

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 707 795**

51 Int. Cl.:

H02M 1/12 (2006.01)
H02J 3/20 (2006.01)
F03D 9/00 (2006.01)
F03D 7/04 (2006.01)
H02P 9/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.06.2011 E 11171313 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.12.2018 EP 2407664**

54 Título: **Método para operar una turbina eólica, controlador utilizable para operar una turbina eólica y turbina eólica**

30 Prioridad:

23.06.2010 DK 201070285
23.06.2010 US 357581 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
05.04.2019

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

SNG, ENG KIAN KENNETH

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 707 795 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 para operar una turbina eólica, controlador utilizable para operar una turbina eólica y turbina eólica

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere en general a un método para operar una turbina eólica, un controlador utilizable para operar una turbina eólica y una turbina eólica.

10 **Antecedentes**

Las turbinas eólicas se conectan generalmente a una red de potencia mediante un convertidor, por ejemplo un convertidor de escala completa. Un convertidor de 3 MW normalmente tiene una frecuencia de resonancia de aproximadamente 1 kHz. En la ausencia de un controlador de corriente para el convertidor, un cambio súbito en la tensión de suministro a la red de potencia puede excitar el modo resonante de un sistema que incluye el convertidor, un filtro de red e impedancia de red (es decir transformador e impedancia de línea) y puede resultar en altas corrientes transitorias máximas. Tales corrientes transitorias máximas altas pueden activar el sistema de protección del convertidor y pueden terminar en una activación no deseada de las turbinas eólicas.

20 Una manera posible de mitigar las altas corrientes máximas transitorias es el uso de amortiguación pasiva. Un circuito de amortiguación de derivación para la frecuencia resonante puede colocarse en paralelo con el condensador conectado al convertidor y la red de potencia. Sin embargo, los elementos inductancia y capacitancia del circuito de amortiguación de derivación deben sintonizarse a la frecuencia resonante. La disipación de energía ocurre con, por ejemplo resistores del circuito de amortiguación de derivación.

25 Una manera alternativa es usar la amortiguación activa donde una corriente de salida del convertidor se controla para emular una corriente del circuito de amortiguación. Sin embargo, un ancho de banda de controlador de alta corriente se requiere para controlar la corriente de salida del convertidor en la frecuencia de resonancia (es decir, aproximadamente 1 kHz).

30 La amortiguación de resonancia en redes de potencia es la materia objeto de diversos documentos de la técnica anterior, por ejemplo solicitudes de patente WO2010055322 y US2007007929, y publicaciones científicas XP055139258 ("A novel control to actively damp resonance in input LC filter of a three-phase voltage source converter") y XP010595911 ("Stability improvements of an LCL-filter based three-phase active rectifier").

35 **Sumario**

De acuerdo con una realización de la presente invención, un método de acuerdo con la reivindicación 1 de operar una turbina eólica se proporciona. La turbina eólica incluye un convertidor de tensión que puede conectarse a una red de potencia mediante una disposición de filtro. El método incluye determinar una tensión de línea; y añadir la tensión de línea determinada a la salida del convertidor de tensión con un retraso temporal, en el que el retraso temporal se ajusta de manera que los efectos resonantes que ocurren en la disposición de filtro disminuyen.

45 De acuerdo con una realización de la presente invención, la tensión de línea se muestrea a intervalos de tiempo regulares para generar una pluralidad de muestras de tensión.

De acuerdo con una realización de la presente invención, el método incluye generar una tensión de cancelación en función de la pluralidad de valores de muestra de tensión; añadir la tensión de cancelación a la salida del convertidor de tensión; y actualizar la tensión de cancelación a intervalos de tiempo regulares.

50 De acuerdo con una realización de la presente invención, la tensión de cancelación se calcula desde una combinación lineal de diferentes valores de muestra de tensión que se ponderan mediante respectivos coeficientes de ponderación de muestra de tensión.

55 De acuerdo con una realización de la presente invención, al menos algunos de los coeficientes de ponderación de muestra de tensión respectivamente dependen de un parámetro de optimización $t_{predicción}$ que ajusta el retraso temporal con el que la tensión de línea determinada se aplica a la salida del convertidor de tensión.

60 De acuerdo con una realización de la presente invención, la tensión de cancelación se determina usando una serie de transformaciones discretas.

De acuerdo con una realización de la presente invención, la serie de transformaciones discretas tiene un orden de al menos 3.

65 De acuerdo con una realización de la presente invención, la tensión de cancelación se genera modificando una señal de control de convertidor de tensión.

De acuerdo con una realización de la presente invención, un controlador de acuerdo con la reivindicación 4 utilizable para operar una turbina eólica se proporciona. La turbina eólica incluye un convertidor de tensión que es conectable a una red de potencia mediante una disposición de filtro. El controlador incluye una unidad de entrada que se configura para recibir una señal indicativa de una tensión de línea, y una unidad de control acoplada a la unidad de entrada, la

5 unidad de control que se configura para controlar un proceso de añadir la tensión de línea indicada por la señal recibida a la salida del convertidor de tensión con un retraso temporal, y ajustar el retraso temporal de manera que los efectos resonantes que ocurren en la disposición de filtro disminuyen.

De acuerdo con una realización de la presente invención, la señal recibida por la unidad de entrada es una señal de muestreo resultante de un proceso de muestreo que muestrea la tensión de línea a intervalos de tiempo regulares.

10

De acuerdo con una realización de la presente invención, la unidad de control se configura para controlar un proceso de a) generar una tensión de cancelación en función de la señal de muestreo; b) añadir la tensión de cancelación a la salida del convertidor de tensión; y repetir a) y b).

15

De acuerdo con una realización de la presente invención, la unidad de control se configura para calcular la tensión de cancelación desde una combinación lineal de diferentes valores de muestra de tensión que se ponderan mediante respectivos coeficientes de ponderación de muestra de tensión.

De acuerdo con una realización de la presente invención, al menos algunos de los coeficientes de ponderación de muestra de tensión dependen respectivamente de un parámetro de optimización $t_{predicción}$ que ajusta el retraso temporal con el que la tensión de línea determinada se aplica a la salida del convertidor de tensión.

20

De acuerdo con una realización de la presente invención, la tensión de cancelación se determina usando una serie de transformaciones discretas.

25

De acuerdo con una realización de la presente invención, la serie de transformaciones discretas tiene un orden de al menos 3.

De acuerdo con una realización de la presente invención, la unidad de control se configura para generar una señal de control que modifica una señal de control de la tensión de manera que una tensión de salida de convertidor del convertidor de tensión tiene un componente de tensión de cancelación adicional.

30

De acuerdo con una realización de la presente invención, el controlador es el controlador de convertidor de tensión.

35

De acuerdo con una realización de la presente invención, el controlador se implementa en hardware o en software o en una combinación de hardware y software.

De acuerdo con una realización de la presente invención, una turbina eólica que incluye un controlador como se ha descrito antes se proporciona.

40

Breve descripción de los dibujos

En los dibujos, los caracteres de referencia similares se refieren en general a las mismas partes a través de las diferentes vistas. Los dibujos no están necesariamente a escala, poniéndose el énfasis en su lugar generalmente en ilustrar los principios de la invención. En la siguiente descripción, diversas realizaciones de la invención se describen en referencia a los siguientes dibujos en los que:

45

la Figura 1 ilustra una configuración común de una turbina eólica convencional.

50 La Figura 2a muestra un dibujo esquemático de un sistema eléctrico que tiene una configuración de convertidor de escala completa.

La Figura 2b muestra un dibujo esquemático de un sistema eléctrico que tiene una configuración de convertidor de escala completa de acuerdo con una realización de la presente invención.

55 La Figura 3 muestra un diagrama de flujo de un método para operar una turbina eólica de acuerdo con una realización de la presente invención.

La Figura 4 muestra un diagrama de bloques esquemático de un controlador utilizable para operar una turbina eólica de acuerdo con una realización de la presente invención.

60 La Figura 5 muestra un diagrama de bloques esquemático de un controlador utilizable para operar una turbina eólica de acuerdo con una realización de la presente invención.

Descripción detallada

La Figura 1 ilustra una configuración común de una turbina eólica 100 convencional. La turbina eólica 100 se monta en una base 102. La turbina eólica 100 incluye una torre 104 con un número de secciones de torre. Una góndola 106 de turbina eólica se coloca en la parte superior de la torre 104. El rotor de turbina eólica incluye un buje 108 y al menos una pala 110 de rotor, por ejemplo tres palas 110 de rotor. Las palas 110 de rotor se conectan al buje 108 que a su

65

vez se conecta a la góndola 106 a través de un árbol de baja velocidad que se extiende fuera del frente de la góndola 106.

La Figura 2a muestra un sistema eléctrico 200 de una turbina eólica que tiene una configuración de convertidor que puede usarse en una turbina eólica de acuerdo con realizaciones de la presente invención. El sistema eléctrico 200 se conecta a un generador 202 de una turbina eólica. En una realización, el sistema eléctrico 200 puede ser un convertidor de tensión 200 que incluye un convertidor de tensión de CA a CC 204 (convertidor de lado de generador) conectado al generador 202, un convertidor de tensión de CC a CA 206 (convertidor del lado de línea) y un enlace CC 208 conectado entre el convertidor de tensión de CA a CC 204 y el convertidor de tensión de CC a CA 206. Diferentes configuraciones del sistema eléctrico 200 son posibles en otras realizaciones. El convertidor de tensión 200 se conecta a una red de potencia 210 mediante una disposición de filtro 212.

En más detalle, una primera parte 214a de la línea de potencia 214 se conecta entre una salida 230 del convertidor de tensión 200 y un primer extremo 222 del inductor 216, y una segunda parte 214b de la línea de potencia 214 se conecta entre un segundo extremo 224 del inductor 216 y el transformador 220. La disposición de filtro 212 se conecta entre la segunda parte 214b de la línea de potencia 214 y un punto de referencia de tierra 226. La disposición de filtro 212 se conecta a la segunda parte 214b de la línea de potencia 214 en un punto de acoplamiento 219.

Diferentes configuraciones y/o disposiciones de la disposición de filtro 212 son posibles. En una realización, como se muestra en la Figura 2a, la disposición de filtro 212 incluye un condensador 218 conectado entre el punto de acoplamiento 219 y el punto de referencia de tierra 226. En otras realizaciones, la disposición de filtro 212 puede incluir resistores, inductores y/o condensadores conectados entre el punto de acoplamiento 219 y el punto de referencia de tierra 226. Los resistores, inductores y/o condensadores pueden disponerse en serie, en paralelo o en una combinación de disposición en serie y paralelo. Los resistores, inductores y/o condensadores pueden por ejemplo amortiguar ganancias de frecuencia resonante así como reducir armónicos de alta frecuencia resultantes de la conmutación de conmutadores de semiconductor en el sistema de convertidor.

El sistema eléctrico 200, el generador 202 y el transformador 220 pueden ser parte de una turbina eólica 100 como se muestra en la Figura 1, y se ubican normalmente dentro de la góndola 106 de la turbina eólica 100. La configuración del convertidor del sistema eléctrico 100 es una configuración de convertidor de escala completa. "Escala completa" en este contexto significa que toda la potencia generada por el generador 202 se convierte por el convertidor de tensión 200 antes de suministrarse a la red de potencia 210.

Como alternativa, el generador 202 puede ser un generador asíncrono de suministro doble o único, un generador de imán permanente, un generador de inducción o cualquier otro tipo de generador que comprende un enrollamiento de estator. Una caja de engranajes también puede estar presente para incrementar la baja velocidad rotativa del árbol de baja velocidad a una gran velocidad rotativa adecuada para operar el generador 202. También es posible omitir la caja de engranajes usando un generador de múltiples polos 202 adecuado para una baja velocidad rotativa del árbol de baja velocidad. En este caso, el árbol de baja velocidad se acopla directamente al generador 202. Una transmisión alternativa también puede proporcionarse en el árbol de baja velocidad para accionar el generador 202 como sea requerido.

Unos efectos resonantes (por ejemplo, corrientes resonantes) pueden ocurrir entre el inductor 216, el transformador 220 y el condensador 218. Para proporcionar amortiguación de resonancia activa para las corrientes resonantes (es decir disminuir las corrientes resonantes), un controlador 228 puede añadirse al sistema eléctrico 200, como se muestra en la Figura 2b. El controlador 228 puede ser el controlador de potencia para el convertidor de tensión 200. En una realización, el controlador 228 puede implementarse en el convertidor de tensión 200. El controlador 228 puede implementarse en hardware, software o una combinación de hardware y software. Como ejemplo, el controlador 228 puede ser un controlador digital, con el algoritmo implementado en software.

La Figura 2a muestra una ilustración ejemplar de una implementación de única fase del convertidor de tensión 200 y la disposición de filtro 212. Una implementación de tres fases puede usarse. Para la implementación de tres fases, el generador 202 tiene tres terminales de salida que se conectan a tres terminales de entrada correspondientes del convertidor de tensión 200. De manera similar, el convertidor de tensión 200 tiene tres terminales de salida 230 que se conectan a la red de potencia 210 mediante tres inductores 216, tres disposiciones de filtro 212 y un transformador trifásico 220. En una realización, cada disposición de filtro 212 tiene un condensador 218 conectado entre el punto de acoplamiento 219 y el punto de referencia de tierra 226 resultando en una configuración conectada de "estrella". En otra realización, el condensador 218 de cada disposición de filtro 212 puede conectarse en una configuración delta. Así, existen tres líneas de potencia 214 que conectan el convertidor de tensión 200 al transformador 212. La tensión de línea puede obtenerse mediante una medición directa de las tensiones de línea trifásica, o deducirse de las tensiones por los condensadores individuales de la disposición de filtro 212 si estos condensadores se conectan en la configuración de "estrella". En cualquier caso, la tensión de cancelación ideal se deducirá de la tensión de línea.

En la siguiente descripción, un antecedente teórico para realizaciones de la presente invención se proporciona.

En referencia la Figura 2b, de acuerdo con una realización de la presente invención, una tensión de línea se determina midiendo una tensión en el punto de acoplamiento 219 (es decir, una tensión que cae por la disposición de filtro 212). En una realización, si la disposición de filtro 212 solo incluye el condensador 218 (como se muestra en las Figuras 2a y 2b), la tensión que cae por la disposición de filtro 212 puede ser la tensión (U_{con}) que cae por el condensador 218. Es decir, para una implementación de única fase como se muestra en las Figuras 2a y 2b, la tensión de línea puede ser la tensión (U_{con}) que cae por el condensador 218 (por ejemplo la disposición de filtro 212). Para una implementación trifásica, la tensión de línea puede ser la tensión que cae por dos condensadores 218 (por ejemplo dos disposiciones de filtro 212) dispuestos en configuración delta. La tensión de línea determinada se añade a la salida 230 del convertidor de tensión 200 (por ejemplo la primera parte 214a de la línea de potencia 214) con un retraso temporal. Es decir, la tensión de línea determinada se añade a una señal de tensión de salida (U_v) del convertidor de tensión 200 con un retraso temporal. Esto puede realizarse por el controlador 228 eligiendo una señal PWM que controla el convertidor de tensión 200 de manera que una tensión de cancelación adicional se aplica a la salida 230 del convertidor de tensión 200.

Por fines de ilustración, un caso de única fase se presenta aquí donde la tensión de línea puede mencionarse como la tensión (U_{con}) que cae por el condensador 218 en la siguiente descripción. Sin embargo, como entenderá el experto en la materia, la tensión de línea no se limita a la tensión (U_{con}) que cae por el condensador 218 para un sistema trifásico. En el caso de un sistema trifásico, las tensiones de línea obtenidas se usarán para derivar la tensión de cancelación ideal por consiguiente; y la tensión de cancelación ideal se definirá como la tensión cuando se aplica por sí misma sin retraso a los terminales 222 de los inductores 216 que dará como resultado una caída de tensión cero por los inductores 216 y no producirá así ningún cambio de corriente en los inductores 216 (tres inductores para un sistema trifásico).

Si la tensión de cancelación aplicada es exactamente igual (es decir si U_v aplicada en el primer terminal 222 del inductor 216 es exactamente igual a U_{con} aplicada en el segundo terminal 224 del inductor 216), una cancelación de tensión exacta de U_v y U_{con} retirará los efectos de U_{con} completamente del inductor 216. Sin embargo, si la cancelación de tensión no es perfecta con U_v diferente de U_{con} , y U_v que es una salida muestreada y discreta de U_{con} y retrasada por un retraso temporal $t_{retraso}$, la tensión por el inductor 216 será una señal de tensión (ignorando la realimentación de corriente desde el controlador) obtenida desde una diferencia entre U_{con} y U_v , y se suministrará a un integrador formado por el inductor 216. El integrador de inductancia puede reproducir una corriente (i_G) en el inductor 216 (como se muestra en la Figura 2b) que está en anti-fase con la señal de tensión U_{con} . La corriente (i_G) puede ser equivalente a una corriente o incluir una corriente (es decir la corriente de amortiguación) que fluiría a través de un resistor ficticio ($R_{CON,ficticio}$) conectado en paralelo con la disposición de filtro 212 (por ejemplo el condensador 218 de la disposición de filtro 212).

La anterior descripción se ilustra por las siguientes ecuaciones y aproximación:

$$\begin{aligned}
 i_G &= \frac{1}{L} \cdot \int -U_{CON}(\tau) + U_v(\tau) d\tau \\
 &= \frac{1}{L} \cdot \int -U_{CON}(\tau) + U_{CON}(\tau - t_{retraso}) d\tau \quad (1) \\
 &= \frac{1}{L} \cdot \int -\frac{\Delta U_{CON}}{t_{retraso}} \cdot t_{retraso} d\tau \\
 &\cong -\frac{t_{retraso}}{L} \cdot \int \frac{dU_{CON}}{d\tau} d\tau \\
 &= -\frac{t_{retraso}}{L} \cdot U_{CON} = -\frac{U_{CON}}{R_{CON,ficticio}}
 \end{aligned}$$

en el que $U_{CON}(\tau)$ representa la caída de tensión por el condensador en el instante τ , $U_v(\tau)$ representa la señal de tensión de salida del convertidor de tensión en el instante τ , que es aproximadamente igual a $U_{CON}(\tau - t_{retraso})$, $t_{retraso}$ es el retraso temporal y L es la inductancia del inductor.

Así, añadir la tensión de línea determinada (por ejemplo tensión (U_{con}) que cae por el condensador 218, a la señal de tensión de salida (U_v) del convertidor de tensión 200 con el retraso temporal produce aproximadamente un efecto de amortiguador de un resistor ficticio conectado en paralelo con la disposición de filtro 212 (por ejemplo condensador 218 de la disposición de filtro 212). El resistor ficticio puede derivarse como sigue.

$$R_{CON_ficticio} \cong \frac{L}{t_{retraso}} \quad (2)$$

5 Tal método puede permitir la creación de una corriente de amortiguación como se ha descrito antes sin el control de corriente continua y puede lograr una amortiguación mejorada (es decir, corrientes de máximo transitorias más bajas).

La tensión de línea determinada (por ejemplo tensión (U_{CON})) que cae por el condensador con el retraso temporal puede aproximarse usando la siguiente serie de MacClaurin o Taylor:

$$10 \quad U_{CON}(t + t_{predic.}) = U_{CON}(t) + \frac{dU_{CON}}{dt}(t) \cdot \frac{t_{predic.}}{1!} + \frac{d^2U_{CON}}{dt^2}(t) \cdot \frac{t_{predic.}^2}{2!} + \frac{d^3U_{CON}}{dt^3}(t) \cdot \frac{t_{predic.}^3}{3!} + .. \quad (3)$$

en el que U_{CON} es la caída de tensión por el condensador, y t_{predic} representa un parámetro de optimización que modifica o ajusta el retraso temporal con el que la tensión que cae por el condensador se aplica a la primera parte de la línea de potencia.

15 Las derivadas de la serie de MacClaurin o Taylor mostradas en la ecuación (3) pueden no ser aplicables para un sistema discreto. Para sistemas discretos, las derivadas de la serie de MacClaurin o Taylor mostradas en la ecuación (3) pueden aproximarse por diferencias de órdenes mayores. Dada una secuencia de tensiones de red $V(n)$, $V(n-1)$, $V(n-2)$,..., cada orden de derivada de la serie de MacClaurin o Taylor se aproxima de acuerdo con las siguientes fórmulas

$$20 \quad \begin{aligned} D1(n) &= V(n) - V(n-1); \\ D2(n) &= D1(n) - D1(n-1); \\ D3(n) &= D2(n) - D2(n-1); \end{aligned} \quad (4)$$

$$25 \quad \dots$$

$$Dm(n) = Dm-1(n) - Dm-1(n-1).$$

30 en el que $D1(n)$, $D2(n)$, $D3(n)$, ... , $Dm(n)$ representan la aproximación discreta para las derivadas primera a m-ésima de la serie de MacClaurin o Taylor respectivamente, $V(n)$ representa la tensión por el condensador de la muestra n-ésima y $V(n-1)$ representa la tensión por el condensador de la muestra (n-1)ésima.

Para sistemas discretos, la serie de MacClaurin o Taylor puede representarse usando la siguiente ecuación:

$$35 \quad V(t_{predicción}) = V(n) + D1(n) \cdot (t_{predicción}) + D2(n) \cdot (t_{predicción}^2/2) + D3(n) \cdot (t_{predicción}^3/(3.2)) + \quad (5)$$

en el que $V(t_{predicción})$ representa la tensión aproximada por el condensador en el momento $t_{predicción}$ desplazado en el tiempo desde el momento de aparición de $V(n)$, $V(n)$ representa la tensión por el condensador de la muestra n-ésima y $t_{predicción}$ es un parámetro de optimización que modifica o ajusta el retraso temporal con el que la tensión que cae por el condensador se aplica a la primera parte de la línea de potencia.

Así, para sistemas discretos, el retraso temporal puede determinarse basándose en la anterior ecuación (5). La ecuación (5) puede calificarse como una serie de transformaciones discretas.

45 Unas simulaciones experimentales se realizaron con un valor fijo de $t_{predicción}$ (y de esta manera para un retraso temporal fijo) para diferentes órdenes de derivadas de la ecuación (5). Los resultados experimentales muestran que usando al menos los términos hasta el 3º orden de derivada de la ecuación (5) se proporciona mejores resultados de amortiguación. Así, al menos los términos hasta el 3º orden de derivada de la ecuación (5) se usan para determinar el retraso temporal. Es decir, la serie de transformaciones discretas (por ejemplo ecuación (5)) tiene un orden de al menos 3.

55 La Figura 3 muestra un diagrama de flujo 300 de un método para operar una turbina eólica de acuerdo con una realización de la presente invención. En 302, una tensión de línea se determina. En 304, la tensión de línea determinada se añade a una salida de un convertidor de tensión con un retraso temporal. El retraso temporal se ajusta de manera que los efectos resonantes que ocurren en la disposición de filtro disminuyen.

En más detalle, la tensión de línea puede muestrearse a intervalos de tiempo regulares para generar una pluralidad de muestras de tensión. Una tensión de cancelación puede generarse en función de la pluralidad de muestras de tensión. En una realización, la tensión de cancelación puede calcularse desde una combinación lineal de diferentes valores de muestra de tensión que se ponderan mediante respectivos coeficientes de ponderación de muestra de tensión. Algunos de los coeficientes de ponderación de muestra de tensión respectivamente dependen de un

parámetro de optimización $t_{predicción}$ que ajusta el retraso temporal con el que la tensión de línea determinada se aplica a la salida del convertidor de tensión. La tensión de cancelación puede calcularse en función de la ecuación (5). La tensión de cancelación puede añadirse directamente a la salida del convertidor de tensión. La tensión de cancelación puede actualizarse a intervalos de tiempo regulares.

En una realización, la tensión de cancelación puede generarse modificando una señal de control de convertidor de tensión.

La Figura 4 muestra una posible realización del controlador 228 utilizable para operar una turbina eólica de acuerdo con una realización de la presente invención. El controlador 228 incluye una unidad de entrada 402 configurada para recibir una señal 406 indicativa de una tensión de línea. El controlador 228 también incluye una unidad de control 404 acoplada a la unidad de entrada 402. La unidad de control 404 se configura para controlar un proceso de añadir la tensión de línea indicada por la señal recibida a una salida de un convertidor de tensión con un retraso temporal, y ajustar el retraso temporal de manera que los efectos resonantes (como corrientes) en la disposición de filtro (por ejemplo un condensador) disminuyen. En una realización, la unidad de control 404 puede emplear una señal 408 indicativa de una tensión de línea con el retraso temporal.

La Figura 5 muestra una posible realización del controlador 228 mostrado en la Figura 4. En la Figura 5, un diagrama de bloques de un controlador 228 acoplado a la disposición de filtro 212 se muestra. En una realización, la disposición de filtro 212 incluye el condensador 218. La disposición de filtro 212 se acopla al inductor 216 y el transformador 220. El controlador 228 incluye una unidad de entrada 502 que recibe una señal (S1) indicativa de una tensión de línea (por ejemplo la tensión que cae por el condensador 218). La señal (S1) puede ser una señal de muestreo que resulta de un proceso de muestreo que muestrea la tensión de línea a intervalos de tiempo regulares. El controlador 228 incluye una unidad de control 504 acoplada a la unidad de entrada 502. La unidad de control 504 recibe la señal (S1) desde la unidad de entrada 502. La unidad de control 504 puede determinar un retraso temporal ($t_{predicción}$) a aplicar a la señal recibida (S1) en función de la ecuación (5).

El retraso temporal puede ajustarse de manera que las corrientes resonantes en la disposición de filtro 212 (o más específicamente, entre el inductor 216, el transformador 220 y el condensador 218) disminuyen. El retraso temporal puede ajustarse de manera que una amortiguación óptima o casi óptima se logra. Los resultados desde simulaciones experimentales muestran que los resultados de amortiguación mejoran cuando el retraso temporal se incrementa hasta que una amortiguación óptima o casi óptima se logra en un valor particular del retraso temporal. Los resultados de amortiguación se deterioran si el retraso temporal se incrementa a un valor que es mayor que el valor particular del retraso temporal. Por tanto, en situaciones de resonancia diferentes, una amortiguación óptima o casi óptima puede lograrse ajustando el retraso temporal con antelación o en tiempo real.

La unidad de control 504 puede generar una señal (S2) indicativa de una tensión de cancelación en función de la señal de muestreo (S1). La unidad de control 504 puede calcular la tensión de cancelación desde una combinación lineal de diferentes valores de muestra de tensión que se ponderan mediante respectivos coeficientes de ponderación de muestra de tensión. Algunos de los coeficientes de ponderación de muestra de tensión dependen respectivamente de un parámetro de optimización $t_{predicción}$ que ajusta el retraso temporal con el que la tensión de línea determinada se aplica a la salida del convertidor de tensión. La unidad de control 504 puede calcular la tensión de cancelación en función de la ecuación (5). La unidad de control 504 puede añadir la señal de tensión de cancelación (S2) a la salida 230 del convertidor de tensión 200, es decir la señal de tensión de salida (U_v) del convertidor de tensión 200. El proceso de generar una señal de tensión de cancelación (S2) en función de la señal de muestreo y añadir la señal de tensión de cancelación (S2) a la salida 230 del convertidor de tensión 200 puede repetirse.

La señal de tensión de cancelación (S2) puede suministrarse a una unidad modulada por ancho de pulsos (PWM) 506 y la unidad PWM 506 puede enviar, por ejemplo, una señal PWM (S_{PWM}).

El bloque 228 representa un controlador de corriente para la corriente de inductor i_1 del inductor 216 en función de la realimentación de corriente. El bloque 228 detecta la corriente de inductor i_1 obtenida por medición de corriente, muestrea la corriente de inductor i_1 a través de un bloque de muestreo 508 (es decir la realimentación de corriente), y obtiene una diferencia de la corriente de inductor i_1 y una corriente de inductor de referencia i_{1_Ref} usando un bloque de confluencia de suma 510. El bloque 228 tiene un bloque compensador (KP_GCC) 512 que proporciona una señal de salida en función de la diferencia obtenida. La señal de salida del bloque compensador (KP_GCC) 512 puede añadirse a la señal de tensión de cancelación (S2) usando un bloque de confluencia de suma 514. La señal combinada de la señal de salida del bloque compensador (KP_GCC) 512 y la señal de tensión de cancelación (S2) puede convertirse a una señal de salida PWM (S_{PWM}) usando la unidad PWM 506. En resumen, el bloque 228 representa un posible controlador de realimentación que trabaja continuamente, operando sin o con la presencia de la tensión de cancelación mencionada para la amortiguación. La tensión de cancelación calculada basándose en la ecuación (5) se añade a una tensión de orden del bloque 228 (por ejemplo tensión de salida del convertidor de tensión 200). La corriente de inductor de referencia i_{1_REF} , el bloque compensador KP_GCC 512 y el bloque de muestreo 508 para la corriente de inductor i_1 no afectan al procesamiento del retraso temporal. El muestreo de la tensión de línea (por ejemplo U_{con}), que es parte de la señal de tensión de cancelación (S2) y la unidad PWM 506 pueden afectar al valor óptimo para $t_{predicción}$ en la ecuación (5). Los factores de afectación debido al muestreo de la tensión de línea y la unidad

PWM 506 se tienen en cuenta durante la simulación, y la óptima $t_{predicción}$ se obtiene en condiciones deseadas del índice de muestreo de la señal de muestreo (S1) así como el retraso PWM.

5 En una realización, la unidad de control 504 puede generar una señal de control que controla una unidad de generación de tensión para generar la tensión de cancelación que se añade directamente a la salida del convertidor de tensión. En una realización, la unidad de generación de tensión (no se muestra) puede implementarse en la unidad de control 504 (es decir una unidad integral de la unidad de control 504). En otra realización, la unidad de generación de tensión (no se muestra) puede ser una unidad separada que se acopla a la unidad de control 504.

10 En otra realización, en referencia a la Figura 2b, la unidad de control 504 puede generar una señal de control que modifica una señal de control del convertidor de tensión 200 de manera que la tensión de salida del convertidor de tensión 200 tiene un componente de tensión de cancelación adicional.

15 De nuevo en referencia a la Figura 2b, el controlador 228 puede enviar la señal PWM (S_{PWM}) al convertidor de tensión 200 (por ejemplo el convertidor de tensión de CC a CA 206 del convertidor de tensión 200). La señal PWM (S_{PWM}) puede ser equivalente a o puede incluir la señal (S2) con el retraso temporal. La señal PWM (S_{PWM}) puede ajustar la señal de tensión de salida (U_v) del convertidor de tensión 200 de manera que la señal de tensión de cancelación (S2) se añade a la señal de tensión de salida (U_v) del convertidor de tensión 200. La señal de tensión de salida (U_v) del convertidor de tensión 200 puede así modificarse. Una señal de corriente de salida del convertidor correspondiente a
 20 la señal de tensión de salida del convertidor modificada puede enviarse. La señal de corriente de salida del convertidor puede incluir una corriente de amortiguación para disminuir las corrientes resonantes que ocurren entre el inductor 216, el condensador 218 y el transformador 220. En una realización, la corriente de amortiguación puede aplicarse por la disposición de filtro 212. La corriente de amortiguación puede producir aproximadamente un efecto de amortiguación de un resistor ficticio conectado en paralelo con la disposición de filtro 212 (por ejemplo el condensador
 25 218 de la disposición de filtro 212).

El método antes descrito proporciona un enfoque de amortiguación activa sin control de corriente para control de anti-resonancia. El método antes descrito permite que la amortiguación activa se aplique con un ancho de banda de controlador de corriente menor. El método antes descrito logra la amortiguación ajustando un valor de retraso temporal, y permite la optimización del controlador resultando en la posibilidad de reducción de capacitancia de red (es decir, permite usar una capacitancia menor, y la capacitancia menor puede ser de aproximadamente un 60 % de reducción de la capacitancia usada generalmente). El dimensionamiento del filtro de resonancia pasivo puede reducirse o el filtro de resonancia pasivo puede retirarse. El método antes descrito puede proporcionar un control más robusto y estable del lado de línea del convertidor conectado entre la turbina eólica y la red de potencia.
 30

35 Unas variaciones y modificaciones son posibles dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un método para operar una turbina eólica que comprende un convertidor de tensión (200), siendo el convertidor de tensión (200) conectable a una red de potencia (210) mediante una disposición de filtro (212) y al menos un inductor (216), comprendiendo el método:
- determinar una tensión de línea en un punto de acoplamiento (219) entre la disposición de filtro y la red de potencia;
 - muestrear la tensión de línea a intervalos de tiempo regulares para generar una señal de muestreo (S1) indicativa de la tensión de línea;
 - calcular una tensión de cancelación desde una serie de transformaciones discretas que comprende una combinación lineal de diferentes valores de muestra de tensión de la señal de muestreo (S1) ponderada mediante respectivos coeficientes de ponderación de muestra de tensión, en el que algunos de los coeficientes de ponderación de muestra de tensión dependen respectivamente del parámetro de optimización ($t_{predicción}$) que ajusta un retraso temporal con el que la tensión de línea determinada se aplica a una señal de tensión de salida (Uv) del convertidor de tensión;
 - generar una señal de tensión de cancelación (S2) indicativa de la tensión de cancelación calculada;
 - generar una señal modulada por ancho de pulsos (SPWM) que incluye la señal de tensión de cancelación (S2) con el retraso temporal;
 - modificar la señal de tensión de salida (Uv) con la señal modulada por ancho de pulsos (SPWM) de manera que la señal de tensión de cancelación (S2) se añade a la señal de tensión de salida (Uv);
 - enviar una señal de corriente de salida de convertidor correspondiente a la señal de tensión de salida modificada (Uv), comprendiendo la señal de corriente de salida de convertidor una corriente de amortiguación que produce un efecto de amortiguación de un resistor ficticio ($R_{CON, ficticio}$), que depende de un valor de inductancia (L) del al menos un inductor (216) y el parámetro de optimización ($t_{predicción}$), y se conecta en paralelo con la disposición de filtro (212);
- en el que el parámetro de optimización ($t_{predicción}$) se determina ajustando el retraso temporal en una simulación basada en la serie de transformaciones discretas, hasta que los efectos resonantes simulados que ocurren en la disposición de filtro (212) disminuyen.
2. El método de la reivindicación 1, en el que la serie de transformaciones discretas tiene un orden de al menos 3.
3. El método de la reivindicación 2, en el que la tensión de cancelación se genera modificando una señal de control de convertidor de tensión.
4. Un controlador utilizable para operar una turbina eólica que comprende un convertidor de tensión (200), siendo el convertidor de tensión (200) conectable a una red de potencia (210) mediante una disposición de filtro (212) y al menos un inductor (216), comprendiendo el controlador:
- una unidad de entrada que está configurada para recibir una señal de muestreo (S1) indicativa de una tensión de línea, siendo la tensión de línea una tensión en un punto de acoplamiento (219) entre la disposición de filtro y la red de potencia, la señal de muestreo;
 - una unidad de control acoplada a la unidad de entrada, estando la unidad de control configurada para calcular una tensión de cancelación desde una serie de transformaciones discretas que comprende una combinación lineal de diferentes valores de muestra de tensión de la señal de muestreo (S1) ponderada por coeficientes de ponderación de muestra de tensión respectivos, en el que algunos de los coeficientes de ponderación de muestra de tensión dependen respectivamente de un parámetro de optimización ($t_{predicción}$) que ajusta un retraso temporal con el que la tensión de línea se aplica a una señal de tensión de salida (Uv) del convertidor de tensión;
 - generar una señal de tensión de cancelación (S2) indicativa de la tensión de cancelación calculada;
 - generar una señal modulada por ancho de pulsos (SPWM) que incluye la señal de tensión de cancelación (S2) con el retraso temporal;
 - modificar la señal de tensión de salida (Uv) con la señal modulada por ancho de pulsos (SPMW) de manera que la señal de tensión de cancelación (S2) se añade a la señal de tensión de salida (Uv); y
 - enviar una señal de corriente de salida de convertidor correspondiente a la señal de tensión de salida modificada (Uv), comprendiendo la señal de corriente de salida de convertidor de salida una corriente de amortiguación que produce un efecto de amortiguación de un resistor ficticio ($R_{CON, ficticio}$), que depende de un valor de inductancia (L) del al menos un inductor (216) y el parámetro de optimización ($t_{predicción}$), y se conecta en paralelo con la disposición de filtro (212);
- en el que el parámetro de optimización ($t_{predicción}$) se determina ajustando el retraso temporal en una simulación basada en la serie de transformaciones discretas, hasta que los efectos resonantes simulados que ocurren en la disposición de filtro disminuyen.
5. El controlador de la reivindicación 4, en el que la señal de muestreo resulta de un proceso de muestreo que muestrea la tensión de línea a intervalos de tiempo regulares.

6. El controlador de la reivindicación 4, en el que la serie de transformaciones discretas tiene un orden de al menos 3.

7. El controlador de una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 6, en el que el controlador se implementa en hardware o software o en una combinación de hardware y software.

5

8. Una turbina eólica que comprende un controlador de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 7.

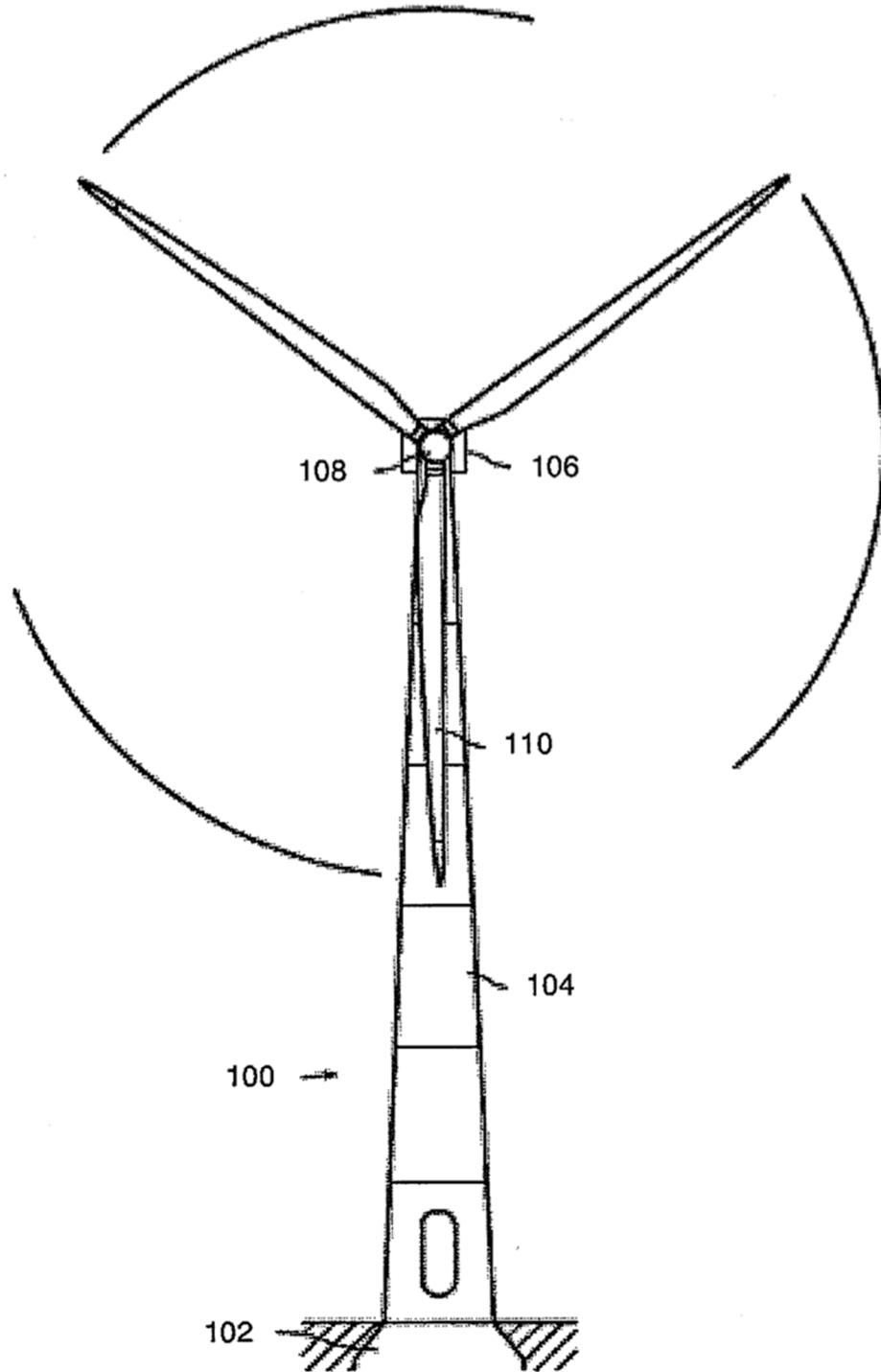


Figura 1

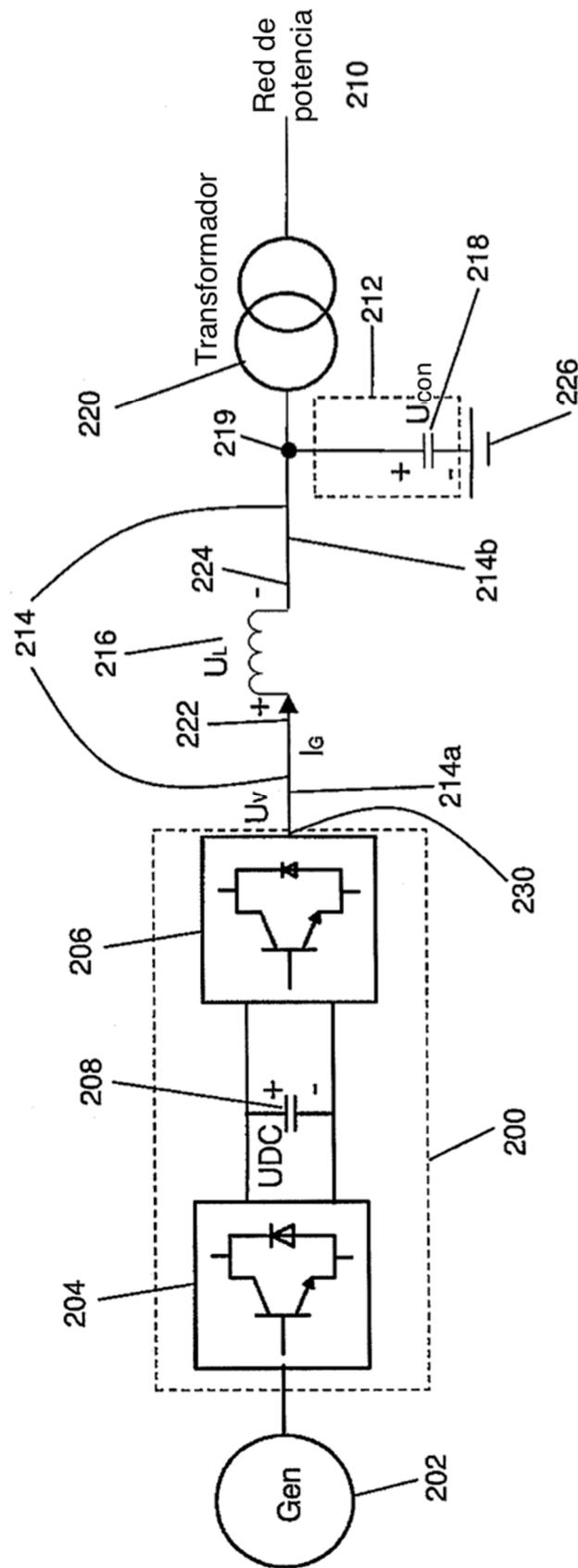


Figura 2a

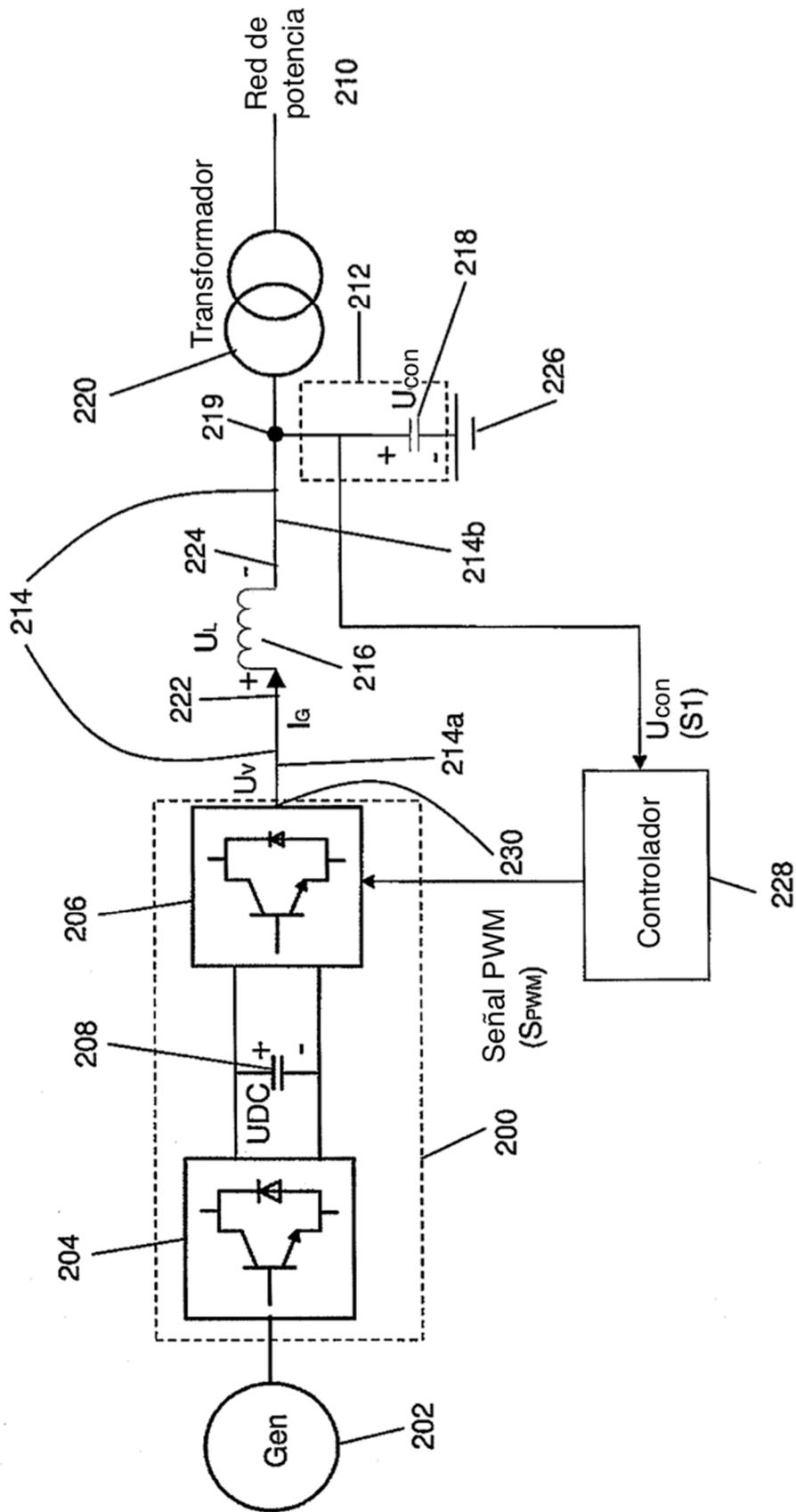


Figura 2b

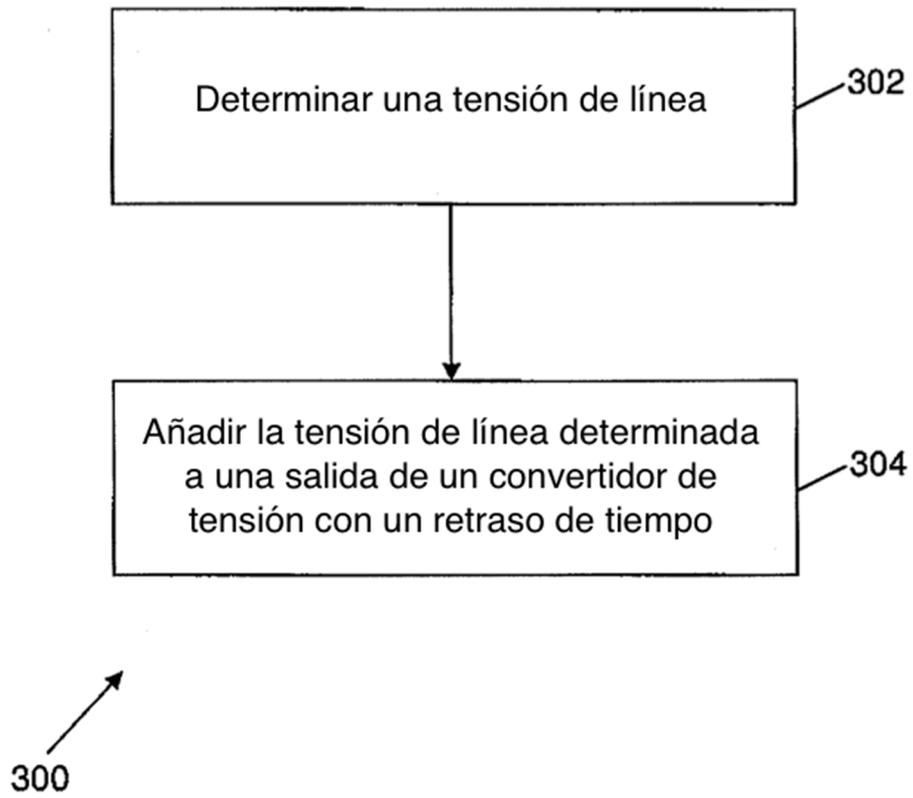


Figura 3

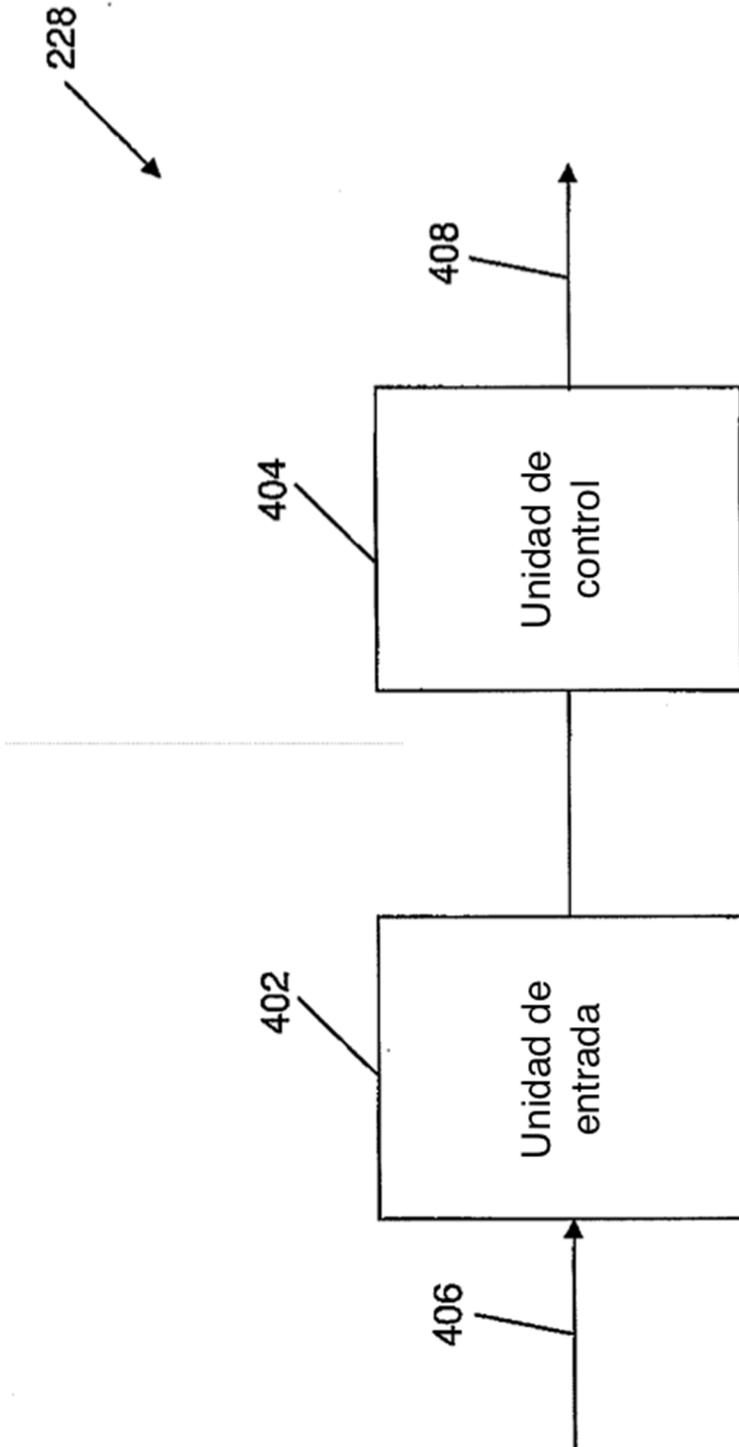


Figura 4

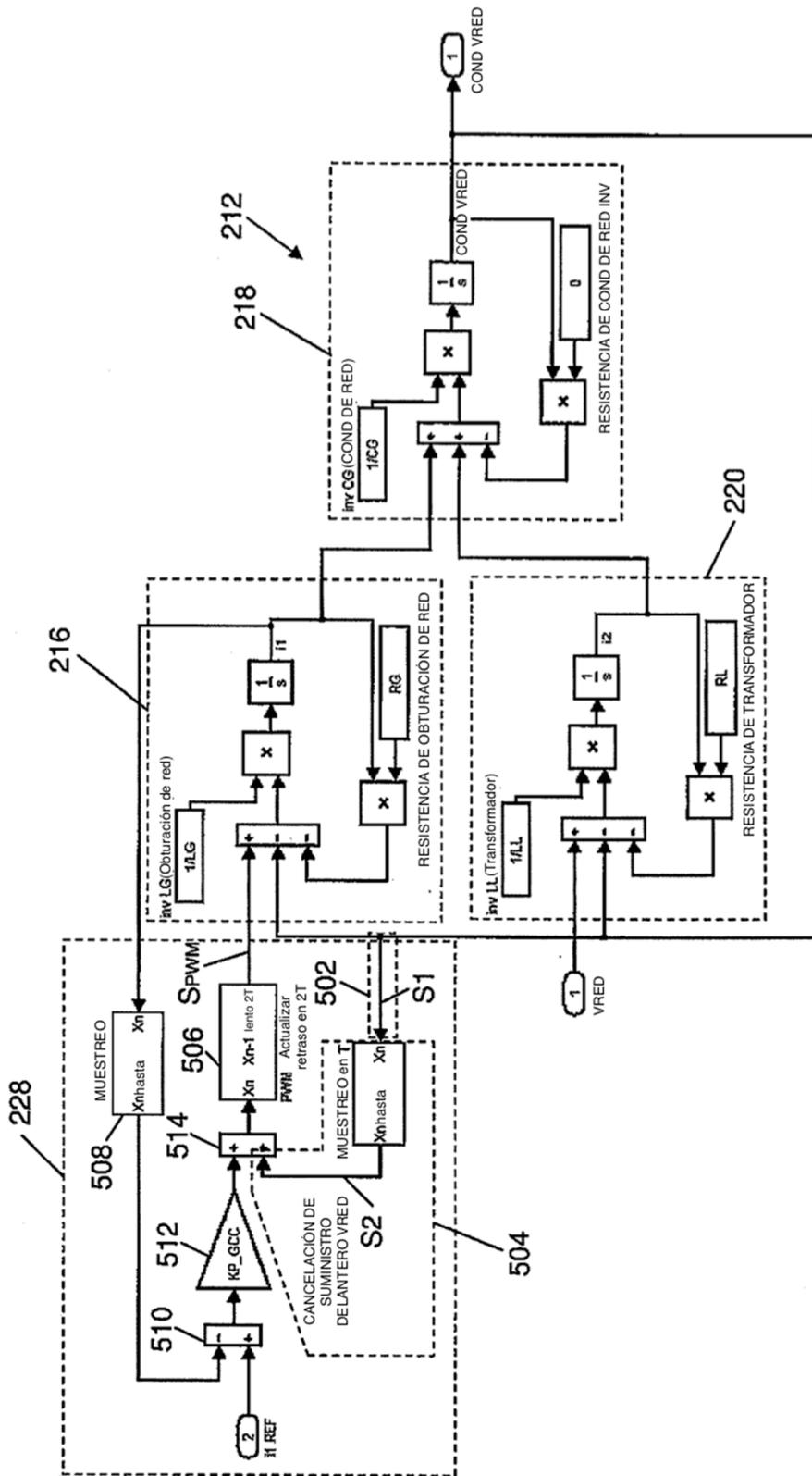


Figura 5