión de potencia

La presente invención se refiere a un dispositivo de controlador de corriente que usa un algoritmo de control vectorial para controlar la conversión de potencia de CC en CA o viceversa por un convertidor, teniendo el controlador una ganancia de bucle de control de bucle abierto dependiente de la frecuencia. La invención se refiere además a un convertidor de potencia, a un equipo de generación de energía eléctrica tal como, por ejemplo, una turbina eólica, para una instalación de generación de energía eléctrica tal como, por ejemplo, un parque eólico y a un método de control vectorial para controlar un convertidor que convierte la potencia de CC en potencia de CA o viceversa.

Las turbinas eólicas convierten la energía eólica en energía eléctrica usando el viento para accionar el rotor del generador, ya sea directamente o por medio de una caja de engranajes. La frecuencia de la potencia de CA que se desarrolla en los terminales del estator del generador es directamente proporcional a la velocidad de rotación del rotor. La tensión en los terminales del generador también varía en función de la velocidad y, en función del tipo específico de generador, en el nivel de flujo. Para una potencia óptima, la velocidad de rotación del árbol de salida de la turbina eólica variará de acuerdo con la velocidad del viento que acciona las palas de la turbina eólica. Para limitar la potencia a alta velocidad del viento, la velocidad de rotación del árbol de salida se controla alterando el paso de las palas de turbina.

Los convertidores de potencia se usan, por ejemplo, para hacer coincidir la potencia de CA de frecuencia variable proporcionada por el generador con la potencia de CA de frecuencia nominalmente constante de la red. En una primera etapa de dicho convertidor de potencia, se usa un rectificador para convertir la potencia de CA suministrada desde el generador a una potencia de CC. Esta potencia de CC se alimenta a un llamado enlace de CC. En una segunda etapa, llamada inversor, cuyas entradas están conectadas al enlace de CC, la potencia de CC se convierte en una potencia de CA que coincide con la frecuencia de red.

En general, los inversores son circuitos usados para convertir potencia de CC en potencia de CA. Están equipados con conmutadores para conectar las salidas del terminal de fase del inversor a la barra colectora positiva o negativa del enlace de CC. El patrón de conmutación para abrir y cerrar los conmutadores se proporciona sobre la base de un esquema de modulación de ancho de pulso que define el sincronismo para conectar las salidas del inversor al nivel de tensión de CC alto o bajo a través de los conmutadores respectivos. Durante los momentos en que un conmutador está abierto, una corriente fluye desde el enlace de CC a la red o viceversa. También pueden aplicarse otros métodos para determinar el régimen de conmutación para los conmutadores que incluyen control directo o control predictivo.

El inversor puede controlarse de acuerdo con una señal de demanda de factor de potencia que representa un factor de potencia solicitado por el operador de la red, donde el factor de potencia está dado por la relación de la potencia real y la potencia aparente (la potencia aparente es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la potencia real y la potencia reactiva). En lugar de controlar el inversor de acuerdo con una demanda de factor de potencia, el inversor también puede controlarse sobre la base de una demanda de potencia real y una demanda de potencia reactiva. Además, en lugar de controlar el inversor directamente de acuerdo con una demanda de factor de potencia, o una demanda de potencia real y una demanda de potencia reactiva, también puede controlarse de acuerdo con las señales de demanda de corriente, ya que la amplitud de tensión suele ser un parámetro fijo en la red de tal manera que la potencia alimentada a la red por el inversor puede definirse por amplitudes de corriente y ángulos de fase entre la corriente y la tensión. Por lo tanto, una señal de demanda de factor de potencia o señales de demanda de potencia activa y reactiva pueden convertirse en señales de demanda de corriente que a continuación se usan para controlar el inversor, es decir, para determinar los pulsos que definen los tiempos de conmutación de los conmutadores. Tal modo de control se conoce como control de corriente.

En particular, puede usarse ventajosamente un algoritmo de control vectorial para controlar la conversión de potencia de CC en potencia de CA en el modo de control de corriente. Las señales de retroalimentación alterna equilibrada, adquiridas en un marco de referencia estacionario, pueden representarse como componentes I_α e I_β de los vectores I que rotan con una frecuencia rotacional ω_r con respecto al marco de referencia estacionario α, β (compárese con la figura 10). En un algoritmo de control vectorial, estos vectores rotatorios I se representan en un marco de referencia rotatorio que rota con el vector de flujo del rotor o un vector que rota con la tensión de la red (sincronizado con la tensión de la red) y las cantidades de control se calculan en este marco de referencia rotatorio basándose en las señales de demanda de corriente. En dicho marco de referencia rotatorio, una corriente de CA trifásica equilibrada I puede definirse por dos vectores de componentes vectoriales I_d, I_q que representan una corriente I_d que fluye en la dirección del vector de flujo, es decir, el denominado eje directo del marco de referencia rotatorio, y una corriente I_q que fluye perpendicular a la dirección del vector de flujo, es decir, en la dirección del denominado eje de cuadratura del marco de referencia rotatorio. Mientras que la corriente I_d que fluye en la dirección del vector de flujo o el vector que rota con la tensión de red se llama corriente de eje directo, la corriente I_q que fluye perpendicular al vector de flujo o el vector que rota con la tensión de red se llama corriente de eje de cuadratura. La corriente de eje directo y la corriente de eje de cuadratura son cantidades de CC en el estado estacionario, y el error

de estado se controla a cero, normalmente por medio de un controlador PI.

Los convertidores de potencia normales que incluyen un rectificador y un inversor para convertir una potencia de CA de frecuencia variable de un generador de turbina eólica a una potencia de CC y la potencia de CC a una potencia de CA de frecuencia fija de una red sobre la base de los algoritmos de control vectoriales se describen, por ejemplo, en los documentos US 5, 083,039 y US 2009/0147549 A1, que desvelan las características del preámbulo de las reivindicaciones 1 y 19.

El documento de Wei Qiao et al. "Improved control of DFIG windturbines for operation with unbalanced network voltages", Reunión anual de la sociedad de aplicaciones de la industria, 2008 IAS 08, IEEE, IEEE, Piscataway, NJ, USA, describe un convertidor de potencia que usa un esquema de control vectorial y un marco de referencia positivo y negativo. Los filtros de parada de banda resonante sintonizados al doble de la frecuencia de rotación del marco de referencia se usan para eliminar cantidades oscilantes del marco de referencia positivo y del marco de referencia negativo.

Los controladores mencionados tienen normalmente una ganancia de bucle de control de bucle abierto dependiente de la frecuencia. En el caso de que la ganancia de bucle de control de bucle abierto sea mayor que la unidad y tenga una fase menor o igual que menos de 180° , el sistema de control se define como inestable.

Con respecto a la técnica anterior mencionada es un objetivo de la presente invención proporcionar un dispositivo de controlador de corriente que use un algoritmo de control vectorial para controlar la conversión de potencia de CC en potencia de CA con una estabilidad mejorada en comparación con la técnica anterior. Es un objetivo adicional de la presente invención proporcionar un convertidor de potencia ventajoso, un equipo de generación de energía eléctrica ventajoso y una instalación de generación de energía eléctrica ventajosa. Además, es un objetivo de la presente invención proporcionar un método de control vectorial ventajoso para controlar un inversor que convierta la potencia de CC en potencia de CA.

El primer objetivo se resuelve mediante un controlador de corriente de acuerdo con la reivindicación 1, el segundo objetivo mediante un convertidor de potencia de acuerdo con la reivindicación 11, un equipo de generación de energía eléctrica de acuerdo con la reivindicación 13 y una instalación de generación de energía eléctrica de acuerdo con la reivindicación 16. El tercer objetivo se resuelve mediante un método de control vectorial de acuerdo con la reivindicación 19. Las reivindicaciones dependientes contienen desarrollos adicionales de la invención.

De acuerdo con la invención, se proporciona un método de control vectorial para controlar un convertidor que convierte la potencia de CC en potencia de CA o viceversa, donde la potencia de CA se emite a, o se recibe de una red. El control vectorial calcula una primera señal de demanda de tensión y una segunda señal de demanda de tensión sobre la base de una primera señal de demanda de corriente, una segunda señal de demanda de corriente, una primera señal de retroalimentación de corriente, una segunda señal de retroalimentación de corriente, una primera señal de retroalimentación de tensión y una segunda señal de retroalimentación de tensión. La ganancia de bucle de control de bucle abierto depende de las frecuencias contenidas en las señales de retroalimentación de corriente primera y segunda. De acuerdo con la invención, se suprimen las frecuencias de las señales de retroalimentación de corriente primera y segunda en las que la ganancia de bucle de control de bucle abierto sería mayor que la unidad y tendría una fase menor o igual que menos de 180° .

El procedimiento de la invención se basa en las siguientes observaciones: la red conectada a los inversores con unos esquemas de modulación de ancho de pulso de frecuencia fija puede sufrir de inestabilidad de bucle cerrado cuando se conecta a una red como, por ejemplo, un sistema colector eléctrico de tipo parque eólico. Dichos sistemas colectores, pero también otras redes, pueden tener una capacitancia de cable significativa y/o líneas aéreas, y pueden conectarse a sistemas eléctricos de CA débiles. Cuando se ve desde los terminales de salida del inversor, esta capacitancia de cable junto con el reactor de línea de entrada y el transformador de turbina forman un circuito resonante en serie que tiene un mínimo de impedancia en la frecuencia sintonizada (no intencionalmente), lo que a su vez resulta en una alta admitancia.

El controlador de corriente de bucle cerrado de la red, o generador, conectado al inversor puede analizarse considerando su ganancia de bucle abierto. Esta ganancia de bucle abierto puede calcularse a partir del producto de la función de transferencia de controlador $C(s)$ y la admitancia $Y(s)$ de la red eléctrica o el generador. La función de transferencia de controlador $C(s)$ está definida por el algoritmo de control usado en el controlador. En general, el control de los esquemas de frecuencia de conmutación fija se realiza en sincronía con el vector de flujo de rotación del generador o sincronizado con la tensión de red.

En un esquema de modulación de ancho de pulsos de frecuencia fijo de este tipo, existe un retraso entre muestrear una retroalimentación de corriente y/o una retroalimentación de tensión y realizar una tensión de salida del inversor con la que controlar la corriente en la salida del inversor. Este retraso hace que una característica de fase tenga un retraso de fase creciente a medida que aumenta la frecuencia. El sistema de control de corriente se define como que

es inestable si la ganancia de bucle de control de bucle abierto es mayor que la unidad cuando la fase de la ganancia de bucle de control de bucle abierto es menor o igual que menos de 180° .

En particular, si un gran número de inversores se conecta a una red que tiene una capacitancia significativa debido a, por ejemplo, un sistema colector, la admisión vista desde la salida del inversor puede llegar a ser tan alta que la ganancia de bucle de control de bucle abierto aumente por encima de la unidad y, al mismo tiempo, la fase de la ganancia de bucle de control de bucle abierto es menor o igual que menos de 180° para una determinada banda de frecuencia o ciertas bandas de frecuencia. Esta combinación conduciría a inestabilidades del sistema de control en estas bandas de frecuencia.

Aunque también surgiría la dificultad descrita anteriormente, en general, con solo unos pocos inversores conectados a una red (por ejemplo dos o tres inversores), se hace más grave aumentando el número de inversores conectados a la red.

Los problemas descritos anteriormente se vuelven relevantes si muchos convertidores de alta potencia se conectan a una matriz de cables grande. Además, si la relación entre la potencia aparente instalada y el nivel de fallo de red se vuelve alta, se vuelve relevante una influencia secundaria. Estas relaciones no se han considerado antes, ya que una gran cantidad de convertidores de alta potencia conectados a una matriz de cables grande y altas relaciones entre la potencia aparente instalada y el nivel de fallo de red solo están a punto de alcanzarse en la actualidad de tal manera que los problemas descritos anteriormente sean más relevantes en el futuro cercano.

Con el método de control vectorial de la invención, el sistema de control puede estabilizarse suprimiendo tales frecuencias de las señales de retroalimentación de corriente primera y segunda en las que la ganancia de bucle de control de bucle abierto del control vectorial sería mayor que la unidad y/o de su fase sería menor o igual que menos de 180° .

En el caso de que esté presente una pluralidad de equipos de generación de energía eléctrica, al menos un subconjunto de los cuales está conectado entre sí por la red, cada uno de que la pluralidad de equipos de generación de energía eléctrica convierte la potencia de CC en potencia de CA y comprende un reactor y un transformador. La red tiene una capacitancia de red, por ejemplo, la capacitancia de cable de una matriz de cables colectores. A partir de los parámetros de los reactores, los transformadores, la capacitancia de red y la impedancia de red pueden determinarse las frecuencias de las señales de retroalimentación de corriente primera y segunda en las que la ganancia de bucle de control de bucle abierto sería mayor que la unidad y tendría una fase menor o igual que menos de 180° . En particular, la capacitancia de red puede estar gobernada por la capacitancia de al menos un cable colector que es parte de la red y conecta al menos un subconjunto de esta pluralidad de equipos de generación de energía eléctrica con un equipo central.

La determinación de las frecuencias puede realizarse, en particular, determinando una admitancia como se ve desde la salida del inversor a partir de los parámetros de los reactores, de los transformadores y de la capacitancia de cable. A continuación, se calcula la ganancia de control de bucle abierto a partir del producto de la ganancia de bucle abierto, $C(s)$, del método de control vectorial y la admitancia determinada, $Y(s)$. Las frecuencias a las que la ganancia de bucle de control de bucle abierto es mayor que la unidad y en las que la fase es menor o igual que menos de 180° pueden determinarse a partir del resultado del cálculo.

El método de control vectorial de la invención puede, en particular, usarse en el contexto de los equipos de generación de energía eléctrica que generan una potencia de CA que se convierte en una potencia de CC antes de que se invierta de nuevo a una potencia de CA.

Un dispositivo de controlador de corriente adecuado para realizar el método de control vectorial de la invención usa un algoritmo de control vectorial para controlar la conversión de potencia de CC en potencia de CA o viceversa por un convertidor. Tiene una ganancia de bucle de control de bucle abierto dependiente de la frecuencia y comprende una primera entrada de demanda de corriente para recibir una primera señal de demanda de corriente, al menos una segunda entrada de demanda de corriente para recibir una segunda señal de demanda de corriente, una primera entrada de retroalimentación de corriente para recibir una primera señal de retroalimentación de corriente que representa la corriente alterna de la corriente alterna, por ejemplo, una corriente alterna en un terminal de convertidor, una segunda entrada de retroalimentación de corriente para recibir una segunda señal de retroalimentación de corriente que representa una corriente de CA de la potencia de CA, por ejemplo, una corriente de CA en un terminal de convertidor, una primera entrada de retroalimentación de tensión para recibir una primera señal de retroalimentación de tensión que representa la tensión de CA de la potencia de CA, por ejemplo, una tensión de CA en un terminal de convertidor, una segunda entrada de retroalimentación de tensión para recibir una segunda señal de retroalimentación de tensión que representa una tensión de CA de la potencia de CA, por ejemplo, una tensión de CA en un terminal de convertidor, una primera salida de demanda de tensión para emitir una primera señal de demanda de tensión, una segunda salida de demanda de tensión para emitir una segunda señal de demanda de tensión y un controlador para producir dicha primera señal de demanda de tensión y dicha segunda señal de demanda de tensión sobre la base de dicha primera señal de demanda de corriente, dicha segunda señal

de demanda de corriente, dicha primera señal de retroalimentación de corriente, dicha segunda señal de retroalimentación de corriente, dicha primera señal de retroalimentación de tensión y dicha segunda señal de retroalimentación de tensión. En el controlador de corriente, la ganancia de bucle de control de bucle abierto depende de las frecuencias contenidas en las señales de retroalimentación de corriente primera y segunda. Se proporciona un primer filtro en la primera entrada de retroalimentación de corriente y se proporciona un segundo filtro en la segunda entrada de retroalimentación de corriente. Ambos filtros tienen cada uno de los mismos unas características de filtro elegidas, tales como para reducir las frecuencias de las señales de retroalimentación de corriente primera y segunda en las que la ganancia de bucle de control de bucle abierto sería mayor que la unidad y tendría una fase menor o igual que menos de 180° de tal manera que la ganancia de bucle de control de bucle abierto en dichas frecuencias determinadas está por debajo de la unidad y/o la fase relacionada con dichas frecuencias se desplaza por encima de menos de 180° .

Como dichos filtros primero y segundo, pueden usarse los filtros de parada de banda, teniendo cada uno de los mismos una frecuencia central y un ancho de banda elegido tal como para reducir las frecuencias de las señales de retroalimentación de corriente primera y segunda en las que la ganancia de bucle de control de bucle abierto dependiente de la frecuencia sería mayor que la unidad y tendría una fase menor o igual que menos de 180° .

En particular, dichos filtros de parada de banda tendrían normalmente una frecuencia central en o por encima de 150 Hz, por ejemplo, en o por encima de 400 Hz o en o por encima de 600 Hz. Además, dicho filtro de parada de banda normalmente tendría un ancho de banda de al menos 50 Hz y, en particular, de al menos 200 Hz.

En el caso, existen diferentes intervalos de frecuencia en los que la ganancia de bucle de control de bucle abierto llegaría a ser mayor que la unidad y tendría una fase menor o igual que menos de 180° , al menos podría proporcionarse un tercer filtro de parada de banda entre la primera entrada de retroalimentación de corriente y el primer filtro de parada de banda, y al menos podría proporcionarse un cuarto filtro de parada de banda entre la segunda entrada de retroalimentación de corriente y el segundo filtro de parada de banda. Los filtros de parada de banda tercero y cuarto tendrían cada uno de los mismos una frecuencia central en o por encima de 150 Hz y/o un ancho de banda de al menos 50 Hz.

Usando al menos dos filtros de parada de banda para cada señal de retroalimentación de corriente pueden suprimirse diferentes bandas de frecuencia que conducirían a inestabilidades mientras que, al mismo tiempo, no suprimir sustancialmente tales frecuencias que no conducirían a inestabilidades.

El controlador puede, en particular, comprender un primer restador conectado a la primera entrada de señal de demanda de corriente y a la primera entrada de retroalimentación de corriente, estando el restador adaptado para formar una primera señal de error que representa la diferencia entre la primera señal de demanda de corriente y la primera señal de retroalimentación de corriente. Además, un controlador de corriente de este tipo comprendería al menos un segundo restador conectado a la segunda entrada de señal de demanda de corriente y a la segunda entrada de retroalimentación de corriente, estando el segundo restador adaptado para formar una segunda señal de error que representa la diferencia entre la segunda señal de demanda de corriente y la segunda señal de retroalimentación de corriente. A continuación se conecta una primera unidad de control, preferentemente un controlador PI, al primer restador para recibir la primera señal de error y se adapta para producir una primera señal de control basándose en la primera señal de error. Al menos una segunda unidad de control, preferentemente también un controlador PI, se conecta al segundo restador para recibir la segunda señal de error y se adapta para producir una segunda señal de control basándose en la segunda señal de error. Además, se conecta un primer multiplicador a la primera entrada de señal de demanda de corriente y se adapta para producir una tercera señal de control multiplicando la primera señal de demanda de corriente por al menos una frecuencia fundamental y un valor de inductancia, y se conecta al menos un segundo multiplicador a la segunda entrada de señal de demanda de corriente y se adapta para producir una cuarta señal de control multiplicando la segunda señal de demanda de corriente por al menos una frecuencia fundamental y un valor de inductancia. Además, se conecta una disposición de sumador a la primera unidad de control, al segundo multiplicador, a la primera entrada de retroalimentación de tensión y a la primera salida de demanda de tensión. Esta primera disposición de sumador se adapta para producir la primera señal de demanda de tensión sumando la primera señal de control, la cuarta señal de control y la primera señal de retroalimentación de tensión. Una disposición de sumador/restador se conecta a la segunda unidad de control, al primer multiplicador, a la segunda entrada de retroalimentación de tensión y a la segunda salida de demanda de tensión. La segunda disposición de sumador se adapta para producir la segunda señal de demanda de tensión restando la tercera señal de control de la segunda señal de retroalimentación de tensión y sumando la segunda señal de control. En un dispositivo de controlador de corriente de este tipo, el primer filtro se localiza entre la primera entrada de retroalimentación de corriente y el primer restador y el segundo filtro se localiza entre la segunda entrada de retroalimentación de corriente y el segundo restador.

La invención también proporciona un convertidor de potencia que comprende un inversor para convertir la potencia de CC en potencia de CA y un dispositivo de controlador de corriente de la invención para controlar la conversión de la potencia de CC en potencia de CA. Debido al dispositivo de controlador de corriente de la invención, el sistema de control del convertidor de potencia muestra una mayor estabilidad. El convertidor de potencia de la invención puede,

además, comprender un rectificador para convertir una potencia de CA a dicha potencia de CC. Tales convertidores de potencia pueden usarse, en particular, cuando el generador produce una potencia de CA de una primera frecuencia (constante o variable) que se convertirá en una potencia de CA de una segunda frecuencia.

5 Un convertidor de potencia de la invención puede usarse, en particular, en un equipo de generación de energía eléctrica como una célula fotovoltaica o, en el caso de que el convertidor de potencia incluya un rectificador, un equipo de generación de energía eléctrica con un generador eléctrico que genera potencia de CA, tal como un generador de turbina eólica o como un sistema de interconexión de CA a CA entre dos sistemas eléctricos de CA, que pueden tener o no frecuencias fundamentales nominalmente diferentes.

10 De acuerdo con un aspecto adicional de la invención, se proporciona una instalación de generación de energía eléctrica que comprende una pluralidad de equipos de generación de energía eléctrica como, por ejemplo, turbinas eólicas estando cada una equipada con un transformador, un reactor y un convertidor de potencia que incluye un inversor para convertir la potencia de CC en potencia de CA, y un dispositivo de controlador de corriente para controlar la salida de potencia de CA por el inversor. La instalación comprende además una red a la que están conectados los equipos de generación de energía eléctrica y que tiene una capacitancia de red. El reactor de los
15 equipos de generación de energía eléctrica, los transformadores y la capacitancia de red forman un circuito resonante, cuya frecuencia sintonizada da como resultado una alta admitancia que hace que las ganancias de bucle de control de bucle abierto de los controladores del inversor sean mayores que la unidad y tengan fases menores o iguales que menos de 180°. En una instalación de generación de energía eléctrica de este tipo, los dispositivos de controlador de corriente de la invención se usan como dispositivos de controlador de corriente en los convertidores
20 de potencia de los equipos de generación de energía de tal manera que pueden suprimirse las frecuencias que provocarían inestabilidades debido al circuito resonante mencionado.

En particular, la red puede comprender al menos un cable colector que conecta al menos un subconjunto de dicha pluralidad de equipos de generación de energía eléctrica a un equipo central de la instalación de generación de energía tal como, por ejemplo, un transformador principal que conecta una red interior para una red de servicios
25 públicos, y que tiene una capacitancia de cable donde la capacitancia de red se proporciona sustancialmente por la capacitancia del al menos un cable colector. Tales cables colectores se usan normalmente en grandes parques eólicos para conectar las turbinas eólicas a un transformador central. Además, pueden estar presentes condensadores de corrección de factor de potencia que tendrían un efecto similar al de las capacitancias del cable.

Cada equipo de generación de energía eléctrica puede comprender un generador eléctrico que genera una potencia de CA. En este caso, el convertidor de potencia comprende además un rectificador para convertir la potencia de CA generada a dicha potencia de CC. El uso del rectificador permite generar una potencia de CA cuya frecuencia no coincide con la frecuencia de la potencia de CA de la red. La combinación de rectificador e inversor permite la conversión de frecuencia para hacer coincidir la potencia de CA del generador con la potencia de CA de la red. Este método de estabilización también podría aplicarse a los esquemas HVCC, donde el convertidor de CA, CC y CA
30 ofrece una interconexión entre el sistema eléctrico de CA, en lugar de una interfaz entre un generador y un sistema de CA como se ha descrito anteriormente.

Otras características, propiedades y ventajas de la presente invención quedarán claras a partir de la siguiente descripción de las realizaciones junto con los dibujos adjuntos.

La figura 1: muestra esquemáticamente una configuración típica de un parque eólico.

40 La figura 2: muestra los equipos eléctricos de una turbina eólica en detalle.

La figura 3: muestra un inversor que es parte del equipo eléctrico de la turbina eólica mostrada en la figura 2.

La figura 4: muestra un controlador de corriente para el inversor mostrado en la figura 3.

La figura 5: muestra un circuito equivalente de un cable colector de turbina eólica y la línea de entrada de una turbina eólica.

45 La figura 6: muestra la ganancia de bucle de control de bucle abierto dependiente de la frecuencia de los parques eólicos que comprenden de uno a tres cables colectores con 1 a 27 turbinas eólicas en función de la frecuencia.

La figura 7: muestra $C(s)$ con el filtro de muesca en la retroalimentación de corriente.

La figura 8: muestra $C(s)$ $Y(s)$ la ganancia de bucle abierto completa del sistema.

50 La figura 9: muestra una realización alternativa del controlador de corriente de la invención.

La figura 10: es un diagrama que ilustra un vector de corriente en un sistema de coordenadas fijo y un sistema de coordenadas de campo rotatorio.

Normalmente, se conectan entre sí un número de turbinas eólicas 1 para definir un parque eólico, como se muestra en la figura 1. Las turbinas eólicas se conectan en paralelo a un transformador de parque eólico 23 mediante un cable colector 15. El transformador de parque eólico se conecta a su vez a una red de servicios públicos de frecuencia nominalmente fija 3 (red etiquetada en la figura). Cada turbina eólica 1 se conecta al cable colector 15 a través de un reactor de línea de entrada 19 y un transformador de turbina eólica 21.

Aunque solo se muestra en la figura 1 un cable colector 15 al que se conectan cuatro turbinas eólicas 1, el número de cables de colector 15, así como el número de turbinas eólicas conectadas a un cable colector puede diferir de lo mostrado en la figura 1. Por ejemplo, los grandes parques eólicos comprenden en general más de un cable colector. Además, el número de turbinas eólicas conectadas a cada cable colector 15 puede ser menor que cuatro o, en particular, mayor que cuatro.

La figura 2 muestra dos de las turbinas eólicas de la figura 1 con más detalle. En particular, la figura muestra el equipo eléctrico de las turbinas eólicas para controlar el generador y la salida de potencia de la turbina.

Cada turbina eólica 1 comprende un rotor 3 con un árbol de rotor 5 que transmite el momento de rotación del rotor de rotación 3 a una caja de engranajes 7. En la caja de engranajes 7, tiene lugar una transmisión de la rotación a un árbol de salida 9 con una cierta relación de transmisión. El árbol de salida 9 está fijado al rotor de un generador de CA 11 que transforma la potencia mecánica proporcionada por la rotación del árbol de salida 9 en la energía eléctrica. El generador de CA 11 puede ser, o bien un generador síncrono o un generador asíncrono (alimentado individualmente o doblemente). En un generador síncrono, el rotor rota con la misma frecuencia de rotación que un campo magnético rotatorio producido por un estator del generador. Por el contrario, en un generador asíncrono, las frecuencias de rotación del campo magnético del estator y del rotor son diferentes. La diferencia en la frecuencia de rotación se describe por el deslizamiento del generador. Los generadores 11 son generadores de velocidad variable, es decir, se permite que la velocidad de rotación del rotor varíe en función de las condiciones del viento.

Para proporcionar una frecuencia fija para la red de servicios públicos a la que las turbinas eólicas están conectadas, cada turbina eólica 1 está equipada con un convertidor electrónico de potencia 13 que convierte partes o la totalidad de la electricidad de frecuencia variable suministrada por los generadores 11 en una energía eléctrica que tiene una frecuencia fija que se adapta a la red de servicios públicos. Además, los convertidores electrónicos de potencia 13 controlan la salida de potencia de la electricidad suministrada por las turbinas eólicas 1. Los detalles de los convertidores electrónicos de potencia 13 se explicarán más adelante.

Las turbinas eólicas individuales 1 se conectan al cable colector 15, que es normalmente parte de una red de tensión intermedia interior 17, a través de filtros 19 en forma de reactores y transformadores 21. La red interior 17 se conecta, a través de una subestación 23 que incluye un transformador, a una red de servicios públicos que normalmente debe operarse con un cierto factor de potencia solicitado por el operador del sistema de servicios públicos.

La regulación de la salida de potencia de la electricidad suministrada por las turbinas eólicas se describirá junto con las figuras 2 y 3. La salida de potencia se controla por los convertidores electrónicos de potencia 13 de las turbinas eólicas individuales 1 de acuerdo con una solicitud de factor de potencia o, como alternativa, de acuerdo con una solicitud de potencia activa y una solicitud de potencia reactiva. Cada convertidor electrónico de potencia 13 comprende un rectificador activo 25 para producir una tensión de CC con un nivel de alta tensión y un nivel de baja tensión, por ejemplo, un nivel de tensión positivo como nivel de alta tensión y un nivel de tensión negativo como nivel de baja tensión, a partir de la tensión de CA de frecuencia variable proporcionada por las turbinas eólicas 1, un inversor 27 que produce una tensión de CA de frecuencia nominalmente fija a partir de la tensión de CC, y un enlace de CC 29 que conecta el rectificador activo 25 con el inversor 27. Cada convertidor electrónico de potencia 13 incluye además un controlador de generador 31 que controla el par reaccionado por el generador de CA 11 controlando la corriente del estator o la tensión del estator del generador de CA 11, y un controlador inversor 33 que controla la corriente de salida del convertidor electrónico de potencia 13 para suministrar potencia de CA trifásica que tiene corrientes adelantadas o atrasadas en un ángulo especificado por el factor de potencia solicitado.

Obsérvese que en una disposición alternativa para regular la salida de potencia de la electricidad suministrada por las turbinas eólicas, una salida de controlador de tensión de enlace de CC puede determinar la referencia I_q de generador, es decir, la potencia o el par que produce el vector para el generador, y puede alimentarse una referencia de potencia activa a la referencia I_q de red. La referencia I_q de red se determina a continuación, o bien por un sistema de referencia de corriente reactiva (puede ser un valor fijo) o por un bucle de control de tensión de red de CA adicional.

En la presente realización, el controlador de inversor 33 recibe los niveles de tensión en el enlace de CC 29, los

niveles de corriente en la salida de inversor 37, los niveles de tensión entre los filtros 19 y el transformador 21 y las señales de control de corriente de un controlador de potencia 41 que genera las señales de demanda de corriente de acuerdo con el factor de potencia solicitado. La estructura del inversor 27 y la estructura general del controlador de inversor 33 se muestran en la figura 3.

- 5 El inversor 27 comprende tres pares de dispositivos de conmutación activos 35, como unos transistores bipolares de puerta aislada (IGBT), transistores de unión bipolares, transistores de efecto de campo, transistores Darlington o tiristores de cierre de puerta. En la presente realización, cada par de dispositivos de conmutación activos 35 incluye dos transistores bipolares de puerta aislada como dispositivos de conmutación activos 35. Los pares de dispositivos de conmutación activos 35 se conectan entre el nivel de alta tensión y el nivel de baja tensión del enlace de CC 29.
- 10 Las tres líneas de la salida de inversor 37 se conectan cada una a uno diferente de los pares de dispositivos de conmutación activos 35, en el medio entre los dispositivos de conmutación 35. Mediante un esquema adecuado de conmutación de los dispositivos de conmutación activos 35, la tensión de CC en el enlace de tensión 29 puede transformarse en una tensión de CA trifásica en la salida de inversor 37 con niveles de corriente con el fin de que coincida con el factor de potencia solicitado. La conmutación se realiza de acuerdo con las señales de conmutación modulada por ancho de pulso proporcionadas por un generador de modulación de ancho de pulso 39 que es parte del inversor 27 y que recibe señales de demanda de tensión por un dispositivo de controlador de corriente 43 del controlador de inversor 33.

El controlador de inversor se muestra en la figura 4 en mayor detalle. Como se ha mencionado, el controlador de inversor comprende un dispositivo de controlador de corriente 43 y un generador de modulación de ancho de pulso 39. El dispositivo de controlador de corriente 43 determina las señales de demanda de tensión VQ_NET*, VD_NET* sobre la base de las señales de demanda de corriente IQ_NET* e ID_NET*. Las señales de demanda de tensión VQ_NET* y VD_NET* se usan por el generador de modulación de ancho de pulso 39 para determinar las señales de orden de accionamiento de puerta RU, RL, YU, YL, BU y BL para los dispositivos de conmutación activos 35 en el inversor 27 que definen los tiempos de conmutación de los dispositivos de conmutación 35.

- 25 Las señales de demanda de corriente IQ_NET* y ID_NET* se calculan mediante el controlador de potencia sobre la base de una solicitud de factor de potencia. Se definen en un marco de referencia rotatorio, el denominado marco de referencia de campo rotatorio, que rota en sincronía con la tensión de red. En este marco de referencia, una corriente trifásica equilibrada puede expresarse en términos de una corriente de eje directo ID que fluye en la dirección del vector de flujo rotatorio y una corriente de eje de cuadratura IQ que fluye en una dirección perpendicular al vector de flujo rotatorio. Los dos componentes de corriente distintos de cero pueden transformarse en la corriente de eje directo ID y la corriente de eje de cuadratura IQ mediante una transformación de coordenadas adecuada. La ventaja de la representación de las corrientes de CA en forma de una corriente de eje directo ID y una corriente de eje de cuadratura IQ es que, en el marco de referencia rotatorio, estas dos corrientes están representadas por componentes de CC en el estado estacionario y el error de estado estacionario puede controlarse a cero por un controlador proporcional integral (controlador PI).

El dispositivo de controlador de corriente 43 comprende dos entradas de demanda de corriente, una primera entrada demanda de corriente para la señal de demanda de corriente de eje de cuadratura IQ_NET* y una segunda entrada de demanda de corriente para la señal de demanda de corriente de eje directo ID_NET*, dos entradas de retroalimentación de corriente, a saber, una primera entrada de retroalimentación de corriente para la retroalimentación de corriente de eje de cuadratura IQ_NET y una segunda entrada de retroalimentación de corriente para la retroalimentación de corriente de eje directo ID_NET. Ambas señales de retroalimentación pueden obtenerse mediante una transformación adecuada a partir de mediciones de las tres fases de la corriente de salida en la salida de inversor. Además, el controlador de corriente comprende dos entradas de retroalimentación de tensión, a saber, una primera entrada de retroalimentación de tensión para la retroalimentación de tensión de eje de cuadratura VQ_NET y una segunda entrada de retroalimentación de tensión para la señal de retroalimentación de tensión de eje directo VD_NET. Al igual que las señales de retroalimentación de corriente, las señales de retroalimentación de tensión pueden obtenerse usando una transformación adecuada a partir de las mediciones de las tres fases de la tensión de salida medidas entre el filtro 19 y el transformador 21 a. Además, pueden filtrarse la retroalimentación de tensión de eje de cuadratura VQ_NET y la señal de retroalimentación de tensión de eje directo VD_NET. Una entrada adicional está presente en el controlador de corriente 43 para recibir la frecuencia de la forma de onda de tensión de red.

En un primer restador 45, la señal de retroalimentación de corriente de eje de cuadratura IQ_NET se resta de la señal de demanda de corriente de eje de cuadratura IQ_NET* para formar una señal de error de eje de cuadratura EQ que a continuación se recibe por un controlador PI 47 que produce una primera señal de control C1. Asimismo, un segundo restador 49 se conecta a la segunda entrada de señal de demanda de corriente y a la segunda entrada de señal de retroalimentación de corriente para recibir las señales respectivas. El segundo restador 49 resta la señal de retroalimentación de corriente de eje directo ID_NET de la señal de demanda de corriente de eje directo ID_NET* para producir una señal de error de eje directo ED que se emite a un segundo controlador PI 51 que determina una segunda señal de control C2 sobre la base de la señal de error de eje directo ED.

Además, el dispositivo de controlador de corriente 43 comprende un primer multiplicador 53 y un segundo multiplicador 57, estando el primer multiplicador 53 conectado a la entrada de señal de demanda de corriente de eje de cuadratura para recibir la señal de demanda de corriente de eje de cuadratura IQ_NET^* y a la entrada de frecuencia para recibir la frecuencia WN de la forma de onda de tensión de red. El primer multiplicador 53 multiplica la señal de demanda de corriente de eje de cuadratura recibida IQ_NET^* por la frecuencia recibida WN y la inductividad L del reactor de línea de entrada. El resultado de la multiplicación forma una tercera señal de control $C3$. Del mismo modo, el segundo multiplicador 57 está conectado a la entrada de señal de demanda de corriente de eje directo para recibir la señal de demanda de corriente de eje directo ID_NET^* y a la entrada de frecuencia para recibir la frecuencia WN de la forma de onda de tensión de red. Este multiplica la señal de demanda de corriente de eje directo ID_NET^* por la frecuencia recibida WN y la inductividad L del reactor de línea de entrada para formar una cuarta señal de control $C4$.

Una disposición de sumador 59 se conecta a la primera PI-controlador 47 para recibir la primera señal de control $C1$, a la segunda multiplicador 57 para recibir el cuarto $C4$ señal de control y a la primera entrada de retroalimentación de tensión para recibir la retroalimentación de tensión del eje de cuadratura señal VQ_NET . Calcula la primera señal de demanda de tensión VQ_NET^* sumando las tres señales recibidas. La señal de demanda de tensión del eje de cuadratura calculada VQ_NET^* se emite a través de una primera salida de demanda de tensión al generador de modulación de ancho de pulso 39.

Una disposición de sumador/restador 61 está presente en el dispositivo de controlador de corriente 43 que está conectado a la segunda PI-controlador 51 para recibir la segunda señal de control $C2$, al primer multiplicador 53 para recibir la tercera $C3$ señal de control y a la segunda entrada de retroalimentación de tensión para recibir la señal de retroalimentación de tensión del eje directo VD_NET . Resta la tercera señal de control $C3$ de la señal de retroalimentación de tensión del eje directo VD_NET y suma el resultado en la segunda señal de control $C2$ para generar la segunda señal de demanda de tensión del eje, es decir, la señal de demanda de tensión del eje directo VD_NET^* . La señal de demanda de tensión de eje directo VD_NET^* se emite a través de una segunda salida de demanda de tensión al generador de modulación de ancho de pulso 39.

El generador de modulación de ancho de pulso 39 establece las órdenes de conmutación individuales para los dispositivos de conmutación 35 que conectan las líneas de salida respectivas R , Y , B del inversor 27 al nivel de tensión superior o positivo VU del enlace de CC y el nivel de tensión inferior o negativo VL del enlace de CC a través de los respectivos dispositivos de conmutación 35. Las señales individuales RU , RL , YU , YL , BU y BL se calculan por el uso de la magnitud de tensión total $V_NET^* = \sqrt{VQ_NET^{*2} + VD_NET^{*2}}$, la suma de los ángulos $\Theta_{NET} = \text{ARCTAN}(VD_NET^* / VQ_NET^*)$ y Θ_{MAIN} , que es una medida del ángulo de tensión de red, y la frecuencia de modulación de ancho de pulso, que, por ejemplo, se generada por un generador de ondas triangulares.

La ganancia de bucle abierto del dispositivo de controlador de corriente 43 puede calcularse como el producto de la ganancia de bucle abierto de controlador $C(s)$ y la admitancia de la red eléctrica $Y(s)$ a la que está conectada la salida del inversor 37. En la figura 5 se muestra un circuito equivalente esquemático para una turbina conectada a un cable colector 15. Cuando se ve desde la salida del inversor, la capacitancia 63 del cable colector 15 junto con el reactor de línea de entrada 19 y el transformador 21 forman un circuito de resonancia en serie rodeado por la línea discontinua en la figura 5. Este circuito de resonancia en serie tiene un mínimo de impedancia a frecuencia sintonizada, lo que resulta en una alta admitancia $Y(s)$ de la red eléctrica. Obsérvese que, aunque solo se muestra una turbina eólica 1 en la figura 5 que está conectada al cable colector 15, la sección del circuito equivalente que representa la turbina debe escalarse por el número de turbinas conectadas al cable colector 15. Además, si se presenta más de un cable colector, todo el circuito resonante puede escalarse por el número de cables colectores con el número respectivo de turbinas conectadas a cada cable colector. Esto da como resultado una representación razonable de la admitancia del sistema.

La ganancia de bucle de control de bucle abierto que resulta de tres configuraciones diferentes se muestra en la figura 6. La parte superior de la figura 6 muestra la magnitud de la ganancia de bucle de control de bucle abierto y la parte inferior muestra el retraso de fase entre el muestreo de la retroalimentación de corriente y/o la retroalimentación de tensión y la realización de una tensión con el que controlar la corriente con (normalmente) la frecuencia de la forma de onda de tensión de red. Este retraso provoca una característica de fase que tiene un retraso de fase creciente a medida que aumenta la frecuencia.

Un sistema de control se define para ser inestable si la magnitud de la ganancia de bucle de control de bucle abierto es mayor que uno cuando el retraso de fase de la ganancia de bucle abierto es menor o igual que menos de 180° . La figura muestra tres escenarios diferentes, a saber, un primer escenario (I) en el que un cable colector está presente con una a nueve turbinas eólicas conectadas al cable, un segundo escenario (II) con dos cables colectores y una a nueve turbinas eólicas conectadas a cada cable conector y un tercer escenario (III) con tres cables colectores y una a nueve turbinas eólicas conectadas a cada cable colector. Como puede verse en la figura 6, en función del número de turbinas eólicas y/o cables colectores, existen condiciones en las que la ganancia de bucle abierto es mayor que uno y el retraso de fase es menor que -180 grados y, por lo tanto, son inestables.

Para evitar las inestabilidades mencionadas en los sistemas de control de las turbinas eólicas cada controlador de corriente comprende un primer filtro de muesca 65 y un segundo filtro de muesca 67 (véase la figura 4). El primer filtro de muesca 65 se localiza entre la entrada de retroalimentación de corriente de eje de cuadratura y el primer restador 45, el segundo filtro de muesca 67 se localiza entre la entrada de señal de retroalimentación de corriente de eje directo y el segundo restador 49. Los filtros de muesca 65, 67 tienen cada uno de los mismos una frecuencia central y un ancho de banda que se eligen de acuerdo con la configuración del parque eólico de tal manera que se suprimen aquellas frecuencias que conducen a una magnitud de la ganancia de bucle de control de bucle abierto mayor que uno, mientras que el retraso de fase es menor o igual que menos de 180° . Por ejemplo, en el caso de la configuración III, la frecuencia central podría ser de aproximadamente 500 Hz con un ancho de banda de al menos 100 Hz. En el caso de la configuración I, la frecuencia central podría ser de unos 750 Hz con un ancho de banda de al menos 50 Hz. La magnitud resultante y el retraso de fase de la ganancia de bucle de control de bucle abierto se muestran en la figura 8, que muestra $C(s)$ $Y(s)$ la ganancia de bucle abierto completa del sistema. Puede verse que se eliminan las inestabilidades de los sistemas de control. En particular, la magnitud de la ganancia de control de bucle abierto está muy por debajo de la unidad en todo el intervalo de frecuencia. La figura 7 muestra $C(s)$ con el filtro de muesca en la retroalimentación de corriente. El filtro de muesca de banda ancha también hace que esta técnica sea robusta a los cambios en, por ejemplo, el número de turbinas, el nivel de fallo de red y la frecuencia de resonancia. La identificación del factor Q del filtro de muesca necesario puede determinarse a partir de la representación en el dominio de frecuencia del sistema colector de parque eólico y los componentes eléctricos internos de la turbina.

Hasta ahora, se ha considerado la capacitancia de cable en el lado de media tensión de la subestación 23 (véase la figura 1). Sin embargo, con parques eólicos más grandes, el lado de alta tensión de la subestación, que en general se denomina como red en la figura 1, también podría conducir a resonancias que comprometen la estabilidad y/o los márgenes de estabilidad de los sistemas de control de turbina eólica debido a la creación de una segunda resonancia en serie. La admitancia del sistema eléctrico de un parque eólico de este tipo con una capacitancia de cable de alta tensión significativa podría conducir a altas ganancias que existirían cerca de 150 Hz y 600 Hz, ambas o cualquiera de las cuales podría crear inestabilidades en los sistemas de control de turbina eólica. Por lo tanto, uno o más filtros de muesca adicionales (69, 71) podrían estar presentes para suprimir las frecuencias respectivas. Estos filtros de muesca tendrían, por ejemplo, frecuencias centrales de aproximadamente 150 Hz y/o 600 Hz y un ancho de banda respectivo de al menos 50 Hz. Como alternativa, podría usarse un único filtro de muesca para cada entrada de retroalimentación de corriente que tenga una cierta frecuencia central y un ancho de banda lo suficientemente grande como para cubrir el intervalo de frecuencia entre aproximadamente 100 y al menos 800 Hz.

Con respecto a la figura 4, un dispositivo de controlador de corriente se ha descrito que usa dos señales de demanda de corriente IQ_NET^* , ID_NET^* para controlar el inversor. Sin embargo, también pueden usarse dispositivos de controlador de corriente que usen cuatro señales de demanda de corriente para calcular las señales de demanda de tensión. Esos dispositivos de controlador de corriente permiten el control desacoplado de tanto los componentes de secuencia positiva como negativa de la corriente de inversor conectado a la red, esto a su vez ofrece una capacidad superior de conducción de fallos, específicamente para condiciones de fallo no equilibradas.

Un controlador que usa cuatro señales de demanda de corriente se muestra esquemáticamente en la figura 9. Este controlador se basa en una representación de fases que representa las corrientes trifásicas como números complejos de la forma $I/2e^{j(\omega t + \varphi)} + I/2e^{-j(\omega t + \varphi)}$. El primer sumando de la suma puede representarse por una parte de eje directo y una parte de eje de cuadratura en un marco de referencia que rota con la frecuencia y en el mismo sentido que el vector de flujo, mientras que la segunda parte de la suma puede representarse por una parte de eje directo y una parte de eje de cuadratura que rota con la misma frecuencia que el vector de flujo pero en el sentido opuesto. Por lo tanto, las señales de demanda de corriente pueden representarse por una señal de demanda de corriente de eje de cuadratura positiva (rotación) $IQ_NET^*_P$, una señal de demanda de corriente de eje directo positiva (rotación) $ID_NET^*_P$, una señal de demanda de corriente de eje de cuadratura negativa (rotación) $IQ_NET^*_N$ y una señal de demanda de corriente de eje directo negativa (rotación) $ID_NET^*_N$. Se proporcionan unas secciones de dispositivo de controlador de corriente individuales 430A, 430B para controlar las cantidades en el marco rotatorio positivo y para controlar las cantidades en el marco rotatorio negativo. Cada una de las secciones de controlador 430A, 430B corresponde en su estructura al dispositivo de controlador de corriente 43 mostrado en la figura 4. Sin embargo, cuando ambas secciones del dispositivo de controlador de corriente 430A, 430B se usan juntas, ambas deben tener un filtro de muesca sintonizado al doble de la frecuencia fundamental ($2 \times f_0$) para rechazar los componentes de secuencia +ve y -ve de la tensión de corriente de frecuencia fundamental. El filtro de muesca que es el objeto de esta solicitud de patente es un filtro de muesca adicional en serie con esta muesca de $2 \times f_0$.

La primera sección de dispositivo de controlador de corriente 430A emite las señales de demanda de tensión del marco positivamente rotatorio $VQ_NET^*_P$ y $VD_NET^*_P$, y la segunda sección de dispositivo de controlador de corriente 430B emite las señales de demanda de tensión del marco negativamente rotatorio $VQ_NET^*_N$ y $VD_NET^*_N$. Las señales de demanda de tensión del marco negativamente rotatorio $VQ_NET^*_N$ y $VD_NET^*_N$ se nivelan a las señales de demanda de tensión del marco positivamente rotatorio $VQ_NET^*_P$ y $VD_NET^*_P$ mediante una unidad de nivelación 431 y a continuación las respectivas señales de demanda de tensión de eje de cuadratura positiva y negativa niveladas se suman para formar la señal de demanda de tensión de eje de cuadratura

final VQ_NET* que a continuación se emite al generador de modulación de ancho de pulso 39. De la misma manera, las señales de demanda de tensión de eje directo positivo y negativo se suman para formar la señal de demanda de tensión de eje directo final VD_NET* que a continuación se emite al generador de modulación de ancho de pulso 39.

5 Lo que se ha descrito con respecto al dispositivo de controlador de corriente 43 se aplica también a cada una de las secciones de dispositivo de controlador de corriente 430A, 430B del dispositivo de controlador de corriente 430 mostrado en la figura 9. Por lo tanto, estas secciones no se describen con más detalle con el fin de evitar repeticiones.

10 La presente invención, que se ha descrito con respecto a unas realizaciones a modo de ejemplo de la invención, se basa en el reconocimiento de que las altas admitancias del sistema pueden actuar de una manera para hacer inestables los algoritmos de control de inversor convencionales. De acuerdo con la invención, los filtros de muesca usados actúan para estabilizar tales sistemas.

Aunque el uso de filtros de muesca en la retroalimentación de corriente se ha descrito en el contexto de un esquema de modulación de ancho de pulso de frecuencia de conmutación fija, la presente invención puede, en general, también ser beneficiosa en el contexto de los sistemas de frecuencia de conmutación variable.

15 Además, aunque las realizaciones descritas de la invención se refieren a las redes de las turbinas eólicas de la invención también puede aplicarse a otros tipos de generación distribuida, o interconexión, sistemas eléctricos, tales como máquinas de potencia de onda, paneles solares, HVCC y cualquier aplicación donde haya convertidores de potencia y capacitancias en un sistema colector. Si el equipo de generación de energía eléctrica genera potencia de CC en lugar de potencia de CA, los convertidores de potencia solo comprenden los inversores, ya que no es
20 necesaria una rectificación activa.

Por otra parte, se ha usado un nivel de tensión positiva como nivel de alta tensión y se ha usado un nivel de tensión negativo como nivel de baja tensión del enlace de CC a lo largo de la descripción de las realizaciones. Sin embargo, los niveles de alta y baja tensión pueden, en general, realizarse como una de las siguientes tres opciones:

- 25
1. el nivel de alta tensión es positivo y el nivel de baja tensión también es positivo pero menos positivo que el nivel de alta tensión;
 2. el nivel de alta tensión es positivo y el nivel de baja tensión es negativo; y
 3. el nivel de alta tensión es negativo y el nivel de baja tensión también es negativo pero más negativo que el nivel de alta tensión.

30 La invención que se ha descrito con respecto a las figuras a modo de ilustración de las realizaciones específicas no solo puede aplicarse en el caso del flujo de potencia presente en las realizaciones, en las que la potencia fluye desde un generador a una red, sino también en los casos en los que se invierte el flujo de potencia, por ejemplo, en el caso de estaciones de carga para vehículos eléctricos o esquemas HVCC que se suministran desde sistemas eléctricos que pueden contener resonancias.

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo de controlador de corriente (43, 430) que usa un algoritmo de control vectorial para controlar la conversión de potencia de CC en potencia de CA y/o viceversa por un convertidor (27), teniendo el dispositivo de controlador una ganancia de bucle de control de bucle abierto y comprendiendo:

- 5 - una primera entrada de demanda de corriente para recibir una primera señal de demanda de corriente (IQ_NET*);
- al menos una segunda entrada de demanda de corriente para recibir una segunda señal de demanda de corriente (ID_NET*);
- una primera entrada de retroalimentación de corriente para recibir una primera señal de retroalimentación de corriente (IQ_NET) que representa una corriente de CA de la potencia de CA;
- 10 - una segunda entrada de retroalimentación de corriente para recibir una segunda señal de retroalimentación de corriente (ID_NET) que representa una corriente de CA de la potencia de CA;
- una primera entrada de retroalimentación de tensión para recibir una primera señal de retroalimentación de tensión (VQ_NET) que representa una tensión de CA de la potencia de CA;
- 15 - una segunda entrada de retroalimentación de tensión para recibir una segunda señal de retroalimentación de tensión (VD_NET) que representa una tensión de CA de la potencia de CA;
- una primera salida de demanda de tensión para emitir una primera señal de demanda de tensión (VQ_NET*);
- una segunda salida de demanda de tensión para emitir una segunda señal de demanda de tensión (VD_NET*);
- y
- 20 - un controlador para producir dicha primera señal de demanda de tensión (VQ_NET*) y dicha segunda señal de demanda de tensión (VD_NET*) sobre la base de dicha primera señal de demanda de corriente (IQ_NET*), dicha segunda señal de demanda de corriente (ID_NET*), dicha primera retroalimentación de corriente (IQ_NET), dicha segunda retroalimentación de corriente (ID_NET), dicha primera retroalimentación de tensión (VQ_NET) y dicha segunda retroalimentación de tensión (VD_NET),

25 donde la ganancia de bucle de control de bucle abierto depende de las frecuencias contenidas en las señales de retroalimentación de corriente primera y segunda (IQ_NET, ID_NET),

caracterizado por que

se proporciona un primer filtro (65) en la primera entrada de retroalimentación de corriente y se proporciona un segundo filtro (67) en la segunda entrada de retroalimentación de corriente, filtros primero y segundo (65, 67) que

30 tienen cada uno de los mismos unas características de filtro elegidas tal como para reducir las frecuencias de las señales de retroalimentación de corriente primera y segunda (IQ_NET, ID_NET) en las que la ganancia de bucle de control de bucle abierto dependiente de la frecuencia llegaría a ser mayor que la unidad y tendría una fase menor o igual que menos de 180°.

2. El dispositivo de controlador de corriente (43, 430) de acuerdo con la reivindicación 1,

35 **caracterizado por que**

dichos filtros primero y segundo (65, 67) son unos filtros de parada de banda, teniendo cada uno de los mismos una frecuencia central y un ancho de banda elegido tal como para reducir las frecuencias de las señales de retroalimentación de corriente primera y segunda (IQ_NET, ID_NET) en las que la ganancia de bucle de control de bucle abierto dependiente de la frecuencia llegaría a ser mayor que la unidad y tendría una fase menor o igual que

40 menos de 180°.

3. El dispositivo de controlador de corriente (43, 430) de acuerdo con la reivindicación 2,

caracterizado por que

los filtros de parada de banda primero y segundo (65, 67) tienen cada uno de los mismos una frecuencia central por encima de 150 Hz.

4. El dispositivo de controlador de corriente (43, 430) de acuerdo con la reivindicación 3,

45 **caracterizado por que**

los filtros de parada de banda primero y segundo (65, 67) tienen cada uno de los mismos una frecuencia central por encima de 400 Hz.

5. El dispositivo de controlador de corriente (43, 430) de acuerdo con la reivindicación 4,

50 **caracterizado por que**

los filtros de parada de banda primero y segundo (65, 67) tienen cada uno de los mismos una frecuencia central por encima de 600 Hz.

6. El dispositivo de controlador de corriente (43, 430) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5,

caracterizado por que

55 los filtros de parada de banda primero y segundo (65, 67) tienen cada uno de los mismos un ancho de banda de al menos 50 Hz.

7. El dispositivo de controlador de corriente (43, 430) de acuerdo con la reivindicación 6,

caracterizado por que

los filtros de parada de banda primero y segundo (65, 67) tienen cada uno de los mismos un ancho de banda de al menos 200 Hz

5 8. El dispositivo de controlador de corriente (43, 430) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 2 a 7,

caracterizado por que

se proporciona al menos un tercer filtro de parada de banda (69) entre la primera entrada de retroalimentación de corriente y el primer filtro de parada de banda y se proporciona al menos un cuarto filtro de parada de banda (71) entre la segunda entrada de retroalimentación de corriente y el segundo filtro de parada de banda, filtros de parada de banda tercero y cuarto que tienen cada uno de los mismos una frecuencia central por encima de 150 Hz y/o un ancho de banda de al menos 50 Hz.

9. El dispositivo de controlador de corriente (43, 430) de acuerdo con la reivindicación 8,

caracterizado por que

los filtros de parada de banda tercero y cuarto (69, 71) tienen cada uno de los mismos una frecuencia central de al menos 100 Hz por encima o por debajo de la frecuencia central de los filtros de parada de banda primero y segundo (65, 67).

10. El dispositivo de controlador de corriente (43, 430) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9,

caracterizado por que el controlador (43, 430) comprende:

- un primer restador (45) conectado a la primera entrada de señal de demanda de corriente y a la primera entrada de retroalimentación de corriente, estando el primer restador (45) adaptado para formar una primera señal de error (EQ) que representa la diferencia entre la primera señal de demanda de corriente (IQ_NET*) y la primera señal de retroalimentación de corriente (IQ_NET);

- al menos un segundo restador (49) conectado a la segunda entrada de señal de demanda de corriente y a la segunda entrada de retroalimentación de corriente, estando el segundo restador (49) adaptado para formar una segunda señal de error (ED) que representa la diferencia entre la segunda señal de demanda de corriente (ID_NET*) y la segunda señal de retroalimentación de corriente (ID_NET);

- una primera unidad de control (47) conectada al primer restador (45) para recibir la primera señal de error (EQ) y que está adaptada para producir una primera señal de control (C1) basándose en la primera señal de error (EQ);

- al menos una segunda unidad de control (51) conectada al segundo restador (49) para recibir la segunda señal de error (ED) y que está adaptada para producir una segunda señal de control (C2) basándose en la segunda señal de error (ED);

- un primer multiplicador (53) conectado a la primera entrada de señal de demanda de corriente y que está adaptado para producir una tercera señal de control (C3) multiplicando la primera señal de demanda de corriente (IQ_NET*) por al menos una frecuencia fundamental (WN) y un valor de inductancia (L);

- al menos un segundo multiplicador (57) conectado a la segunda entrada de señal de demanda de corriente y que está adaptado para producir una cuarta señal de control (C4) multiplicando la segunda señal de demanda de corriente (ID_NET*) por al menos una frecuencia fundamental (WN) y un valor de inductancia (L);

- una disposición de sumador (59) conectada a la primera unidad de control (47), al segundo multiplicador (57), a la primera entrada de retroalimentación de tensión y a la primera salida de demanda de tensión, estando la disposición de sumador (59) adaptada para producir la primera señal de demanda de tensión (VQ_NET*) sumando la primera señal de control (C1), la cuarta señal de control y la primera señal de retroalimentación de tensión (VQ_NET);

- en una disposición de sumador/restador (61) conectada a la segunda unidad de control (51), al primer multiplicador (53), a la segunda entrada de retroalimentación de tensión y a la segunda salida de demanda de tensión, estando la disposición de sumador/restador (61) adaptada para producir la segunda señal de demanda de tensión (VD_NET*) restando la tercera señal de control (C3) de la segunda señal de retroalimentación de tensión (VD_NET) y sumando la segunda señal de control (C2); y **por que**

- el primer filtro (65) está localizado entre la primera entrada de retroalimentación de corriente y el primer restador (45); y

- el segundo filtro (67) está localizado entre la segunda entrada de retroalimentación de corriente y el segundo restador (49).

11. Un convertidor de potencia (13) para convertir la potencia de CC en potencia de CA o viceversa y un dispositivo de controlador de corriente (43, 430) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10 para controlar la conversión de la potencia de CC a la potencia de CA o viceversa.

12. El convertidor de potencia (13) de acuerdo con la reivindicación 11,

caracterizado por que

comprende un rectificador (25) para convertir una potencia de CA a potencia de CC y un inversor para convertir la potencia de CC en potencia de CA.

13. Un equipo de generación de energía eléctrica (1)

caracterizado por que

incluye un convertidor de potencia (13) de acuerdo con la reivindicación 11 o la reivindicación 12.

14. El equipo de generación de energía eléctrica (1) de acuerdo con la reivindicación 13,

caracterizado por que

comprende un generador eléctrico (11) que genera potencia de CA y un convertidor de potencia (13) de acuerdo con la reivindicación 12.

15. El equipo de generación de energía eléctrica de acuerdo con la reivindicación 14,

caracterizado por que

es una turbina eólica (1).

16. Una instalación de generación de energía eléctrica que comprende:

- una pluralidad de equipos de generación de energía eléctrica (1), estando cada uno equipado con un transformador (21), un reactor (19) y un convertidor de potencia (13) que incluye un inversor (27) para convertir potencia de CC en potencia de CA y un dispositivo de controlador de corriente (43, 430) para controlar la salida de potencia de CA por el inversor (27), y
- una red (15) a la que están conectados los equipos de generación de energía eléctrica (1) y que tiene una capacitancia de red; en la que
- al menos los reactores (19) de los equipos de generación de energía eléctrica (1), los transformadores (21) y la capacitancia de red forman un circuito resonante, cuya frecuencia sintonizada da como resultado una alta admitancia que hace que la ganancia de bucle de control de bucle abierto de los dispositivos de controlador de corriente llegue a ser mayor que la unidad y tenga unas fases menores o iguales que menos de 180°,

caracterizada por que

los dispositivos de controlador de corriente son unos dispositivos de controlador de corriente (43, 430) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10.

17. La instalación de generación de energía eléctrica de acuerdo con la reivindicación 16,

caracterizada por que

la red comprende al menos un cable colector (15) que conecta al menos un subconjunto de dicha pluralidad de equipos de generación de energía eléctrica (1) a un equipo central (23) de la instalación de generación de energía y que tiene una capacitancia de cable, donde la capacitancia de red se proporciona sustancialmente por la capacitancia de cable del al menos un cable colector (15).

18. La instalación de generación de energía eléctrica de acuerdo con la reivindicación 16 o la reivindicación 17,

caracterizada por que

cada equipo de generación de energía eléctrica (1) comprende un generador eléctrico (11) que genera potencia de CA y el convertidor de potencia comprende además un rectificador (25) para convertir dicha potencia de CA en dicha potencia de CC.

19. Un método de control vectorial para controlar un convertidor (27) que convierte potencia de CC en potencia de CA o viceversa, en el que

- la potencia de CA se emite a o recibe desde una red (15),
- una primera señal de demanda de tensión (VQ_NET*) y una segunda señal de demanda de tensión (VD_NET*) se calculan sobre la base de una primera señal de demanda de corriente (IQ_NET*), una segunda señal de demanda de corriente (ID_NET*), una primera retroalimentación de corriente (IQ_NET), una segunda retroalimentación de corriente (ID_NET), una primera retroalimentación de tensión (VQ_NET) y una segunda retroalimentación de tensión (VD_NET), y
- la ganancia de bucle de control de bucle abierto depende de las frecuencias contenidas en las señales de retroalimentación de corriente primera y segunda (IQ_NET, ID_NET),

caracterizado por que

- se suprimen estas frecuencias de las señales de retroalimentación de corriente primera y segunda (IQ_NET, ID_NET) en las que la ganancia de bucle de control de bucle abierto sería mayor que la unidad y tendrían una fase menor o igual que menos de 180°.

20. El método de control vectorial de acuerdo con la reivindicación 19, **caracterizado por que** en cada uno de una pluralidad de equipos de generación de energía eléctrica (1)

- un inversor convierte la potencia de CC en potencia de CA
- la potencia de CA se emite a una red (15) que conecta al menos un subconjunto de dicha pluralidad de equipos de generación de energía eléctrica (1)
- cada uno de dicha pluralidad de equipos de generación de energía eléctrica (1) comprende un reactor (19) y un transformador (21),
- la red (15) tiene una capacitancia de red, y
- las frecuencias de las señales de retroalimentación de corriente primera y segunda (IQ_NET, ID_NET) en las que la ganancia de bucle de control de bucle abierto sería mayor que la unidad y tendría una fase menor o igual que menos de 180° se determinan a partir de los parámetros de los reactores (19), los transformadores (21), la capacitancia de red y la impedancia de red.

21. El método de control vectorial de acuerdo con la reivindicación 20,

caracterizado por que

la red comprende al menos un cable colector (15) que conecta al menos un subconjunto de dicha pluralidad de equipos de generación de energía eléctrica (1) a un equipo central (23) y la capacitancia de red se proporciona sustancialmente por la capacitancia del al menos un cable colector (15).

22. El método de control vectorial de acuerdo con la reivindicación 21,

caracterizado por que

- una admitancia vista desde la salida del inversor (27) se determina a partir de los parámetros de los reactores (19), los transformadores (21) y la capacitancia de cable,
- la ganancia de control de bucle abierto se calcula a partir del producto de la ganancia de bucle abierto C(s) del método de control vectorial y la admitancia determinada Y(s), y
- las frecuencias a las que la ganancia de bucle de control de bucle abierto calculada es mayor que la unidad y en la que su fase es menor o igual que menos de 180° se determinan a partir del resultado del cálculo.

23. El método de control vectorial de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 19 a 22,

en el que cada uno de dichos equipos de generación de energía eléctrica se genera una potencia de CA y la potencia de CA se convierte en dicha potencia de CC.

FIG 1

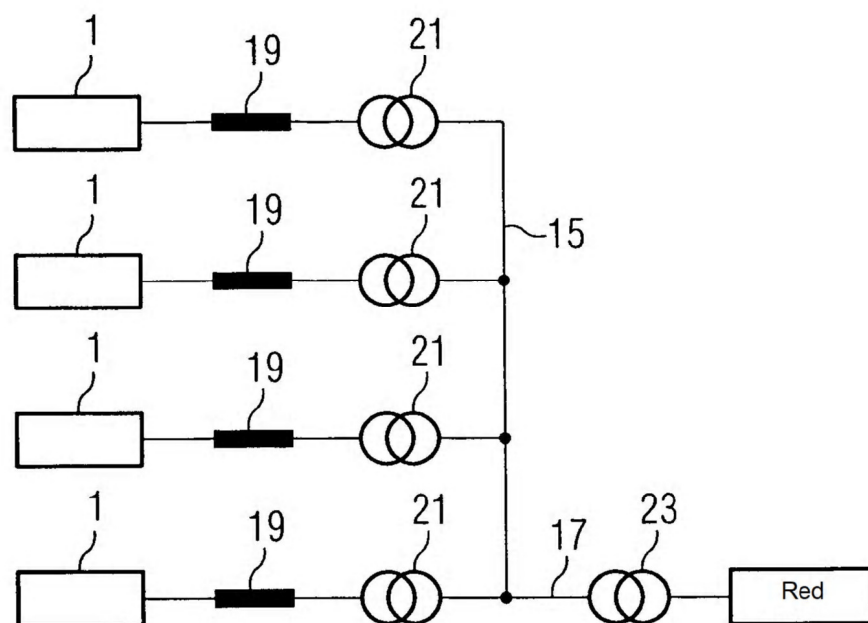


FIG 2

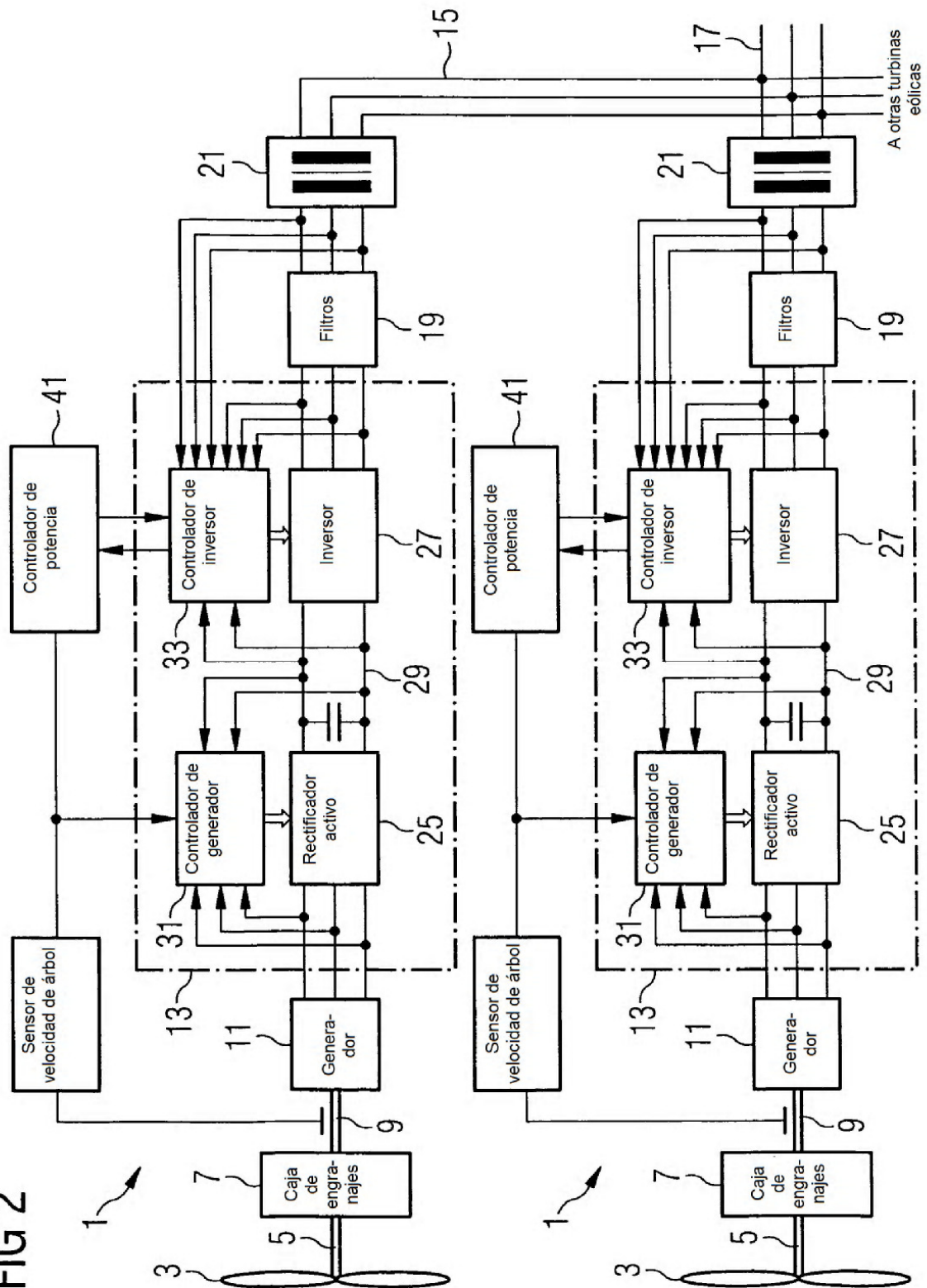


FIG 3

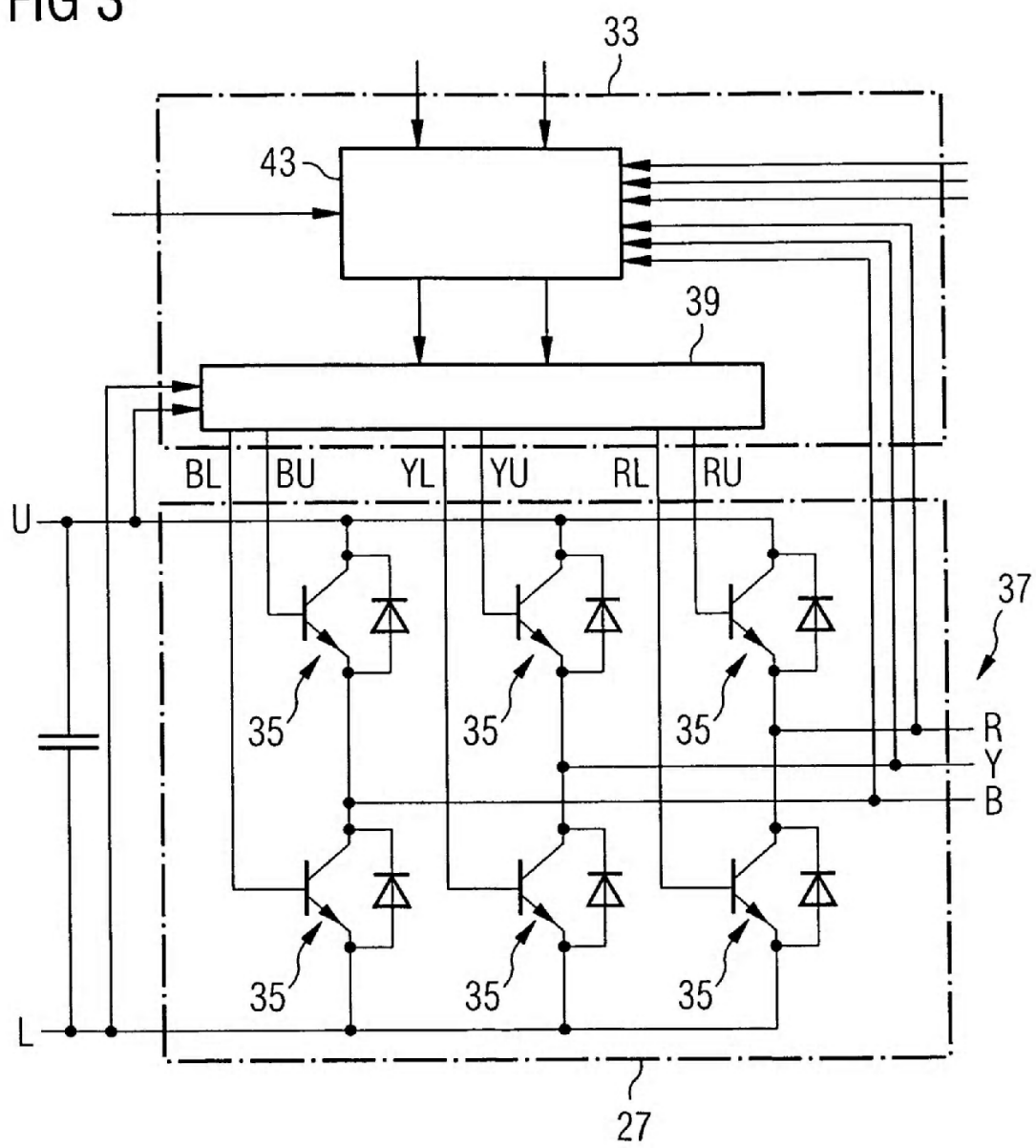


FIG 4

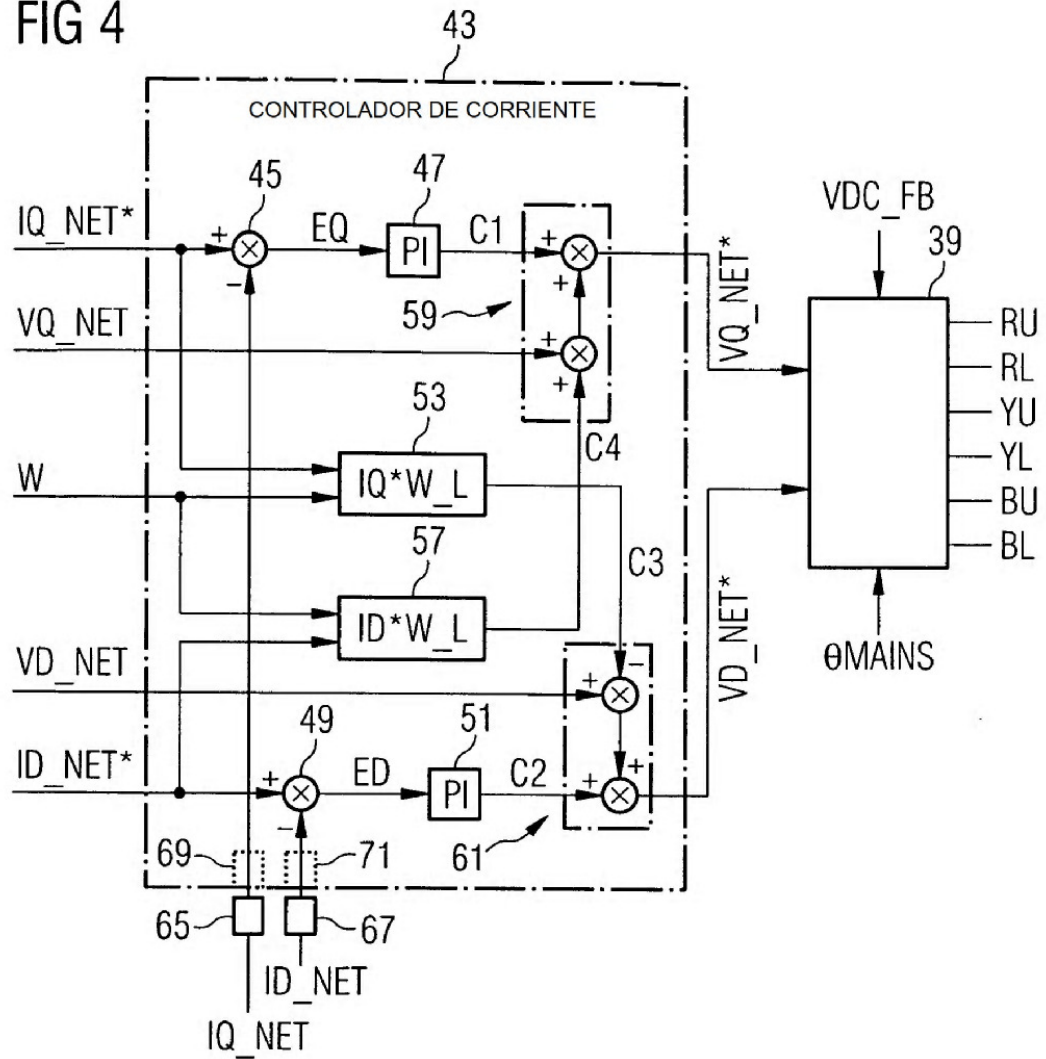


FIG 5

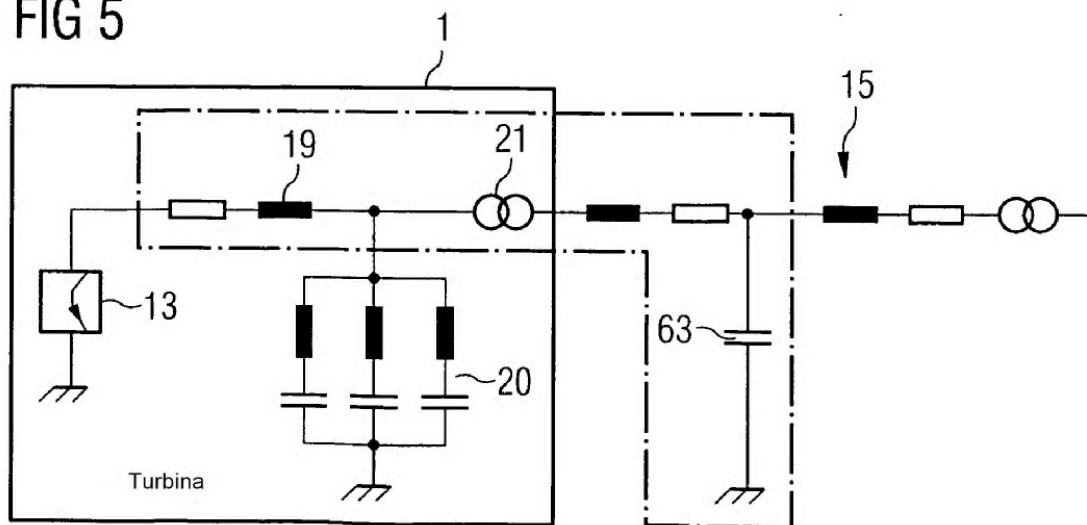


FIG 6

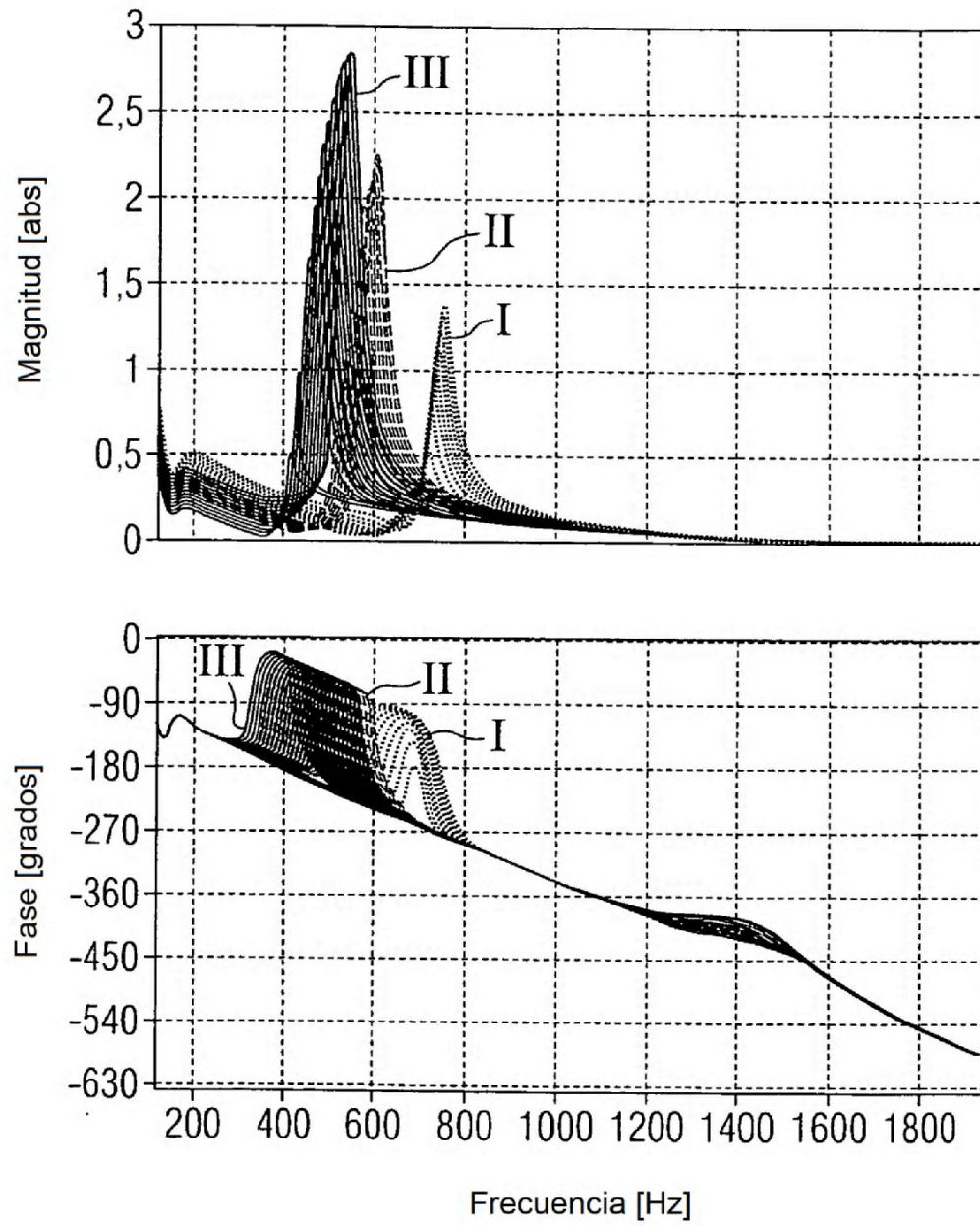


FIG 7

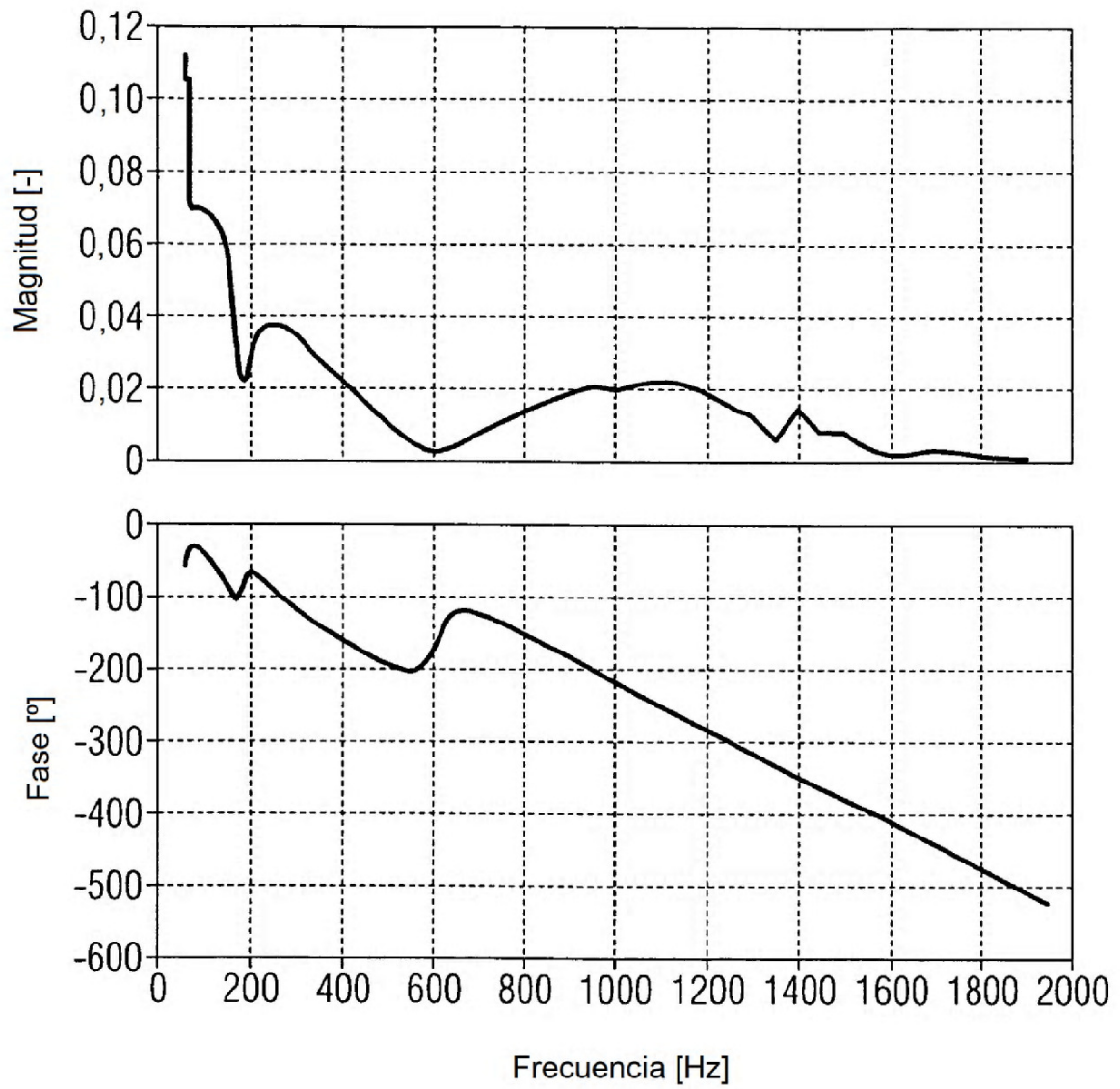


FIG 8

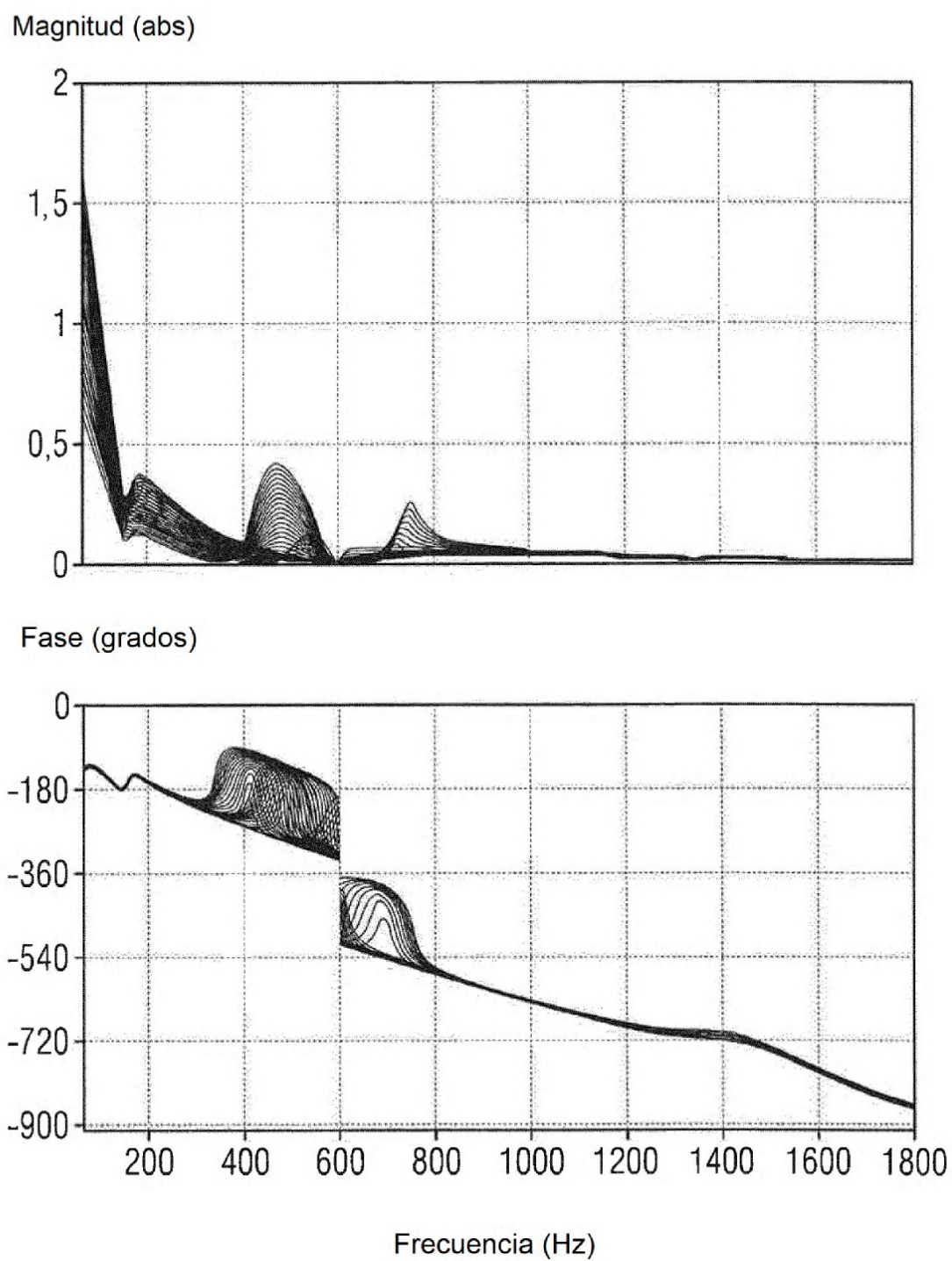


FIG 9

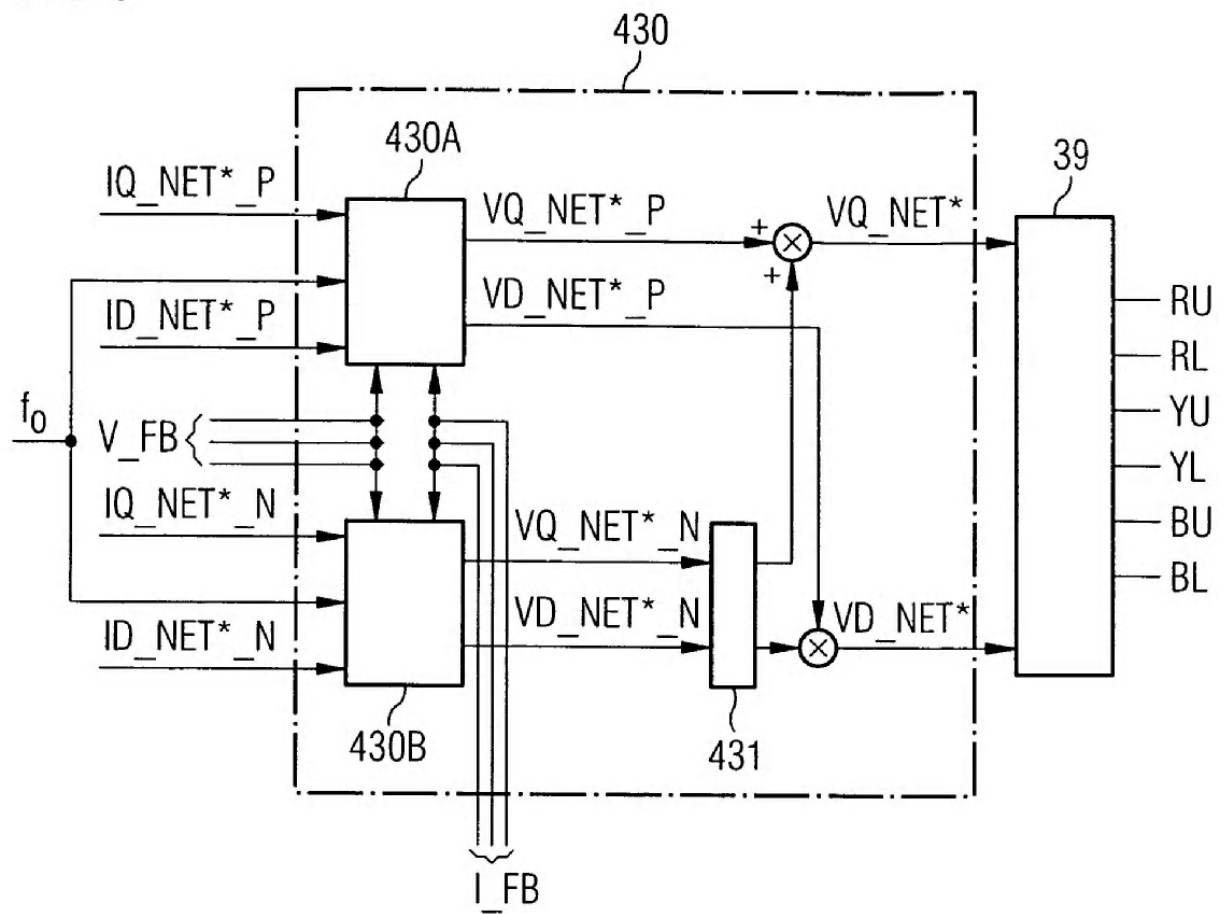


FIG 10

