

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 613 734**

51 Int. Cl.:

H02J 3/38 (2006.01)

F03D 9/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **23.03.2011 PCT/DK2011/050095**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **06.10.2011 WO2011120523**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.03.2011 E 11713172 (2)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.12.2016 EP 2553788**

54 Título: **Método de funcionamiento de una turbina eólica, turbina eólica, sistema de control de turbina eólica y sistema de procesamiento**

30 Prioridad:

31.03.2010 US 319305 P
31.03.2010 DK 201000272

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
25.05.2017

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)
Hedeager 42
8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

LI, BING;
TRIPATHI, ANSHUMAN;
CAO, SHU, YU;
GUPTA, AMIT, KUMAR;
SNG, ENG, KIAN, KENNETH y
HELLE, LARS

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 613 734 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

Método de funcionamiento de una turbina eólica, turbina eólica, sistema de control de turbina eólica y sistema de procesamiento

5 La presente invención se refiere en general a un método de funcionamiento de una turbina eólica, a una turbina eólica, a un sistema de control de turbina eólica y a un sistema de procesamiento que puede utilizarse para el funcionamiento de una turbina eólica.

10 Con el rápido aumento de grandes parques eólicos en alta mar, ha surgido un nuevo problema asociado con la respuesta de turbinas eólicas a sobretensiones temporales: la mayoría de las turbinas eólicas utilizan convertidores de fuente de tensión con un enlace de CC. Cuando la tensión de red eléctrica supera un cierto límite de tensión, el flujo de corriente a través del convertidor de lado de línea de la turbina eólica puede invertirse, dando como resultado un rápido aumento de la tensión de enlace de CC.

15 Una posibilidad de manejar tales situaciones es interrumpir la conexión entre la turbina eólica y la red eléctrica. Sin embargo, es deseable mantener las turbinas eólicas conectadas a la red eléctrica incluso en tales circunstancias. Por tanto, actualmente están investigándose diferentes enfoques que permitan mantener las turbinas eólicas conectadas a la red eléctrica durante sobretensiones temporales, mientras que al mismo tiempo se evite un rápido aumento de tensiones de enlace de CC.

20 El documento US 2007/121354 A1 describe un convertidor de potencia que puede utilizarse para interconectar un generador que proporciona tensión variable a frecuencia variable y una red de suministro que funciona a tensión fijada nominalmente y frecuencia fijada nominalmente y que incluye características que permiten al convertidor de potencia permanecer conectado a la red de suministro y conservar el control durante fallo de red de suministro y condiciones transitorias. El convertidor de potencia incluye un puente de generador conectado eléctricamente al estator del generador y un puente de red. Un enlace de CC está conectado entre el puente de generador y el puente de red. Un filtro que tiene terminales de red está conectado entre el puente de red y la red de suministro. Se proporciona un primer controlador para controlar el funcionamiento de los dispositivos de conmutación de potencia de semiconductor del puente de generador. De manera similar, se proporciona un segundo controlador para controlar el funcionamiento de los dispositivos de conmutación de potencia de semiconductor del puente de red. El primer controlador utiliza una señal de demanda de tensión de enlace de CC ($VDC_{13} GEN^*$) indicativa de una tensión de enlace de CC deseado para controlar los dispositivos de conmutación de potencia de semiconductor del puente de red para lograr el nivel deseado de tensión de enlace de CC que corresponde a la señal de demanda de tensión de enlace de CC ($VDC_{13} GEN^*$). El segundo controlador utiliza una señal de demanda de potencia (P^*) indicativa del nivel de potencia que va a transferirse desde el enlace de CC a la red de suministro a través del puente de red, y una señal de demanda de tensión ($VTURB^*$) indicativa de la tensión que va a lograrse en los terminales de red del filtro para controlar los dispositivos de conmutación de potencia de semiconductor del puente de red para lograr los niveles deseados de potencia y tensión que corresponden a las señales de demanda de potencia y de tensión (P^* y $VTURB^*$).

Descripción de la invención

40 Según una realización, se proporciona un método de funcionamiento de una turbina eólica que comprende un convertidor de tensión de CC a CA, pudiendo conectarse la turbina eólica a una red eléctrica mediante el convertidor de tensión de CC a CA, comprendiendo el método: determinar una tensión de línea de una línea de potencia conectada entre el convertidor de tensión de CC a CA y la red eléctrica; si la tensión de línea determinada supera un valor umbral de tensión de red eléctrica particular, inyectar corriente reactiva en la línea de potencia, eligiéndose la cantidad de corriente reactiva inyectada de manera que se mantiene una tensión de salida del convertidor de tensión de CC a CA dentro de un intervalo de tensión predeterminado.

Según un ejemplo, la tensión de línea se determina utilizando un algoritmo de bucle de bloqueo de fase.

45 Según un ejemplo, una referencia de corriente reactiva se calcula basándose en una tensión de salida máxima del convertidor de tensión de CC a CA, la tensión de línea y una referencia de corriente activa.

Según un ejemplo, la referencia de corriente activa se deriva a partir de una salida de controlador de enlace de CC.

Según un ejemplo, la referencia de corriente reactiva se calcula según la siguiente fórmula:

$$I_R \leq (\sqrt{m^2 \cdot U_{max}^2 - (U_{GD} - \omega L \cdot I_A)^2} - U_{GQ}) / \omega L$$

50 donde U_{GD} , U_{GQ} son las tensiones de línea de la línea de potencia a lo largo del eje d/q en el sistema dq, e I_A , I_R son las corrientes activa y reactiva, m es el índice de modulación permitido máximo y U_{max} es la tensión de salida de convertidor permitido máximo \bar{U}_v . Además, L es la inductancia de un inductor (comúnmente conocido como "inductor de red eléctrica" o "estrangulador de red"), y ω es la frecuencia de tensión. I_R calculada en la ecuación anterior tiene un valor negativo. Por tanto, la corriente reactiva mínima puede elegirse (en términos de amplitud) si I_R está ajustada

igual al término derecho de la ecuación. Ya que una corriente máxima I_{max} está fijada, esto dejará más espacio para la inyección de corriente activa I_A . Por tanto, I_R debe ser preferiblemente igual al término derecho de la ecuación. Según un ejemplo, la referencia de corriente reactiva se convierte en una referencia de corriente reactiva optimizada si una amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor calculada a partir de la referencia de corriente activa y la referencia de corriente reactiva supera un valor umbral de amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor predeterminado.

Según un ejemplo, la referencia de corriente activa se convierte en una referencia de corriente activa optimizada si una amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor calculada a partir de la referencia de corriente activa y la referencia de corriente reactiva supera un valor umbral de amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor predeterminado.

Según un ejemplo, la amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor se determina según la siguiente fórmula:

$$I_{ref} = \sqrt{I_{r_ref_cal}^2 + I_{a_ref_cal}^2}$$

Según un ejemplo, la referencia de corriente activa/referencia de corriente reactiva optimizadas se calculan basándose en la siguiente fórmula:

$$\begin{cases} I_R = \left(\frac{m^2 \cdot U_{max}^2}{\omega^2 L^2} - I_{max}^2 \right) \cdot \frac{\omega L}{2 \cdot U_{GQ}} - \frac{U_{GQ}}{2 \cdot \omega L} \\ I_A = \sqrt{I_{max}^2 - I_R^2} \end{cases}$$

Según un ejemplo, la corriente de salida de convertidor se controla basándose en la referencia de corriente activa optimizada y la referencia de corriente reactiva optimizada. Es decir, la cantidad de corriente reactiva inyectada se controla basándose en la referencia de corriente reactiva optimizada, y la cantidad de corriente activa inyectada se controla basándose en la referencia de corriente activa optimizada. Un efecto de este ejemplo es que la tensión de salida de convertidor se mantiene dentro de U_{max} , y la corriente de salida de convertidor se mantiene dentro de I_{max} . Un efecto adicional de este ejemplo es que, al mismo tiempo, la potencia activa posible máxima puede inyectarse en la red eléctrica.

Según una realización, se proporciona un sistema de procesamiento que puede utilizarse para el funcionamiento de una turbina eólica que comprende un convertidor de tensión de CC a CA, pudiendo conectarse la turbina eólica a una red eléctrica mediante el convertidor de tensión de CC a CA, comprendiendo el sistema de procesamiento: una unidad de entrada configurada para recibir una señal de tensión de línea que indica la tensión de línea de una línea de potencia que conecta el convertidor de tensión de CC a CA con la red eléctrica; una unidad de procesamiento unida a la unidad de entrada, estando la unidad de procesamiento configurada para determinar si la tensión de línea supera un valor umbral de tensión de línea particular, y para determinar una cantidad de corriente reactiva que, si se inyecta directamente en la línea de potencia, mantiene una tensión de salida del convertidor de tensión de CC a CA dentro de un intervalo de tensión predeterminado; y una unidad de salida unida a la unidad de procesamiento, estando la unidad de salida configurada para emitir una señal indicativa de la corriente reactiva que va a inyectarse directamente en la línea de potencia.

Según un ejemplo, la unidad de entrada está configurada además para recibir una señal de referencia de corriente activa, en el que la unidad de procesamiento está configurada para calcular una referencia de corriente reactiva indicativa de la corriente reactiva que va a inyectarse basándose en una tensión de salida máxima del convertidor de tensión de CC a CA, la señal de tensión de línea y la señal de referencia de corriente activa, en el que la señal de salida emitida mediante la unidad de salida se deriva mediante la unidad de procesamiento a partir de la referencia de corriente reactiva.

Según un ejemplo, la unidad de procesamiento está configurada además para convertir la referencia de corriente reactiva en una referencia de corriente reactiva optimizada si una amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor calculada a partir de la referencia de corriente activa y la referencia de corriente reactiva supera un valor umbral de amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor predeterminado, en el que la señal de salida emitida mediante la unidad de salida se deriva mediante la unidad de procesamiento a partir de la referencia de corriente reactiva optimizada.

Según un ejemplo, la unidad de procesamiento está configurada para convertir la referencia de corriente activa en una referencia de corriente activa optimizada si una amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor calculada a partir de la referencia de corriente activa y la referencia de corriente reactiva supera un valor umbral de amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor predeterminada, en el que la señal de salida emitida

mediante la unidad de salida se deriva mediante la unidad de procesamiento a partir de la referencia de corriente activa optimizada.

5 Según un ejemplo, se proporciona un sistema de control de turbina eólica para controlar una turbina eólica que comprende un convertidor de tensión de CC a CA, estando la turbina eólica conectada a una red eléctrica mediante el convertidor de tensión de CC a CA, comprendiendo el sistema de control un sistema de procesamiento según uno cualquiera de los ejemplos descritos anteriormente.

10 Según un ejemplo, el sistema de control de turbina eólica comprende además una unidad de bucle de bloqueo de fase que está unida a la unidad de entrada del sistema de procesamiento, estando la unidad de bucle de bloqueo de fase configurada para determinar la señal de tensión de línea utilizando un algoritmo de bucle de bloqueo de fase, y para suministrarla a la unidad de entrada.

15 Según un ejemplo, el sistema de control de turbina eólica comprende además una unidad de controlador de enlace de CC unida a la unidad de entrada del sistema de procesamiento, en el que la unidad de controlador de enlace de CC está configurada para controlar una tensión de enlace de CC según un nivel de referencia de tensión de enlace de CC (la unidad de controlador de enlace de CC controla la tensión de enlace de CC de manera que siempre se mantiene en una tensión de referencia; el controlador de enlace de CC hace esto inyectando una corriente activa apropiada), y para emitir la señal de referencia de corriente activa que se suministra a la unidad de entrada.

20 Según un ejemplo, el sistema de control de turbina eólica comprende además una unidad de control de corriente de salida de convertidor unida a la unidad de salida del sistema de procesamiento, en el que la unidad de control de corriente de salida de convertidor está configurada para controlar la corriente de salida de convertidor basándose en la referencia de corriente activa y la referencia de corriente reactiva, o basándose en la referencia de corriente activa optimizada y la referencia de corriente reactiva optimizada.

Según un ejemplo, se proporciona una turbina eólica que comprende un sistema de control de turbina eólica según uno cualquiera de los ejemplos descritos anteriormente.

Breve descripción de los dibujos

25 En los dibujos, símbolos de referencia iguales se refieren en general a las mismas partes en todas las diferentes vistas. Los dibujos no están necesariamente a escala, haciéndose énfasis en general en cambiar en ilustrar los principios de la invención. En la siguiente descripción, se describen varias realizaciones de la invención con referencia a los siguientes dibujos, en los que:

la figura 1 muestra un dibujo esquemático de una turbina eólica según una realización de la presente invención;

30 la figura 2a muestra un dibujo esquemático de un sistema eléctrico que tiene una configuración de convertidor a escala completa;

la figura 2b muestra un dibujo esquemático de un sistema eléctrico que tiene una configuración de convertidor a escala completa según una realización de la presente invención;

35 la figura 3 muestra un diagrama de flujo de un método de funcionamiento de una turbina eólica según una realización de la presente invención;

la figura 4 muestra un diagrama de bloques esquemático de un sistema de procesamiento que puede utilizarse para el funcionamiento de una turbina eólica según una realización de la presente invención;

la figura 5 muestra un diagrama de bloques esquemático de un sistema de control que puede utilizarse para el funcionamiento de una turbina eólica según una realización de la presente invención;

40 la figura 6 muestra un diagrama de fasores esquemático que puede producirse cuando se lleva a cabo un método de funcionamiento de una turbina eólica según una realización de la presente invención;

la figura 7 muestra un diagrama de fasores esquemático que puede producirse cuando se lleva a cabo un método de funcionamiento de una turbina eólica según una realización de la presente invención;

45 la figura 8 muestra un diagrama de fasores esquemático que puede producirse cuando se lleva a cabo un método de funcionamiento de una turbina eólica según una realización de la presente invención;

la figura 9 muestra a diagrama de corriente esquemático que puede producirse cuando se lleva a cabo un método de funcionamiento de una turbina eólica según una realización de la presente invención;

la figura 10 muestra un diagrama de corriente esquemático que puede producirse cuando se lleva a cabo un método de funcionamiento de una turbina eólica según una realización de la presente invención;

la figura 11 muestra un diagrama de corriente esquemático que puede producirse cuando se lleva a cabo un método de funcionamiento de una turbina eólica según una realización de la presente invención;

la figura 12 muestra un ejemplo de la cantidad de corriente reactiva que se inyectará según se requiera mediante un código de red eléctrica en caso de un evento de baja tensión en la red eléctrica.

5 Descripción

La siguiente descripción detallada se refiere a los dibujos adjuntos que muestran, a modo de ilustración, detalles específicos y realizaciones en las que puede ponerse en práctica la invención. Estas realizaciones se describen en suficiente detalle para que los expertos en la técnica puedan poner en práctica la invención. Otras realizaciones pueden utilizarse y pueden realizarse cambios eléctricos, lógicos y estructurales sin apartarse del alcance de la invención. Las diversas realizaciones no son de manera necesaria mutuamente excluyentes, porque algunas realizaciones pueden combinarse con una o más otras realizaciones para formar nuevas realizaciones.

La figura 1 ilustra una configuración común de una turbina eólica 1000 según una realización de la presente invención. La turbina eólica 1000 está montada sobre una base 1002. La turbina eólica 1000 incluye una torre 1004 que tiene un número de secciones de torre, tales como anillos de torre. Una góndola de turbina eólica 1006 está situada sobre la parte superior de la torre 1004. El rotor de turbina eólica 1008 incluye al menos una pala de rotor 1010, por ejemplo tres palas de rotor 1010. Las palas de rotor 1010 están conectadas a la góndola 1006 a través de un árbol de baja velocidad que se extiende hacia fuera de la parte frontal de la góndola 1006. En la turbina eólica 1000 (por ejemplo dentro de la góndola 1006), puede utilizarse un sistema eléctrico que se describirá en adelante).

La figura 2a muestra un sistema eléctrico 100 de una turbina eólica que tiene una configuración de convertidor que puede utilizarse en una turbina eólica según realizaciones de la presente invención. El sistema eléctrico 100 está conectado a un generador 102 de una turbina eólica. El sistema eléctrico 100 comprende un convertidor de tensión de CA a CC 104 (convertidor de lado de generador) conectado al generador 102, un convertidor de CC a CA 108 (convertidor de lado de línea) y un enlace de CC 106 conectado entre el convertidor de CA a CC 104 y el convertidor de CC a CA 108. El convertidor de CC a CA 108 está conectado mediante una línea de potencia 116 a un transformador 112 que a su vez está conectado a una red eléctrica de potencia 110. Un inductor 114 está ubicado a lo largo de la línea de potencia 116. La línea de potencia 116 está conectada además a un condensador 118. El sistema eléctrico 100, el generador 102 y el transformador 112 pueden formar parte de una turbina eólica como se muestra en la figura 1, y se ubican normalmente dentro de la góndola de la turbina eólica. La configuración de convertidor del sistema eléctrico 100 es una configuración de convertidor a escala completa. "Escala completa" en este contexto significa que toda la potencia generada por un generador 102 se convierte mediante el convertidor de tensión de CC a CA 108 antes de suministrarse a la red eléctrica 110. El convertidor de tensión de CC a CA 108 tiene una tensión de salida de convertidor máxima (U_{max}) que puede producir basándose en una tensión de enlace de CC fijada y también tiene un límite de corriente de salida de convertidor que no puede superarse. Si se supera el límite de salida de corriente de convertidor, la turbina eólica puede desacoplarse. Es decir, cuando hay un evento de HV (alta tensión) en la línea de potencia 116 (también denominado evento de "pico de tensión"), la tensión de salida de convertidor del convertidor de CC a CA 108 puede superar la tensión de salida de convertidor máxima U_{max} del convertidor de CC a CA 108. Como resultado, esto puede producir que una corriente de salida de convertidor supere el límite de corriente de salida de convertidor del convertidor de CC a CA 108. Esto puede producir que la turbina eólica se desacople, dando como resultado que la turbina eólica se desconecte de la red eléctrica 110.

En otras palabras: En caso de que la tensión de red eléctrica de la red eléctrica de potencia 110 supere por ejemplo más de 1 p.u. (p.u. = "por unidad", es decir una relación de tensión/tensión normal), se requiere que el convertidor de CC a CA 108 (convertidor de lado de línea) de la turbina eólica ajuste un vector de corriente de línea de manera que el tensión de salida de convertidor requerida del convertidor de CC a CA 108 pueda mantenerse por debajo de la tensión de salida de convertidor máxima U_{max} y la corriente de salida de convertidor no supere el límite de corriente de salida de convertidor del convertidor de CC a CA 108. En condición de pico de red eléctrica, ya que la tensión de salida máxima U_{max} del convertidor de CC a CA 108 está limitada por la tensión de enlace de CC U_{DC} , la corriente de salida de convertidor I_G puede volverse incontrolable. Además, en una condición de pico de red eléctrica, puede producirse un sobreexceso significativo de la tensión de enlace de CC U_{DC} que puede llevar a una activación de un troceador (no mostrado) para la disipación de transferencia de potencia desconocida/incontrolable a la red eléctrica 110. Con el fin de evitar tales situaciones incontrolables, países como Australia han estipulado requisitos de mantenimiento de conexión en caso de alta tensión (HVRT) para que las turbinas eólicas resistan una sobretensión de 1,3 p.u. durante 60 ms sin desconectarse.

La tensión de red eléctrica en la red eléctrica 110 (lado de alta tensión del transformador 112) se correlaciona con la tensión de línea de la línea de potencia 116 (lado de baja tensión del transformador 112) mediante la relación de transformador. Por tanto, en la presente invención, los términos "tensión de línea" y "tensión de red eléctrica" pueden utilizarse indistintamente.

Sin embargo, la situación puede mantenerse bajo control si la potencia reactiva se inyecta en la línea de potencia 116 conectada entre el convertidor de CC a CA 108 y el transformador 112 (y por tanto en la red eléctrica de

potencia 110) ajustando la tensión de salida requerida del convertidor de CC a CA 108, como será evidente en la descripción a continuación.

La figura 3 muestra un diagrama de flujo de un método 200 de control de una turbina eólica según una realización de la presente invención. En 202, empieza el método. En 204, se determina la tensión de línea de la línea de potencia. En 206, se determina si la tensión de línea supera un valor umbral predefinido. Si no se supera el valor umbral predefinido, el flujo vuelve a 204. Si se supera el valor umbral predefinido, el flujo continúa con 208 en el que la corriente reactiva se inyecta directamente en la línea de potencia, eligiéndose la cantidad de corriente reactiva inyectada de manera que una tensión de salida del convertidor de CC a CA se mantiene dentro de un intervalo de tensión predeterminado. Después, el flujo vuelve a 204.

En el contexto de la figura 2a, el método mostrado en la figura 3 puede interpretarse de manera que en caso de eventos de HV en la línea de potencia 116, una cantidad calculada de corriente reactiva se inyecta en la línea de potencia 116. Esta inyección se hace ajustando la tensión de salida de convertidor del convertidor de CC a CA 108 de manera que la corriente de salida de convertidor resultante I_G comprende la cantidad calculada de corriente reactiva. Controlando la cantidad de la corriente reactiva inyectada, la amplitud de la tensión de salida de convertidor U_V puede mantenerse por debajo de la tensión de salida de convertidor máxima U_{max} , y la potencia activa posible máxima puede inyectarse en la línea de potencia 116 (y por tanto en la red eléctrica 110). Como resultado, la turbina eólica no se desacoplará, y puede por tanto permanecer conectada a la red eléctrica 110 en eventos de HV. HVRT (mantenimiento de conexión en caso de alta tensión) se refiere a esta capacidad de la turbina eólica de permanecer conectada a la red eléctrica 110 durante tal evento de HV.

En la siguiente descripción, se facilitarán unos antecedentes teóricos para realizaciones de la presente invención.

La tensión de salida del convertidor de CC a CA 108 en la figura 2 puede representarse mediante la siguiente ecuación de tensión:

$$\vec{U}_V = \vec{U}_G + \vec{U}_L = \vec{U}_G + j\omega L \vec{I}_G$$

donde \vec{U}_V es la tensión de salida de convertidor del convertidor de CC a CA 108, \vec{U}_G es una tensión de línea en una parte de la línea de potencia 116 cerca del extremo de baja tensión del transformador 112, \vec{U}_L es la caída de tensión a través del inductor 114, e \vec{I}_G es la corriente de salida del convertidor de CC a CA 108. Además, L es la inductancia del inductor 114, y ω es la frecuencia de tensión.

En caso de una red eléctrica (línea de potencia) "sana" (en un caso en el que no hay pico de red eléctrica y en el que el tensión de línea \vec{U}_G está dentro de su intervalo de tensión de línea normal), la corriente de salida de convertidor \vec{I}_G se alinea con el tensión de línea \vec{U}_G tal como se ilustra en el diagrama de fasores de la figura 6. Es decir, solamente se inyecta la potencia activa en la línea de potencia 116, pero no la potencia reactiva.

En la condición de pico de tensión de red eléctrica, según una realización de la presente invención, la corriente de salida de convertidor \vec{I}_G se controla de manera que la amplitud de la tensión de salida de convertidor \vec{U}_V está limitada a una amplitud de tensión de salida de convertidor máxima U_{max} o por debajo. La fase de corriente de salida de convertidor \vec{I}_G lleva a la fase de la tensión de línea \vec{U}_G y puede proyectarse en la corriente reactiva $I_{reactiva}$ y corriente activa I_{activa} como se muestra en el diagrama de fasores de la figura 7.

Debe señalarse que en el caso de bajada de tensión de red eléctrica (eventos de LV (baja tensión)), los operadores de red eléctrica normalmente también requieren que la corriente reactiva (capacitiva) se inyecte en la red eléctrica 110 para ayudar a estabilizar la red eléctrica 110. En el caso de un evento de LV, la amplitud de tensión de salida de convertidor máxima está siempre por debajo del límite U_{max} . El diagrama de fasores como se muestra en la figura 8 ilustra esto.

Las siguientes ecuaciones pueden derivarse de un modelo de sistema DQ de control de corriente de línea.

$$\begin{cases} L \frac{dI_R}{dt} = U_{VD} - U_{GD} + \omega L I_A \\ L \frac{dI_A}{dt} = U_{VQ} - U_{GQ} - \omega L I_R \end{cases}$$

donde U_{VD} , U_{VQ} son las tensiones de salida de convertidor a lo largo del eje d/q en el sistema dq, U_{GD} , U_{GQ} son las tensiones de línea a lo largo del eje d/q en el sistema dq, y I_A , I_R son las corrientes reactiva y activa. Además, L es la inductancia del inductor 114, y ω es la frecuencia de tensión.

En la condición de estado estacionario, la tensión de salida de convertidor \vec{U}_V puede calcularse según lo siguiente

$$\begin{cases} U_{VD} = U_{GD} - \omega L I_A \\ U_{VQ} = U_{GQ} + \omega L I_R \end{cases}$$

La siguiente expresión puede utilizarse basándose en el límite de tensión de convertidor,

$$U_{VD}^2 + U_{VQ}^2 = (U_{GD} - \omega L I_A)^2 + (U_{GQ} + \omega L I_R)^2 \leq (m \cdot U_{\max})^2 \quad (1)$$

- 5 donde “m” es el índice de modulación permitido máximo y U_{\max} es la tensión de salida de convertidor permitida máxima \bar{U}_V .

Utilizando las ecuaciones facilitadas anteriormente, en la condición de estado estacionario, la corriente reactiva requerida para la condición de HVRT puede derivarse de la siguiente manera

$$I_R \leq (\sqrt{m^2 \cdot U_{\max}^2 - (U_{GD} - \omega L \cdot I_A)^2} - U_{GQ}) / \omega L$$

- 10 La figura 4 muestra un sistema de procesamiento 300 que puede utilizarse para el funcionamiento de una turbina eólica según una realización de la presente invención. El sistema de procesamiento 300 comprende: una unidad de entrada 302 configurada para recibir una señal de tensión de línea 304 que indica la tensión de línea de la línea de potencia; una unidad de procesamiento 306 unida a la unidad de entrada 302, estando la unidad de procesamiento 306 configurada para determinar si la tensión de línea supera un valor umbral predeterminado, y para determinar una cantidad de corriente reactiva que, si se inyecta directamente en la línea de potencia, mantiene una tensión de salida del convertidor de tensión de CC a CA dentro de un intervalo de tensión predeterminado; y una unidad de salida 308 unida a la unidad de procesamiento 306, estando la unidad de salida 308 configurada para emitir una señal 310 indicativa de la corriente reactiva que va a inyectarse directamente en la línea de potencia. La señal de salida 310 puede generarse basándose en la fórmula (2).

- 20 La figura 5 muestra una posible realización del sistema de procesamiento 300 mostrado en la figura 4. En la figura 5, se muestra un diagrama de bloques de un sistema controlador de convertidor 400 para controlar el convertidor de CC a CA 108. La parte 402 del sistema controlador de convertidor 400 (sistema de funcionalidad de mantenimiento de conexión) puede considerarse como una realización concreta del sistema de procesamiento 300. La parte 402 comprende la funcionalidad necesaria para manejar eventos de HV (funcionalidad HVRT) así como la funcionalidad necesaria para manejar eventos de LV (funcionalidad LVRT).

El sistema de funcionalidad de mantenimiento de conexión de tensión 402 comprende una unidad de entrada 404, una unidad de salida 406 y una unidad de procesamiento 408.

- 30 La unidad de entrada 404 está unida a una unidad de bucle de bloqueo de fase 410 configurada para generar una señal de tensión de línea S1 indicativa de los componentes d,q de la tensión de línea de la línea de potencia 116 utilizando un algoritmo de bucle de bloqueo de fase, y para suministrar la señal de tensión de línea S1 a la unidad de entrada 404.

La unidad de entrada 404 está unida además a una unidad de controlador de enlace de CC 412 configurada para generar una señal de referencia de corriente activa S2, y suministrar la señal de referencia de corriente activa S2 a la unidad de entrada 404.

- 35 La unidad de salida 406 está unida a una unidad de control de corriente de salida de convertidor 414 configurada para controlar la corriente de salida de convertidor basándose en una señal de referencia de corriente activa S3 y una señal de referencia de corriente reactiva S4. La señal de referencia de corriente activa S3 puede ser una señal de referencia de corriente activa optimizada, y la señal de referencia de corriente reactiva S4 puede ser una señal de referencia de corriente reactiva optimizada.

- 40 La unidad de procesamiento 408 comprende una primera unidad de generador de corriente reactiva 416, una segunda unidad de generador de corriente reactiva 418, una unidad de clasificación de tensión de línea 420, una unidad de conmutación 422 y una unidad de optimización de corriente 424.

Basándose en una señal de tensión de línea nominal S5, la unidad de clasificación de tensión de línea 420 clasifica la tensión de línea en tres categorías - normal, bajada o pico.

- 45 Dependiendo de la categoría de tensión de línea determinada, una señal de referencia de corriente reactiva S6 se genera o bien mediante la primera unidad de generador de corriente reactiva 416 (en el caso de una condición de bajada) basándose en información como se muestra en la figura 12 (la figura 12 proporciona información que especifica la cantidad de corriente reactiva que se inyectará según se requiera mediante un código de red eléctrica en el caso de un evento de baja tensión en la línea de potencia), o bien a partir de la segunda unidad de generador

de corriente reactiva 418 (en el caso de una condición de pico) basándose en la ecuación (2). La unidad de conmutación 422 está controlada por una señal de salida S7 generada por la unidad de clasificación de tensión de línea 420 de manera que la señal de referencia de corriente reactiva S6 se calcula a partir de la correcta de la primera unidad de generador de corriente reactiva 416 y la segunda unidad de generador de corriente reactiva 418, dependiendo de la tensión de línea. Utilizando la señal de referencia de corriente activa S2 y la señal de referencia de corriente reactiva S6, la unidad de control de corriente de línea 414 genera una señal de referencia de tensión de salida de convertidor S8 basándose en la cual, la tensión de salida de convertidor \bar{U}_V se controla de manera correspondiente. Con el fin de hacer esto, un controlador del convertidor de CC a CA 108 puede generar por ejemplo señales PWM basándose en la señal de referencia de tensión de salida de convertidor S8, controlando de ese modo el convertidor de CC a CA 108 para ajustar la tensión de salida de convertidor \bar{U}_V de manera que la corriente de salida de convertidor adopta su valor objetivo. Esto se muestra a modo de ejemplo en la figura 2b: la señal de tensión de línea S1, la señal S9 y la señal S12 (y quizás también señales adicionales) se suministran al sistema controlador de convertidor 400, basándose en las cuales el sistema controlador de convertidor 400 determina la señal de referencia de tensión de salida de convertidor S8. La señal de referencia de tensión de salida de convertidor S8 se utiliza para generar señales PWM para controlar el convertidor de CC a CA 108 de manera que la corriente de salida de convertidor adopta su valor objetivo.

La señal S9 es una señal de tensión de enlace de CC medida (medida en el enlace de CC 106, la señal S10 es un parámetro de entrada de inductancia (un parámetro que indica la inductancia del inductor 114), la señal S11 es un valor objetivo de tensión de enlace de CC y la señal S12 es una señal de corriente de salida de convertidor medida del convertidor 108.

En el caso de que se detecte una condición de bajada de tensión por la unidad de clasificación de tensión de línea 420, la señal de referencia de corriente reactiva S6 se calcula mediante la primera unidad de generador de corriente reactiva 416 basándose en el porcentaje de la bajada según un código de red eléctrica como se muestra en la figura 12.

La unidad de optimización de corriente 424 (bloque de control de trayectoria de corriente óptima) es opcional y trabaja de la siguiente manera. Una amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor se calcula mediante la unidad de optimización de corriente 424 a partir de la señal de referencia de corriente reactiva S6 y la señal de referencia de corriente activa S2, y se compara con un límite de amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor I_{max} . Si la amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor es menor que I_{max} , una señal de referencia de corriente activa S3 y una señal de referencia de corriente reactiva S4 se ajustan de la manera siguiente:

$$\begin{bmatrix} I_{r_ref} \\ I_{a_ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{r_ref_cal} \\ I_{a_ref_cal} \end{bmatrix} \quad \text{si} \quad \sqrt{I_{r_ref_cal}^2 + I_{a_ref_cal}^2} \leq I_{max}$$

Es decir, en este caso, la señal de referencia de corriente activa S3 corresponde a la señal de referencia de corriente activa S2, y la señal de referencia de corriente reactiva S4 corresponde a la señal de referencia de corriente reactiva S6.

Sin embargo, si la amplitud de referencia de corriente supera el límite máximo I_{max} , se aplica un proceso de optimización. El proceso de optimización se lleva a cabo de la siguiente manera: se determinan las referencias de corriente optimizadas (señales S3, S4) utilizando la ecuación (1) de la siguiente manera:

$$\begin{cases} (U_{GD} - \omega L I_A)^2 + (U_{GQ} + \omega L I_R)^2 \leq m^2 \cdot U_{max}^2 \\ I_A^2 + I_R^2 = I_{max}^2 \end{cases}$$

Ya que U_{GD} es igual a cero en el estado estacionario (esto se debe al sistema de rotación, la tensión se alinea con el eje Q en condición estable, y en posición vertical al eje D; U_{GD} es la tensión que la tensión de línea proyecta al eje D, así que es cero) en el plano de vector de corriente, las ecuaciones anteriores pueden escribirse de la manera siguiente:

$$\begin{cases} \left(I_R + \frac{U_{GQ}}{\omega L} \right)^2 + I_A^2 \leq \frac{m^2 \cdot U_{max}^2}{\omega^2 L^2} \\ I_R^2 + I_A^2 = I_{max}^2 \end{cases} \quad (3)$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores (3), se obtienen las siguientes referencias de corriente óptimas (señales S3, S4):

$$\begin{cases} I_R = \left(\frac{m^2 \cdot U_{\max}^2}{\omega^2 L^2} - I_{\max}^2 \right) \cdot \frac{\omega L}{2 \cdot U_{GQ}} - \frac{U_{GQ}}{2 \cdot \omega L} \\ I_A = \sqrt{I_{\max}^2 - I_R^2} \end{cases} \quad (4)$$

Es decir, si la amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor supera el límite máximo I_{\max} , las señales S3, S4 se obtienen a partir de las señales S2, S6 utilizando las ecuaciones (4).

5 Si las ecuaciones (4) se trazan en el plano de corriente, pueden visualizarse las soluciones optimizadas para referencias de corriente activa/reactiva en la condición de pico de tensión de línea. Esto se muestra en la figura 9. De las ecuaciones (4) se entiende que las corrientes Ir e Ia se recalculan según las ecuaciones (4), es decir en este caso las corrientes Ir e Ia se calculan sin utilizar las señales S2 y S6.

La figura 9 muestra una curva de trayectoria de corriente obtenida después de un proceso de optimización basándose en la ecuación (4).

10 Este control de trayectoria de corriente óptima garantiza una salida de potencia y una corriente activa máximas durante HVRT mientras que se mantiene tanto la corriente de salida de convertidor como la tensión de salida de convertidor dentro de sus límites.

En la condición de bajada de tensión de línea, se aplica la situación de la figura 10. En este caso, ya que el círculo de convertidor contiene al círculo de corriente, solamente es necesario satisfacer el límite de corriente.

15 La figura 11 se aplica en la condición de tensión de línea sana (no es necesaria inyección de corriente reactiva). Ya que solamente se requiere inyectar corriente activa a la línea de potencia, la trayectoria de corriente está solamente en el eje Y.

Basándose en la descripción anterior, se hace evidente que, según una realización de la presente invención, se aplica el siguiente método: 1) En primer lugar, se determinan la corriente activa (I_{a_ref}) y la corriente reactiva (I_{r_ref}) que es necesario inyectar en la línea de potencia. Se determina I_{r_ref} utilizando ecuación (2) y se optimiza, si es necesario. 2) Para producir que el convertidor de CC a CA 108 emita una corriente de salida de convertidor I_G que incluye los respectivos componentes de corriente activa y reactiva, el convertidor de CC a CA 108 se controla para emitir la tensión de salida de convertidor necesaria U_v . El control del convertidor de CC a CA 108 se hace utilizando señales PWM (modulación de anchura de pulso) generadas basándose en la señal S8 (es decir la señal de salida a partir de la unidad de control de corriente de salida de convertidor). 3) Las señales PWM se utilizan para controlar el funcionamiento del convertidor de CC a CA 108 de manera que emite la U_v (que es menor que U_{\max}) junto con una corriente de salida de convertidor correspondiente I_G (comprendiendo los componentes I_a e I_r correspondientes determinados) que está por debajo del límite de corriente de salida de convertidor. Por tanto, en primer lugar se determina la corriente reactiva que se inyectará en la línea de potencia 116 de manera que la U_v necesaria para generar la corriente reactiva está por debajo de U_{\max} . Entonces, el convertidor de CC a CA 108 se controla para tener una salida de tensión U_v que implicará la corriente de salida de convertidor I_G con los componentes I_r correspondientes como se determinó anteriormente.

Como ha resultado evidente, las realizaciones de la presente invención resuelven los problemas de control de potencia y corriente en el caso de un pico de tensión de red eléctrica.

35 Según realizaciones de la presente invención, seleccionando una trayectoria apropiada de corriente, pueden inyectarse las corrientes activa y reactiva óptimas de manera que la potencia activa máxima puede transferirse a la red eléctrica durante HVRT.

Según realizaciones de la presente invención, se minimiza la posibilidad de desacoplar la turbina y activación de troceador durante una condición de HVRT.

40 Según realizaciones de la presente invención, la potencia real y reactiva se controla durante la condición de mantenimiento de conexión de tensión.

Según realizaciones de la presente invención, utilizando un control de corriente de trayectoria óptima, es posible proporcionar la inyección de corriente activa y reactiva óptima de manera que la potencia activa máxima puede transferirse a la red eléctrica durante HVRT.

45 Según realizaciones de la presente invención, se calcula una referencia de corriente reactiva, minimizando de ese modo la posibilidad de activación de troceador. En la condición de HVRT sin activación de un troceador, la potencia se alimenta a la red eléctrica en lugar de que se disipe como calor en una resistencia de troceador.

Aunque la invención se ha mostrado y descrito particularmente con referencia a realizaciones específicas, los expertos en la técnica deberán entender que pueden realizarse diversos cambios en forma y detalle sin apartarse

del alcance de la invención como se define en las reivindicaciones adjuntas. El alcance de la invención se indica así mediante las reivindicaciones adjuntas y por tanto se pretende que se abarquen todos los cambios que se encuentren dentro del significado e del rango de equivalencia de las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Método de funcionamiento de una turbina eólica que comprende un convertidor de tensión de CC a CA (108), pudiendo conectarse la turbina eólica a una red eléctrica (110) mediante el convertidor de tensión de CC a CA (108), comprendiendo el método:

5 - determinar una tensión de línea de una línea de potencia (116) que conecta el convertidor de tensión de CC a CA (108) a la red eléctrica (110), caracterizado porque:

10 - si la tensión de línea determinada supera un valor umbral de tensión predefinido, inyectando corriente reactiva en la línea de potencia (116), en el que la cantidad de corriente reactiva inyectada se elige tal que una tensión de salida del convertidor de tensión de CC a CA (108) se mantiene dentro de un intervalo de tensión predeterminado.

2. Método según la reivindicación 1, en el que una referencia de corriente reactiva se calcula basándose en una tensión de salida máxima del convertidor de tensión de CC a CA (108), la tensión de línea y una referencia de corriente activa, en el que la cantidad de corriente reactiva inyectada se controla basándose en la referencia de corriente reactiva.

15 3. Método según la reivindicación 2, en el que la referencia de corriente reactiva se calcula según la siguiente fórmula:

$$I_R \leq (\sqrt{m^2 \cdot U_{max}^2 - (U_{GD} - \omega L \cdot I_A)^2} - U_{GQ}) / \omega L$$

20 donde U_{GD} , U_{GQ} son las tensiones de línea a lo largo del eje dq en el sistema dq, I_A , I_R son las corrientes activa y reactiva, m es el índice de modulación permitido máximo y U_{max} es la tensión de salida de convertidor permitida máxima, L es la inductancia de un inductor (114) en la línea de potencia (116), y ω es la frecuencia de tensión.

25 4. Método según la reivindicación 2 ó 3, en el que la referencia de corriente reactiva se convierte en una referencia de corriente reactiva optimizada si una amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor calculada a partir de la referencia de corriente activa y la referencia de corriente reactiva supera un valor umbral de amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor predeterminada, en el que la cantidad de corriente reactiva inyectada se controla basándose en la referencia de corriente reactiva optimizada.

30 5. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 4, en el que la referencia de corriente activa se convierte en una referencia de corriente activa optimizada si una amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor calculada a partir de la referencia de corriente activa y la referencia de corriente reactiva supera un valor umbral de amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor predeterminada, en el que la cantidad de corriente activa inyectada se controla basándose en la referencia de corriente activa optimizada.

35 6. Método según la reivindicación 4 ó 5, en el que la amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor se determina según la siguiente fórmula:

$$I_{ref} = \sqrt{I_{r_ref_cal}^2 + I_{a_ref_cal}^2}$$

donde $I_{r_ref_cal}$ es la referencia de corriente reactiva, y $I_{a_ref_cal}$ es la referencia de corriente activa.

7. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 6, en el que la referencia de corriente reactiva optimizada se calcula basándose en la siguiente fórmula:

40
$$I_R = \left(\frac{m^2 \cdot U_{max}^2}{\omega^2 L^2} - I_{max}^2 \right) \cdot \frac{\omega L}{2 \cdot U_{GQ}} - \frac{U_{GQ}}{2 \cdot \omega L}$$

8. Método según la reivindicación 7, en el que la referencia de corriente activa optimizada se calcula basándose en la siguiente fórmula:

$$I_A = \sqrt{I_{max}^2 - I_R^2}$$

45 9. Método según la reivindicación 8, en el que la corriente de salida de convertidor se controla basándose en la referencia de corriente activa optimizada y la referencia de corriente reactiva optimizada.

10. Sistema de procesamiento (300, 402) que puede utilizarse para el funcionamiento de una turbina eólica que comprende un convertidor de tensión de CC a CA (108), siendo conectable la turbina eólica a una red eléctrica (110) mediante el convertidor de tensión de CC a CA (108), comprendiendo el sistema de procesamiento (300, 402):
- 5 - una unidad de entrada (302, 404) configurada para recibir una señal de tensión de línea (304, S1) que indica la tensión de línea de una línea de potencia (116) que conecta el convertidor de tensión de CC a CA (108) con la red eléctrica (110),
- 10 - una unidad de procesamiento (306, 408) acoplada a la unidad de entrada (302), estando la unidad de procesamiento (306, 408) configurada para determinar si el tensión de línea supera un valor umbral de tensión de línea particular, y para determinar una cantidad de corriente reactiva que, si se inyecta directamente en la línea de potencia (116), mantiene una tensión de salida del convertidor de tensión de CC a CA (108) dentro de un intervalo de tensión predeterminado, y
- 15 - una unidad de salida (308, 406) unida a la unidad de procesamiento (306, 408), estando la unidad de salida (308, 406) configurada para emitir una señal de salida (310) indicativa de la corriente reactiva que se inyectará en la línea de potencia (116).
11. Sistema de procesamiento (300, 402) según la reivindicación 10, en el que la unidad de entrada (302, 404) está configurada además para recibir una señal de referencia de corriente activa (S2), y en el que la unidad de procesamiento está configurada para calcular una referencia de corriente reactiva indicativa de la corriente reactiva que se inyectará en base a una tensión de salida máxima del convertidor de tensión de CC a CA (108), la señal de tensión de línea (304, S1) y la señal de referencia de corriente activa (S2), en el que la señal de salida (310) emitida mediante la unidad de salida (308, 406) se deriva mediante la unidad de procesamiento (306, 408) a partir de la referencia de corriente reactiva.
- 20 12. Sistema de procesamiento (300, 402) según la reivindicación 11, en el que la unidad de procesamiento (306, 408) está configurada además para convertir la referencia de corriente reactiva en una referencia de corriente reactiva optimizada si una amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor calculada a partir de la referencia de corriente activa y la referencia de corriente reactiva supera un valor umbral de amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor predeterminado, en el que la señal de salida (310) emitida mediante la unidad de salida (308, 406) se deriva mediante la unidad de procesamiento (306, 408) a partir de la referencia de corriente reactiva optimizada.
- 25 13. Sistema de procesamiento (300, 402) según la reivindicación 11 ó 12, en el que la unidad de procesamiento (306, 408) está configurada para convertir la referencia de corriente activa en una referencia de corriente activa optimizada si una amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor calculada a partir de la referencia de corriente activa y la referencia de corriente reactiva supera un valor umbral de amplitud de referencia de corriente de salida de convertidor predeterminado, en el que la señal de salida (310) emitida mediante la unidad de salida (308, 406) se deriva mediante la unidad de procesamiento (306, 408) a partir de la referencia de corriente activa optimizada.
- 30 35 14. Sistema de control de turbina eólica (400) para controlar una turbina eólica que comprende un convertidor de tensión de CC a CA (108), estando la turbina eólica conectada a una red eléctrica (110) mediante el convertidor de tensión de CC a CA (108), comprendiendo el sistema de control (400) un sistema de procesamiento (300, 402) según una cualquiera de las reivindicaciones 10 a 13.
- 40 15. Turbina eólica que comprende un sistema de control de turbina eólica (400) según la reivindicación 14.

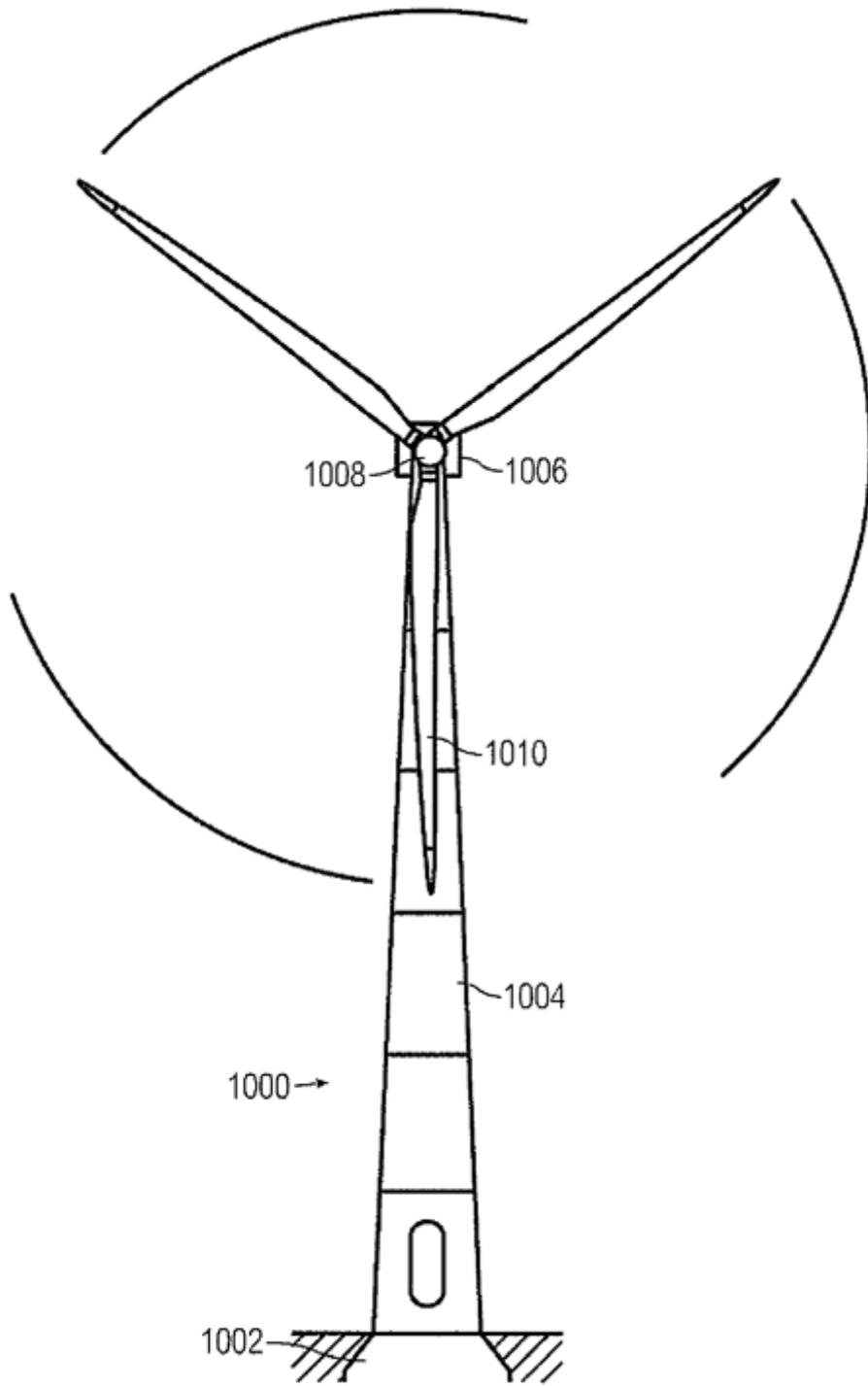


FIGURA 1

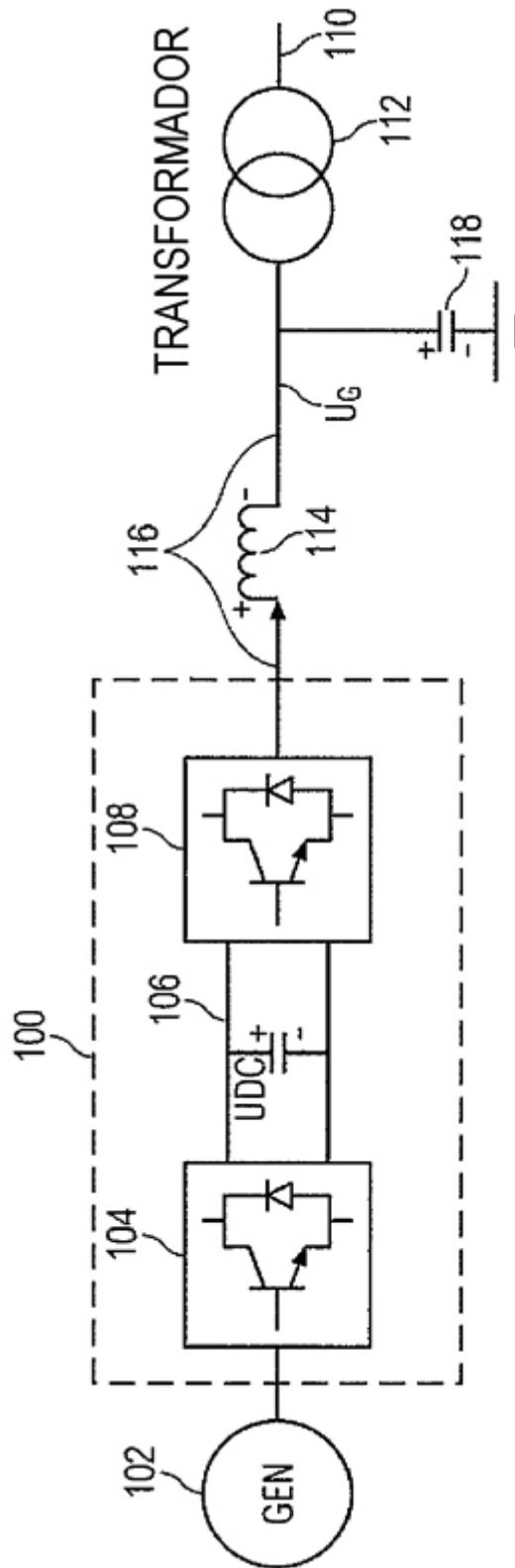


FIGURA 2A

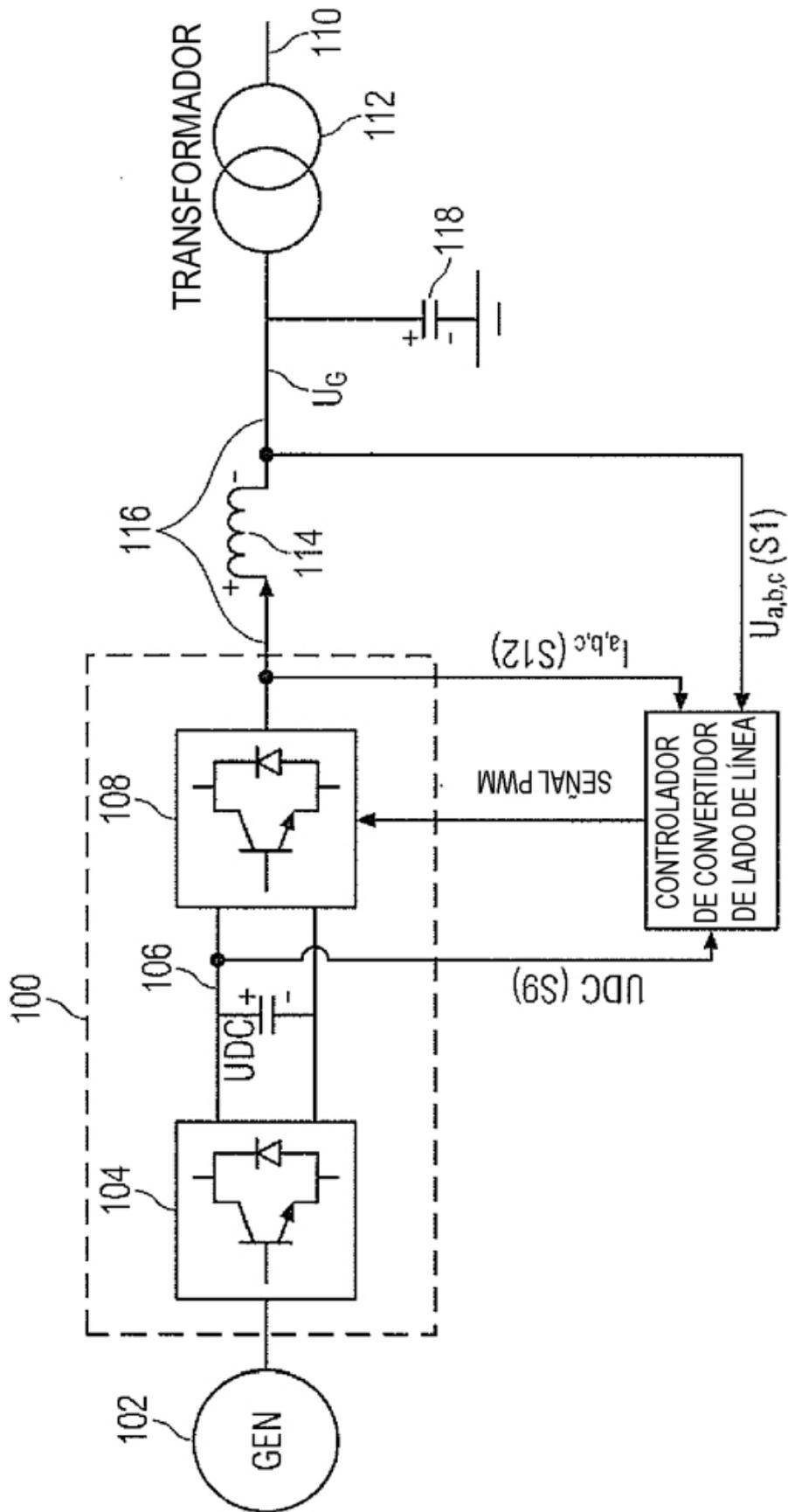


FIGURA 2B

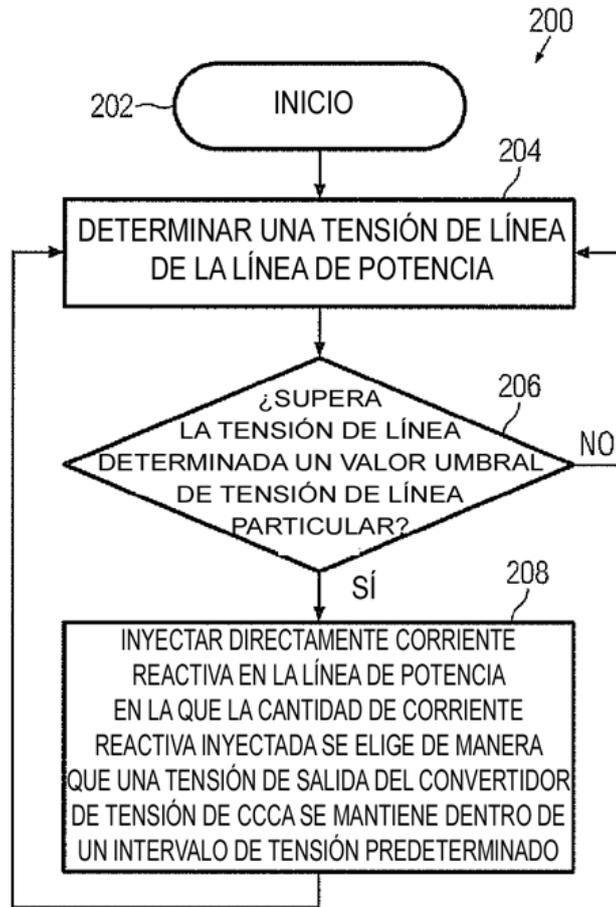


FIGURA 3

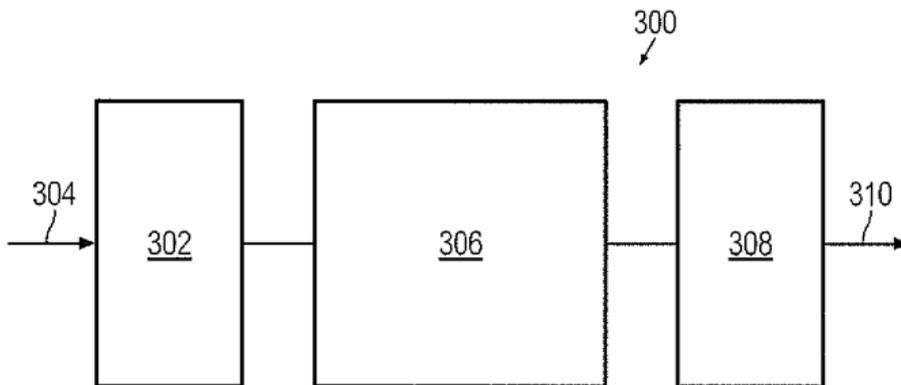


FIGURA 4

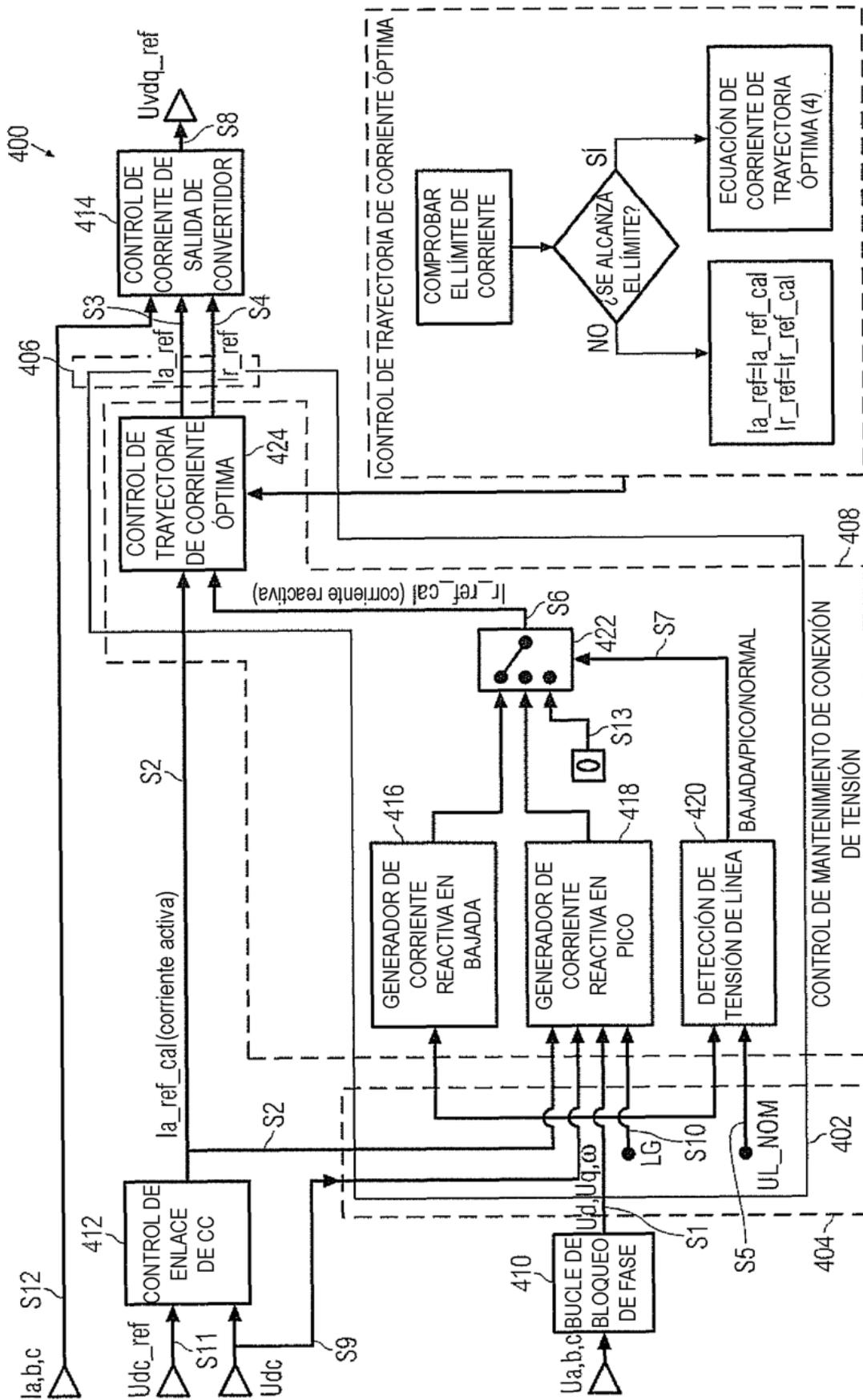


FIGURA 5

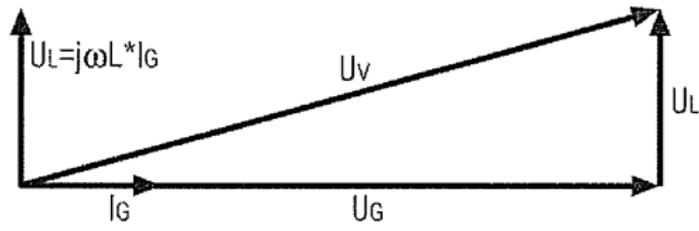


FIGURA 6

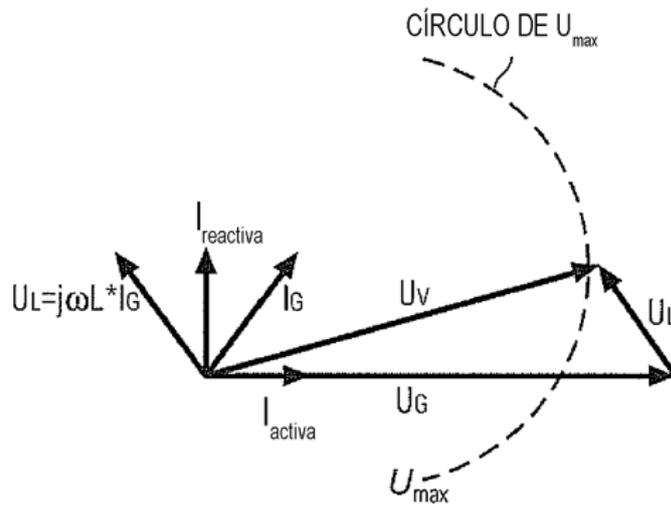


FIGURA 7

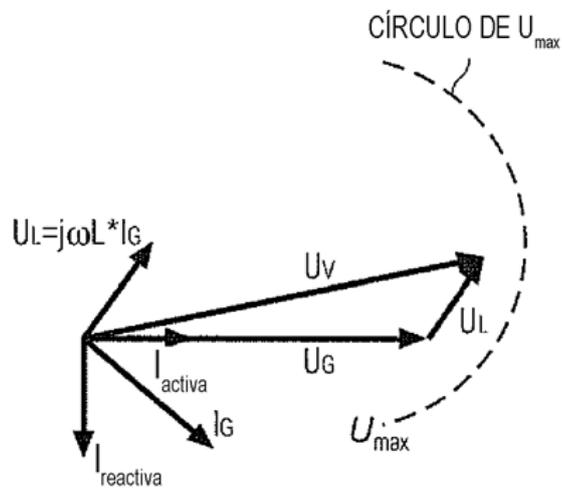


FIGURA 8

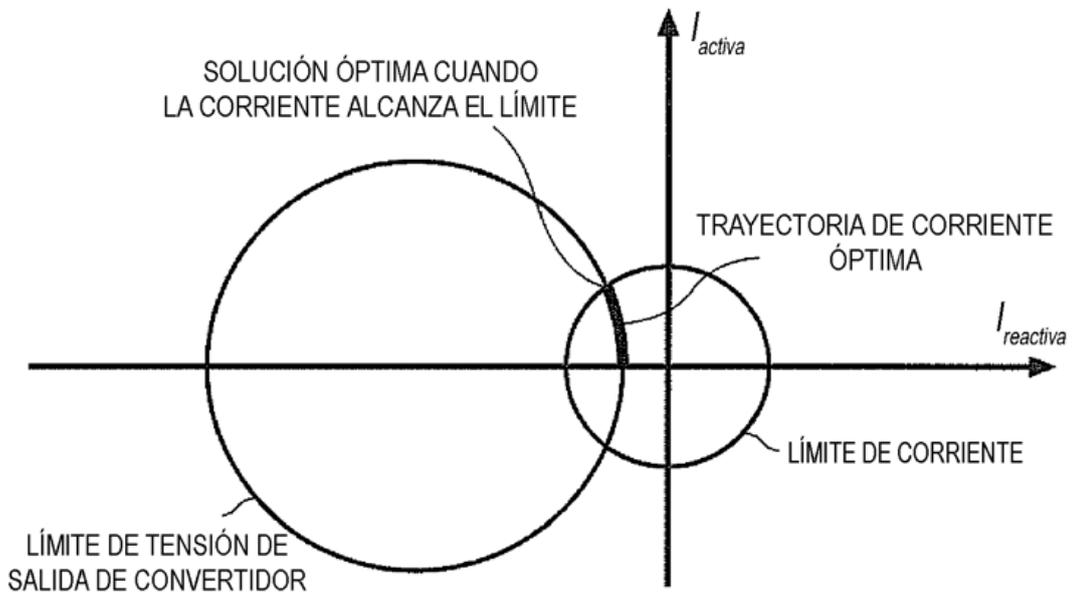


FIGURA 9

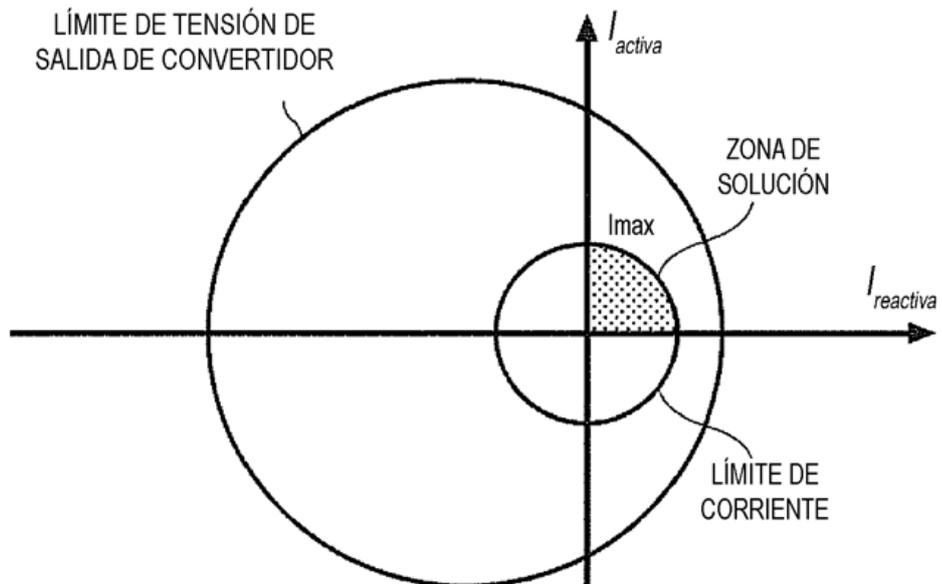


FIGURA 10

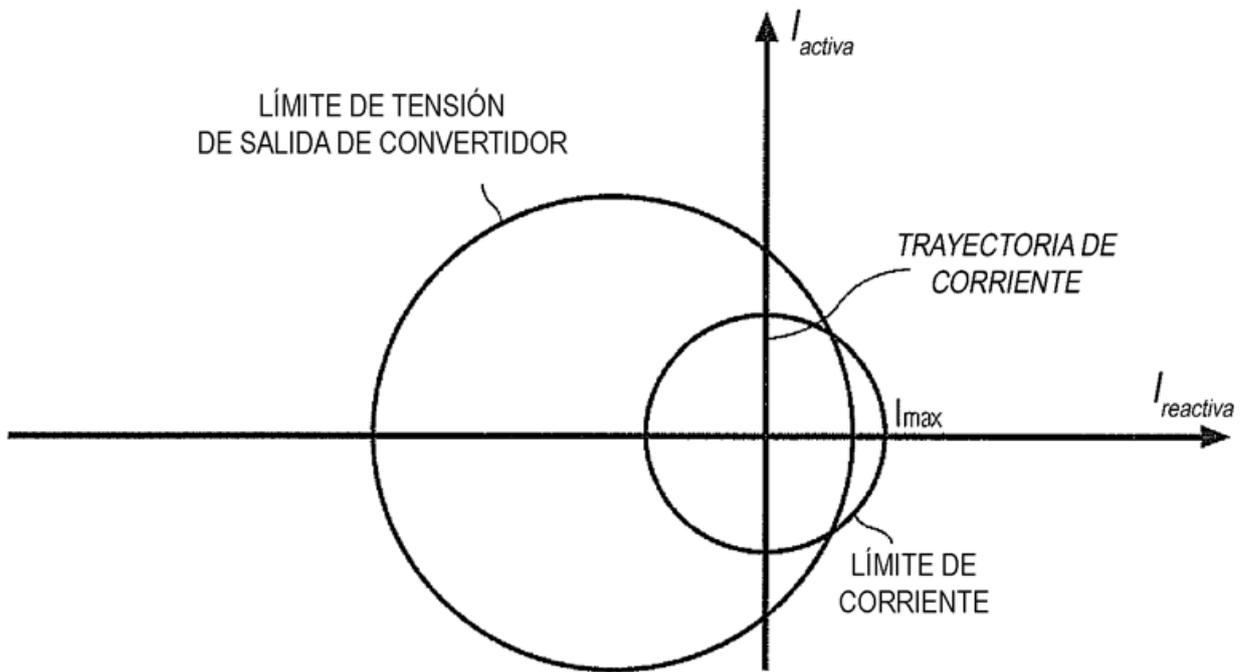


FIGURA 11

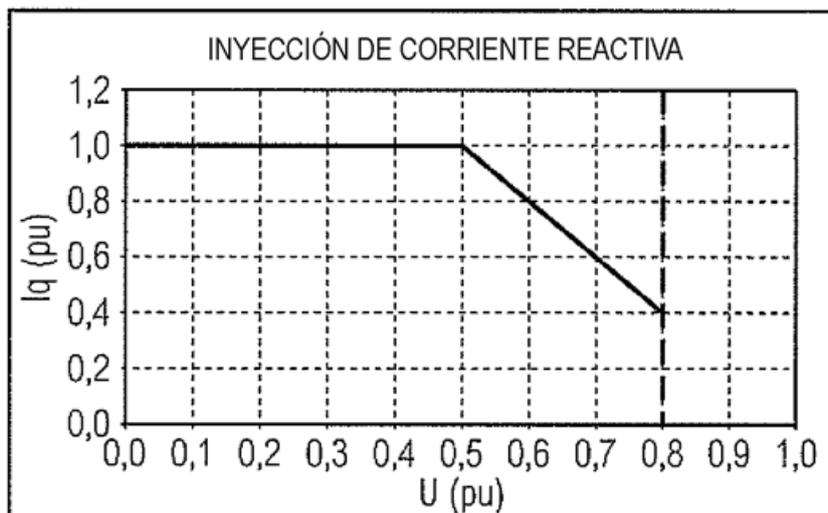


FIGURA 12