

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 975 415**

51 Int. Cl.:

**H02J 3/38** (2006.01)

**G01R 19/25** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.10.2018** **E 18382728 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.02.2024** **EP 3637574**

54 Título: **Método para estimar parámetros eléctricos de una red de distribución**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**05.07.2024**

73 Titular/es:

**UNIVERSIDADE DE VIGO (100.0%)**  
**Campus Universitario s/n**  
**36310 Vigo, ES**

72 Inventor/es:

**PÉREZ ESTÉVEZ, DIEGO y**  
**DOVAL GANDOY, JESÚS**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 2 975 415 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 estimar parámetros eléctricos de una red de distribución

**Campo técnico de la invención**

5 Esta invención pertenece al campo técnico de la estimación de parámetros eléctricos de una red de distribución y, más particularmente, al campo de detección de condiciones de isla y sintonización de un convertidor de potencia conectado a dicha red de distribución basándose en dichos parámetros estimados.

**Antecedentes de la invención**

10 Los inversores conectados a la red de distribución, que son un tipo de convertidor de potencia, pueden conectarse a una red de distribución principal o a una microrred de distribución mediante filtros LCL. Debe entenderse que la microrred de distribución es un elemento de la red de distribución principal. Comúnmente están comandadas por controladores lineales digitales que pueden contener controladores de corriente que, debido a la dinámica de alto orden y a la presencia de un modo resonante del filtro LCL, sufren reducciones en sus márgenes de estabilidad. Por el contrario, los filtros LCL están ganando popularidad gracias a sus ventajas en lo que se refiere a la atenuación del ruido de conmutación en comparación con los filtros L con la misma inductancia total.

15 Específicamente, durante el funcionamiento de un convertidor de fuente de tensión o VSC, el controlador de corriente experimenta una falta de rendimiento o incluso inestabilidad cuando los parámetros de configuración, que se usan para la sintonización, se desvían de sus valores nominales. Los parámetros de configuración que modelan el sistema físico son los valores reactivos del filtro LCL, los parámetros eléctricos de la red de distribución y la resistencia en serie equivalente ( $R_{ESR}$ ) del VSC.

20 Durante el funcionamiento de un convertidor de potencia debe tenerse en cuenta la presencia de cualquier condición de isla en una microrred de distribución, que debe entenderse como la situación en la que el convertidor de potencia alimenta una microrred de distribución a la que está conectado mientras la red de distribución principal está deshabilitada. La formación de islas puede ser peligrosa para los trabajadores de servicios públicos, quienes tal vez no se den cuenta de que la microrred de distribución todavía tiene energía. Por tanto, detectar tales condiciones de isla es esencial para evitar accidentes.

25 Se han desarrollado diversos métodos para identificar los parámetros de configuración durante el funcionamiento del VSC para detectar condiciones de isla y ajustar la sintonización del controlador de corriente para recuperar por tanto su rendimiento nominal.

Estos métodos pueden clasificarse en dos categorías principales:

- 30
- métodos que inyectan una señal periódica, tal como en el documento EP2827157 A1, en los que se inyecta una señal de frecuencia fundamental para realizar la estimación, y
  - métodos que inyectan una señal no periódica, por ejemplo en el documento EP1643256 A1, que da a conocer un método que fuerza una caída de tensión en la forma de onda de tensión de la red de distribución conectando una carga de impedancia muy baja durante un corto período de tiempo y la estimación de la impedancia de la red de
- 35

40 El problema que implican estos métodos es la alteración a la que está sometida la red de distribución. La inyección de una señal introduce componentes armónicas que pueden afectar a otros sistemas conectados a la red de distribución o a la microrred de distribución. Tales sistemas pueden tener medios de protección; es decir, cuando detectan la presencia de componentes armónicas se desconectan de la red de distribución para no sufrir daños. De este modo, aunque no puede verse afectado por alteraciones, en la práctica se disminuye la eficiencia del sistema.

El documento de patente US 2016/252588 A1 enseña el uso de observadores de estado, que emulan y observan una sección de un inversor acoplado a la red de distribución a través de un filtro LCL, para estimar la impedancia de red de distribución.

45 El artículo "An adaptive digital notch filter based on grid impedance estimation for improving LCL filter performance" publicado a nombre de Jing Yuan enseña el uso de un algoritmo de mínimos cuadrados recursivos para estimar la impedancia de red de distribución.

El artículo "Complex-space recursive least squares power system identification" publicado a nombre de Cobreces enseña un algoritmo general de mínimos cuadrados recursivos para estimar la impedancia de red de distribución a partir de las mediciones de corriente y tensión realizadas en el punto de acoplamiento común.

50 El artículo "Grid Impedance Estimation via Excitation of Filter Resonance", publicado a nombre de M. Liserre propone un método de estimación de la impedancia de red de distribución basándose en la inyección de una señal de excitación. Sin embargo, este método altera el funcionamiento normal de un convertidor de potencia para obtener una medición de la impedancia de red de distribución y es aplicable a convertidores que usan utilizan un modulador

PWM.

La presente invención resuelve los problemas anteriores mediante un método efectivo para estimar la impedancia de la red de distribución sin inyectar señales adicionales superpuestas a la tensión de entrada del convertidor de potencia.

## 5 Sumario de la invención

La presente invención proporciona una solución alternativa para los problemas mencionados anteriormente mediante un método para estimar los parámetros eléctricos de una red de distribución según la reivindicación 1, un método para detectar condiciones de isla según la reivindicación 7, un sistema según la reivindicación 11, un programa informático según la reivindicación 14 y un medio legible por ordenador según la reivindicación 15.

10 A lo largo de todo este documento se usan parámetros que se relacionan según una ecuación. Por tanto, existen muchas formas de expresar explícita o implícitamente la dependencia entre tales variables, siendo la forma más genérica  $f(x_1, x_2, x_3, \dots) = 0$ . Estas ecuaciones representan una relación funcional entre variables de modo que, cuando los valores adoptados por las variables resultantes son iguales, ambas expresiones deben considerarse equivalentes.

15 En un primer aspecto inventivo, la invención proporciona un método para estimar los parámetros eléctricos de una red de distribución según la reivindicación 1.

El método del primer aspecto inventivo también puede entenderse como un método implementado y ejecutado por un procesador, microprocesador, ordenador o cualquier otro dispositivo o sistema capaz de almacenar y procesar información, es decir, un método implementado por ordenador.

20 En primer lugar, el método comprende la fase de proporcionar un convertidor de potencia y un filtro LCL. A lo largo de todo este documento se entenderá por "convertidor de potencia" un dispositivo eléctrico para convertir energía eléctrica. Este término abarca desde simples transformadores que cambian la tensión de la potencia de CA en CC (o viceversa) hasta sistemas de gran complejidad. Por otro lado, como "filtro LCL" debe entenderse un filtro de tercer orden que comprende dos inductores y un condensador. El uso de tales filtros para conectar un convertidor de potencia a una red de distribución tiene la ventaja de filtrar las componentes armónicas absorbidas por el convertidor de potencia mientras se conecta a dicha red de distribución.

25 A continuación, el método comprende la fase de proporcionar un controlador digital que comprende medios de procesamiento configurados para estimar los parámetros eléctricos de una red de distribución, es decir, dichos medios de procesamiento comprendidos en el controlador digital están configurados para ejecutar el método de la presente invención. En particular, "controlador digital" puede entenderse como un medio de procesamiento en el que se implementa y ejecuta el método.

30 Tal controlador digital estima en la etapa a) la función de transferencia de todo el sistema; es decir, la combinación del convertidor de potencia, el filtro LCL y la red de distribución eléctrica. La estimación se realiza en tiempo real, es decir, mientras el convertidor de potencia está en funcionamiento y conectado a la microrred de distribución. Como función de transferencia se entenderá a la ecuación que define la relación entre la corriente medida en el lado de red de distribución  $i_i$  y la tensión de salida del convertidor de potencia  $v$ . Un experto en la técnica puede observar que esta relación puede expresarse como un modelo de ganancia de polo cero.

35 El método continúa en la etapa b) separando la función de transferencia mediante el controlador digital en dos factores diferentes, conocidos y desconocidos. Implica la ventaja de trabajar con expresiones más simples disminuyendo la complejidad del cálculo.

40 Después de eso, el controlador digital convierte la ecuación del factor desconocido de la función de transferencia en una expresión racional con varios coeficientes desconocidos en la etapa c). En la etapa d), el controlador digital estima estos coeficientes por medio de un algoritmo de estimación "de mínimos cuadrados recursivos" o RLS. Este algoritmo se entenderá como un algoritmo que recibe dos señales  $i_i$  y  $v_i$ , siendo  $i_i$  la corriente medida del lado de red de distribución  $i_i$  filtrada por un filtro de muesca y siendo  $v_i$  la tensión de salida del convertidor de potencia  $v$  filtrada también mediante un filtro de muesca y por el factor conocido calculado en la etapa b), para estimar los coeficientes de una función, es decir, la expresión racional del factor desconocido, que son los mejor ajustados para tales señales. El término "recursivo" se refiere a la memoria del algoritmo; es decir, durante su ejecución considera no sólo las muestras de la señal de corriente recibidas sino también las muestras de los momentos de tiempo anteriores.

45 A lo largo de todo este documento se entenderá por "frecuencia fundamental de la red de distribución" la frecuencia a la que la red de distribución alcanza la mayor amplitud, preferentemente 50 ó 60 Hz, y como "filtro de muesca" se entenderá un filtro de eliminación de banda que atenúa las frecuencias que pertenecen a una banda estrecha.

50 La fase final del método, etapa e), comprende obtener los parámetros eléctricos de la red de distribución mediante el controlador digital teniendo en cuenta los coeficientes mencionados anteriormente, considerando las condiciones de

5 CC, conectando y desconectando el convertidor de potencia de la red de distribución y aplicando los valores conocidos de las componentes del filtro LCL y el período de muestreo del convertidor de potencia. A lo largo de todo este presente documento se entenderá por “período de muestreo” el período conocido en el que funciona el convertidor de potencia; por ejemplo, el algoritmo de RLS se ejecuta con esta periodicidad. Un experto en la técnica sabría que el período es la inversa de la frecuencia, siendo el término “frecuencia de muestreo” equivalente a realizar únicamente la inversa del período. En un ejemplo particular, la frecuencia de muestreo pertenece al intervalo de 1 kHz a 100 kHz.

10 La principal ventaja del método de la invención es que no es necesario inyectar ninguna señal a la red de distribución que conduzca a componentes armónicas que puedan afectar a otros sistemas conectados a tal red de distribución. De este modo, es posible mejorar el rendimiento del sistema a pesar del filtro LCL requerido y detectar condiciones de isla para proteger a los trabajadores de servicios públicos mientras se mantiene la eficiencia del sistema.

En una realización particular, el método comprende además *una subetapa entre las fases d-ii) y d-iii) de filtrar  $v_r$  e  $i_r$  con un filtro de paso bajo.*

15 A lo largo de todo este documento, se entenderá por “filtro de paso bajo” un filtro que deja pasar las frecuencias por debajo de un determinado umbral y atenúa las frecuencias por encima de tal umbral. El uso de filtros de paso bajo implica la ventaja de eliminar componentes de alta frecuencia no deseadas, por ejemplo, ruido.

En una realización particular, *el convertidor de potencia es un convertidor de fuente de tensión, VSC, modelado como un retenedor de orden cero, ZOH, en serie con la resistencia en serie equivalente  $R_{ESR}$ .*

20 A lo largo de todo este documento, se entenderá por “convertidor de fuente de tensión” un convertidor que genera una tensión alterna variable en amplitud y fase a partir de una tensión continua; se entenderá por “retenedor de orden cero” un modelo matemático de un convertidor CC-CA para transformar una señal de tiempo discreto en una señal de tiempo continuo manteniendo cada valor de muestra durante un intervalo de muestra; y se entenderá por “resistencia en serie equivalente” una componente que, junto con otros condensadores e inductores, modela aproximadamente el comportamiento de un circuito eléctrico.

25 En una realización particular, *el método comprende además las etapas siguientes:*

- *reajustar los parámetros intrínsecos del controlador de corriente basándose en los parámetros físicos calculados,*
- *después de un periodo de optimización,  $t_o$ , realizar las etapas a) a e) del método obteniendo una actualización de los parámetros físicos y realizar la etapa anterior con los parámetros físicos actualizados.*

30 Los parámetros intrínsecos del controlador de corriente deben entenderse como los parámetros que definen su ancho de banda y su robustez. Ventajosamente, el método para estimar la impedancia de red de distribución se usa para reajustar periódicamente algunos parámetros del controlador de corriente para mejorar la respuesta transitoria y el rendimiento en estado estacionario. La periodicidad se define mediante un período de optimización, que es seleccionable. En un ejemplo particular, dicho período de optimización es de cinco segundos.

35 Los parámetros intrínsecos del controlador de corriente que se modifican definen su ancho de banda y su robustez. Son variables, es decir, dependen del tipo de controlador de corriente que compone el controlador digital.

En una realización particular, *los parámetros intrínsecos del controlador de corriente son una ganancia proporcional  $K_p$  y una ganancia integral  $K_i$ .*

40 Cuando el controlador digital es un controlador proporcional-integral, PI, o un controlador proporcional-resonante, PR, los parámetros de su controlador de corriente que pueden reajustarse según la impedancia de red de distribución estimada son dos tipos de ganancias: una ganancia proporcional  $K_p$  y una ganancia integral  $K_i$ .

45 A lo largo de todo este documento se entenderá por controlador “proporcional-integral” un controlador de primer orden y “proporcional-resonante” un controlador de segundo orden. El orden de un controlador es el orden más alto de la ecuación diferencial que describe tal controlador o, de manera equivalente, el número de polos de su función de transferencia.

Cuando el controlador digital usado es uno de orden superior, es decir, al menos de tercer orden; por ejemplo, un controlador de espacio de estados o un controlador predictivo, los parámetros que pueden reajustarse son las ecuaciones que describen su modelo de planta. En este caso, los parámetros  $R_g$  y  $L_g$  se actualizan según los valores obtenidos por el método.

50 En una realización particular, *en las etapas a) y e-ii) el convertidor de potencia se conecta a la red de distribución por medio de un elemento conmutador y en la etapa e-i) el convertidor de potencia se desconecta de la red de distribución y se cortocircuita su salida por medio de dicho elemento conmutador.*

A lo largo de todo este documento, se entenderá por “elemento conmutador” un dispositivo configurado para

interrumpir la corriente de un circuito eléctrico o para desviarla de un conductor a otro.

El conmutador permite conectar y desconectar el convertidor de potencia de la red de distribución de manera rápida y fácil.

5 En un segundo aspecto inventivo, la invención proporciona *un método para detectar condiciones de isla de una red de distribución que comprende las etapas siguientes:*

1) *realizar el método para estimar los parámetros eléctricos de la red de distribución según cualquiera de las realizaciones del primer aspecto inventivo,*

2) *almacenar los parámetros físicos dentro de una memoria,*

10 3) *después de un periodo de determinación,  $t_d$ , realizar las etapas a) a e) del método para estimar los parámetros eléctricos de una red de distribución según cualquiera de las realizaciones del primer aspecto inventivo, obteniendo una actualización de los parámetros físicos,*

4) *comparar los parámetros físicos almacenados y los parámetros físicos actualizados,*

5) *si las variaciones entre los parámetros físicos almacenados y los parámetros físicos actualizados son mayores que un umbral, emitir una alarma, al detectarse condiciones de isla.*

15 En una realización, *si las variaciones entre los parámetros físicos y los parámetros físicos actualizados son menores o iguales que el umbral, realizar iterativamente las etapas siguientes:*

i) *almacenar los parámetros físicos actualizados, y*

ii) *repetir las etapas 3) a 5) hasta que los parámetros físicos almacenados y los parámetros físicos actualizados sean mayores que el umbral.*

20 Puede apreciarse que en la etapa 4) de las realizaciones previas anteriores se realiza una comparación entre los parámetros físicos almacenados y los parámetros físicos actualizados. En el caso de la primera realización, los parámetros físicos almacenados se refieren a los parámetros almacenados en la etapa 2). En el caso de la segunda realización, los parámetros físicos almacenados se refieren a los parámetros almacenados en la etapa i). En ambos casos, los *parámetros físicos almacenados* usados en la etapa 4) se refieren a los últimos parámetros físicos almacenados mediante cualquiera de las realizaciones del método del segundo aspecto inventivo.

25 El método del segundo aspecto inventivo también puede entenderse como un método implementado y ejecutado por un procesador, microprocesador, ordenador o cualquier otro dispositivo o sistema capaz de almacenar y procesar información, es decir, un método implementado por ordenador.

30 A lo largo de todo este documento, se entenderá por "memoria" cualquier tipo de dispositivo configurado para almacenar información, es decir, medios de almacenamiento de datos. Algunos ejemplos particulares son un servidor, un disco duro o un pendrive. Además, se entenderá por "alarma" una notificación o información generada cuando la variación en los parámetros es mayor que un umbral.

35 Ventajosamente, el método para estimar la impedancia de red de distribución se usa para detectar variaciones periódicas en tal impedancia de red de distribución. Según diferentes normas, cuando una variación en la impedancia de red de distribución es mayor que un determinado umbral, existe una condición de isla. Las normas más populares usadas son:

- IEEE 929-2000: las condiciones de isla se detectan cuando una variación en la impedancia de la red de distribución es igual o mayor que la impedancia base del convertidor de potencia en menos de diez ciclos de la frecuencia fundamental de la red de distribución.

40 • VDE 0126-1-1: las condiciones de isla se detectan cuando la impedancia de red de distribución aumenta en 1 ohmio cuando la detección se realiza en menos de 5 segundos.

- EN 50330: el convertidor de potencia debe desconectarse de la red de distribución en menos de 5 segundos cuando la impedancia de la red de distribución varía 0,5 ohmios resistivos.

45 En un ejemplo particular, se impone la norma IEEE 929-2000. En otro ejemplo particular, se usa la norma VDE 0126-1-1 para definir los requisitos para detectar condiciones de isla. En un tercer ejemplo particular, se aplica la norma EN 50330 para detectar condiciones de isla.

La periodicidad de medición de la variación de la impedancia de red de distribución se define por medio de un "periodo de determinación", que puede seleccionarse dentro de un margen determinado según la norma específica usada. Del mismo modo, el umbral que decide si existen condiciones de isla también es específico de cada norma.

En un ejemplo particular, la alarma la recibe un trabajador de servicios públicos al que se le informa sobre la existencia de condiciones de isla para evitar accidentes.

En una realización particular, *la última etapa del método comprende además desconectar el convertidor de potencia de la red de distribución.*

- 5 De modo más ventajoso, el convertidor de potencia se desconecta de la red de distribución cuando se detectan condiciones de isla de modo que se eviten accidentes.

En una realización particular,  *$t_d$  es desde un milisegundo hasta cinco segundos y/o el umbral es desde 0,1 hasta 1 ohmios.*

- 10 Como se explicó anteriormente, el período de determinación puede seleccionarse dentro de un determinado margen según la norma específica usada. El margen de periodos de esta realización particular abarca todos los periodos posibles impuestos en las normas más populares descritas anteriormente.

- 15 En un ejemplo particular, la norma IEEE 929-2000 se impone con un período de determinación menor de diez ciclos de la frecuencia fundamental de la red de distribución. En otro ejemplo particular, se usa la norma VDE 0126-1-1 con un período de determinación de menos de 5 segundos. En un tercer ejemplo particular, se aplica la norma EN 50330 con un período de determinación de menos de 5 segundos.

El umbral que decide si existe una condición de isla depende de la norma específica usada. El margen de umbrales de esta realización particular abarca todos los umbrales posibles impuestos en las normas más populares descritas anteriormente.

- 20 En un ejemplo particular, se impone la norma IEEE 929-2000 con un umbral igual a la impedancia base del convertidor de potencia. En otro ejemplo particular, se usa la norma VDE 0126-1-1 con un umbral de 1 ohmio. En un tercer ejemplo particular, se aplica la norma EN 50330 con un umbral de 0,5 ohmios.

En otra realización según el primer aspecto inventivo, el método del primer aspecto inventivo comprende además las etapas de cualquiera de las realizaciones del segundo aspecto inventivo.

- 25 En un tercer aspecto inventivo, la invención proporciona *un sistema adaptado para estimar los parámetros eléctricos de una red de distribución que comprende un convertidor de potencia, un filtro LCL, un controlador digital y medios configurados para*

- *realizar etapas del método de cualquiera de las realizaciones del primer aspecto inventivo, y/o*
- *realizar etapas del método de cualquiera de las realizaciones del segundo aspecto inventivo.*

- 30 En una realización particular, *el controlador digital comprende un modulador con modelado de ruido, un bucle de bloqueo de fase o PLL, al menos un elemento de transformación del marco de referencia, un controlador de corriente y un elemento de identificación de la impedancia de red de distribución.*

A lo largo de todo este documento, debe entenderse la siguiente interpretación para los siguientes términos:

- “modulador con modelado de ruido” como un módulo que convierte una señal de amplitud continua en una tensión que puede sintetizarse por un convertidor de potencia.
- 35 • “bucle de bloqueo de fase” como un sistema de control que genera una señal de salida cuya fase está relacionada con la fase de una señal de entrada.
- “elemento de transformación del marco de referencia” como operación matemática, útil para simplificar el análisis de circuitos trifásicos, que transforma un vector de tres elementos en un número complejo. Dicha simplificación se describe en los siguientes documentos de la técnica anterior:
  - 40 ○ R. H. Park, “Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part 1”, en Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 48, n.º 3, págs. 716-727, julio de 1929. doi: 10.1109/T-AIEE.1929.5055275, y
  - Clarke, E., Circuit Analysis of AC Power Systems, Vol. 1, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1950.
- 45 • “controlador de corriente” como el módulo que minimiza el error entre la corriente medida del lado de la red de distribución  $i_f$  y una corriente de referencia, siendo dicha corriente de referencia la que debe proporcionarse a la red de distribución por el convertidor de potencia.
- “elemento de identificación de la impedancia de red de distribución” como un módulo que estima la impedancia de una red de distribución según el método explicado anteriormente.

Todos estos módulos comprendidos en el controlador digital funcionan de forma secuencial.

En una realización particular, *el modulador con modelado de ruido está configurado para generar la tensión de referencia  $v$  que genera el convertidor de potencia como su salida.*

5 Las señales de entrada del controlador digital son las mediciones de la corriente y la tensión de la red de distribución y su salida son las señales de activación que habilitan los transistores del convertidor de potencia. Por tanto, el controlador de corriente está configurado para controlar la corriente inyectada a la red de distribución.

10 Internamente, el controlador digital ejecuta el PLL para obtener la fase de la tensión de red de distribución. Después de eso, transforma la corriente de referencia y la corriente de red de distribución medida usando un elemento de transformación del marco de referencia y ejecuta el controlador de corriente para obtener una señal de modulación. Tal señal se convierte entonces en un vector sintetizable por el modulador con modelado de ruido. Posteriormente, el controlador digital convierte tal vector en señales de activación de los transistores del convertidor de potencia. Finalmente, estima la impedancia de la red de distribución por medio del elemento de identificación de la impedancia de red de distribución.

15 En un cuarto aspecto inventivo, la invención proporciona *un programa informático que comprende instrucciones para hacer que el tercer aspecto inventivo*

- ejecute las etapas del método de cualquiera de las realizaciones del primer aspecto inventivo, y/o
- ejecute las etapas del método de las realizaciones del segundo aspecto inventivo

En un quinto aspecto inventivo, la invención proporciona *un medio legible por ordenador que tiene almacenado en el mismo el programa informático del cuarto aspecto inventivo.*

## 20 Descripción de los dibujos

Estas y otras características y ventajas de la invención se entenderán claramente a la vista de la descripción detallada de la invención que resulta evidente a partir de una realización preferida de la invención, facilitada sólo como ejemplo y sin limitarse a la misma, con referencia a los dibujos.

25 Figura 1a. Esta figura muestra un diagrama de flujo del método para estimar los parámetros eléctricos de una red de distribución.

Figura 1b. Esta figura muestra un diagrama de flujo del método para estimar los parámetros eléctricos de una red de distribución con una etapa de filtrado adicional.

Figura 2a. Esta figura muestra un diagrama de flujo para reajustar los parámetros del controlador de corriente cuando tal controlador de corriente es un controlador proporcional-integral.

30 Figura 2b. Esta figura muestra un diagrama de flujo para reajustar los parámetros del controlador de corriente cuando tal controlador de corriente es un controlador de espacio de estados.

Figura 3. Esta figura muestra un diagrama de flujo para detectar condiciones de isla periódicamente.

Figura 4. Esta figura muestra un modelo de simulación de las componentes necesarias para estimar los parámetros eléctricos de una red de distribución.

35 Figura 5. Esta figura muestra un esquema eléctrico de las componentes necesarias para estimar los parámetros eléctricos de una red de distribución en el que se detallan los módulos del controlador digital.

## Descripción detallada de la invención

40 La presente invención, según un primer aspecto inventivo, proporciona un método (100) para estimar los parámetros eléctricos de una red de distribución (1). En los siguientes ejemplos, los parámetros eléctricos comprenden una componente resistiva  $R_g$  y una componente reactiva  $j\omega_g L_g$  de la impedancia de red de distribución  $Z_g$  (2), donde  $\omega_g$  es la frecuencia angular de la red de distribución en radianes por segundo. Adicionalmente, la red de distribución eléctrica se modela como una fuente de tensión de CA  $v_g$  (3) en serie con la impedancia  $Z_g$  (2), y una corriente  $i_1$  (4) fluye a través de  $Z_g$  (2).

45 A continuación, se describen ejemplos del método de invención usando cualquiera de las componentes descritas en las figuras 4 y/o 5.

En particular, el ejemplo de la figura 4 describe el modelo de simulación donde puede implementarse o simularse el método. Más particularmente, comprende un controlador digital (8) implementado en una plataforma dSPACE que trabaja a una frecuencia de muestreo de 10kHz, un convertidor de potencia (5) del tipo convertidor de fuente de tensión (VSC) de dos niveles y un filtro LCL. Además, el convertidor de potencia se modela como un retenedor de

orden cero (7) y la resistencia en serie equivalente del convertidor de potencia  $R_{ESR}$  (6) es de 1,5 ohmios.

Respecto al sistema de la figura 5 usado, comprende un controlador digital (8) descrito en D. Perez-Estevez, J. Doval-Gandoy, A. G. Yepes, O. Lopez y F. Baneira, "Generalized Multi-Frequency Current Controller for Grid-Connected Converters With LCL Filter", en IEEE Transactions on Industry Applications. doi: 10.1109/TIA.2018.2829459. Adicionalmente, el sistema de la figura 5 comprende además un convertidor de potencia (5) del tipo indicado anteriormente, un filtro LCL (10) y un conmutador de potencia (10) del tipo unipolar de doble tiro. El convertidor de potencia comprende un convertidor de fuente de tensión, VSC, y la resistencia en serie equivalente del convertidor de potencia  $R_{ESR}$  (6), no mostrada en la figura 5, es de 1,5 ohmios.

Además, el controlador digital (8) comprende un controlador de corriente (8.2) descrito en D. Perez-Estevez, J. Doval-Gandoy, A. G. Yepes, O. Lopez y F. Baneira, "Generalized Multi-Frequency Current Controller for Grid-Connected Converters With LCL Filter" en IEEE Transactions on Industry Applications. doi: 10.1109/TIA.2018.2829459. Adicionalmente el controlador digital (8) comprende además, un modulador con modelado de ruido (8.1) con un filtro de tercer orden, un bloque de identificación de impedancia de red de distribución (8.3) del tipo descrito en este documento, un bucle de bloqueo de fase de ancho de banda bajo (8.4), PLL, descrito en F. D. Freijedo, J. Doval-Gandoy, O. Lopez y E. Acha, "Tuning of Phase-Locked Loops for Power Converters Under Distorted Utility Conditions", en IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 45, n.º 6, págs. 2039-2047, noviembre-diciembre de 2009. doi: 10.1109/TIA.2009.2031790 y tres bloques de transformación de marco de referencia, concretamente, una transformación de Clarke directa (8.5) y una inversa (8.6) y una transformación de Park inversa (8.7).

Tal como puede apreciarse, el bloque de transformación de Clarke (8.5), se conecta a la red de distribución eléctrica (1) en su entrada y sus salidas se conectan al bloque de identificación de impedancia de red de distribución (8.3) y al controlador de corriente (8.2). Las entradas del bloque de transformación de Park inversa (8.7) son la corriente de referencia,  $i_{ref}$ , y la salida del PLL (8.4). La salida de tal bloque se conecta al controlador de corriente (8.2). La entrada del bloque de transformación de Clarke inversa (8.6) es la salida del modulador con modelado de ruido (8.1) y la salida de dicho bloque se conecta al convertidor de potencia (5).

Finalmente, el bloque de identificación de impedancia de red de distribución (8.3) se conecta al bloque de transformación de Clarke (8.5) y al modulador con modelado de ruido (8.1) en sus entradas, y su salida se conecta al controlador de corriente (8.2). El controlador de corriente (8.2) se conecta al bloque de transformación de Clarke (8.5), a la transformación de Park inversa (8.7) y al bloque de identificación de impedancia de red de distribución (8.3) en sus entradas, y su salida se conecta al modulador con modelado de ruido (8.1). El modulador con modelado de ruido (8.1) se conecta al controlador de corriente (8.2) en su entrada, y sus salidas se conectan a la transformación de Clarke inversa (8.6) y al bloque de identificación de impedancia de red de distribución (8.3). El PLL (8.4) se conecta a la salida del filtro LCL (10) en su entrada, y su salida se conecta a la transformación de Park inversa (8.7).

En ambos ejemplos de las figuras 4 y 5, el valor de los elementos del filtro LCL son los siguientes: el  $L_1$  es de 3,75 mH, el valor del  $L_2$  es de 3,75 mH y el valor del C es de 15  $\mu$ . La red de distribución eléctrica (1) es una microrred de distribución trifásica de 110-V 60-Hz de la red de distribución eléctrica principal con una componente reactiva y una resistiva en la impedancia de red de distribución de valor 2,5 mH y 2,5 Ohm, respectivamente. Tal red de distribución eléctrica se implementa usando una fuente de CA trifásica en serie con una impedancia.

Además, en estos ejemplos, el controlador digital (8) comprende las variables de inicialización requeridas para ejecutar el método de estimación propuesto (100), concretamente el factor conocido de la función de transferencia,  $G_{conocido}(z)$ ; el filtro de muesca: los parámetros iniciales del controlador de corriente; y los parámetros del PLL.

Figura 1a-1b: Método (100) para estimar los parámetros eléctricos de una red de distribución (1)

La figura 1a muestra un diagrama de flujo de las etapas comprendidas en el método:

La etapa a) del método proporciona (110) un convertidor de potencia (5) y un filtro LCL (10), estando el filtro LCL (10) modelado con dos inductores ( $L_1$ ,  $L_2$ ) y un condensador (C). En este ejemplo, el convertidor de potencia (5) se conecta a la red de distribución (1) por medio de dicho filtro LCL (10).

El convertidor de potencia (5) comprende una tensión de referencia  $v$  (9) como entrada y una resistencia en serie equivalente del convertidor de potencia  $R_{ESR}$  (6), tal como puede mostrarse en el ejemplo de la figura 4.

La siguiente etapa b) del método proporciona (120) un controlador digital y en la etapa c), estimando (130) dicho controlador digital (8), como modelo de ganancia de polo cero, la función de transferencia  $G(z)$  de la combinación del convertidor de potencia (5), el filtro LCL (10) y la red de distribución eléctrica (1) a través del módulo de procesamiento. La función estimada comprende dos ceros de muestreo  $z_1$  y  $z_2$ ; un polo que representa un retardo computacional del controlador digital (8), un polo a bajas frecuencias  $p_1$ ; dos polos resonantes  $p_2$  y  $p_3$  y una ganancia constante K:

$$G(z) = \frac{i_1}{v} = K \cdot \frac{(z - z_1) \cdot (z - z_2)}{z \cdot (z - p_1) \cdot (z - p_2) \cdot (z - p_3)}$$

Además, en la etapa d), el método (100), a través del controlador digital (8), separa (140) la función de transferencia  $G(z)$  en dos partes,  $G_{conocido}(z)$  y  $G_{desconocido}(z)$ , en el que:

- la función de transferencia  $G(z)$  es la multiplicación de ambas partes,
- 5 -  $G_{conocido}(z)$  comprende los términos de la función independientes de los cambios en la impedancia de red de distribución  $Z_g$ , (2), los parámetros del filtro LCL (10), el retardo computacional del controlador digital (8) y/o la resistencia en serie equivalente  $R_{ESR}$  (6) del convertidor de potencia (5):

$$G_{conocido}(z) = \frac{(z - z_1) \cdot (z - z_2)}{z}$$

- 10 - y  $G_{desconocido}(z)$  es una función de transferencia de todos los polos de tercer orden que comprende los polos resonantes, el polo de CC y la ganancia:

$$G_{desconocido}(z) = \frac{K}{(z - p_1) \cdot (z - p_2) \cdot (z - p_3)}$$

Más tarde en la etapa e), el método (100), a través del controlador digital (8), convierte (150) el modelo de ganancia de polo cero de la función  $G_{desconocido}(z)$  en una expresión racional en la variable  $z$ :

$$G_{desconocido}(z) = \frac{n_1}{z^3 + m_1 z^2 + m_2 z + m_3}$$

- 15 Posteriormente en la etapa f), el método (100), a través del controlador digital (8), obtiene (160) los valores de  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ , y  $n$ , siguiendo las subetapas siguientes:

f-i) filtrar (161) la corriente  $i_1$  (4) con un filtro de muesca sintonizado a la frecuencia de red de distribución fundamental  $f_g$  para eliminar las componentes de frecuencia de la red de distribución, es decir,  $v_g$  es igual a cero, obteniendo  $i_f$ ,

- 20 f-ii) filtrar (162) la tensión  $v$  (9) con  $G_{conocido}(z)$  y un filtro de muesca sintonizado a la frecuencia de red de distribución fundamental  $f_g$  para eliminar las componentes de frecuencia de la red de distribución, es decir,  $v_g$  es igual a cero, obteniendo  $v_f$ ,

f-iii) estimar (163), por medio de un algoritmo de estimación de mínimos cuadrados recursivos, RLS, un vector  $C(k)$ , siendo  $k$  un número natural, que comprende los coeficientes de  $G_{desconocido}(z)$

$$25 \quad C(k) = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ n_1]^T$$

siendo  $G_{desconocido}(z)$ :

$$G_{desconocido}(z) = \frac{i_f}{v_f}$$

En el que, en este ejemplo particular, para dos  $k$  consecutivas, los resultados son:

$$C(1) = [-2,5561 \ 2,4624 \ -0,8916 \ 0,8218]^T$$

$$30 \quad C(2) = [-2,5573 \ 2,4630 \ -0,8911 \ 0,8161]^T$$

Finalmente, en la etapa g), el método (100), a través del controlador digital (8), obtiene (170) los parámetros físicos

que modelan el convertidor de potencia (5) a partir del vector  $C(k)$ , siguiendo las subetapas siguientes:

g-i) calcular (171) el valor de la resistencia en serie equivalente  $R_{ESR}$  (6) en condiciones de CC, es decir,  $z$  igual a 1

$$G(z)|_{z=1} = \frac{1}{(R_{ESR} + R_g)}$$

y desconectar el convertidor de potencia (5) de la red de distribución ( $R_g = 0$ ):

$$R_{ESR} = \frac{1}{G(1)} = 1,5 \text{ Ohm}$$

5 g-ii) calcular (172) el valor de  $R_g$  en condiciones de CC, es decir,  $z$  igual a 1 y conectar el convertidor de potencia (5) a la red de distribución:

$$R_g = \frac{1}{G(1)} - R_{ESR} = 2,4 \text{ Ohm}$$

10 g-iii) calcular (173) la inductancia de red de distribución  $L_g$  a partir de los valores  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $C$  y la frecuencia resonante del sistema  $\omega_{res}$ :

$$L_g = \frac{L_1 L_2 - \frac{1}{\omega_{res}^2 C} (L_1 + L_2)}{\frac{1}{\omega_{res}^2 C} - L_2} = 0,1 \text{ mH}$$

en el que la frecuencia resonante del sistema se calcula a partir del periodo de muestreo  $T_s$ ; del convertidor de potencia (5) y los polos de  $G_{desconocido}(z)$ , concretamente, los polos resonantes  $p_2$  y  $p_3$ :

$$\omega_{res} = \frac{1}{2T_s} (|\ln p_2 + \ln p_3|) = 5955 \text{ rad/s}$$

15 La estimación de los parámetros eléctricos de una red de distribución (1) requiere que un convertidor de potencia (5) se conecte a tal red de distribución (1) por medio de un filtro LCL (10). Tal filtro se requiere para evitar que las componentes no deseadas alcancen el convertidor de potencia (5).

20 La siguiente etapa del método es calcular la función de transferencia del sistema, entendiendo el sistema como la combinación del convertidor de potencia (5), el filtro LCL (10) y la propia red de distribución (1). Esta función de transferencia se propone como modelo de ganancia de polo cero con dos ceros, tres polos y una ganancia.

25 Luego se separa la función de transferencia en dos factores de manera que cuando se multiplican dan como resultado la función de transferencia completa. El primer factor comprende varios términos conocidos que son independientes de los cambios en la impedancia de red de distribución  $Z_g$  (2), el retardo computacional del controlador digital (8), el filtro LCL (10) y/o la resistencia en serie equivalente  $R_{ESR}$  (6) del convertidor de potencia (5); comprendiendo tal factor todos los ceros y el polo de retardo del modelo de ganancia de polo cero. El segundo factor comprende el resto de las componentes que se desconocen, es decir la ganancia y los polos de la función de transferencia.

30 Una vez que se ha estimado el término desconocido, se convierte en una expresión racional de tercer orden. Los coeficientes desconocidos de la expresión racional se obtienen por medio de un algoritmo de mínimos cuadrados recursivos (RLS) usando las versiones filtradas de las señales  $i_t$  (4) y  $v$  (9) como entradas: ambas señales se filtran mediante un filtro de muesca sintonizado a la frecuencia fundamental y  $v$  adicionalmente con el término conocido de la función de transferencia.

35 Finalmente, se obtienen los parámetros eléctricos (170): en primer lugar, a partir de los coeficientes estimados, teniendo en cuenta las condiciones de CC y desconectando el convertidor de potencia (5) de la red de distribución (1), se calcula (171) el valor de la resistencia en serie equivalente (6); después de eso, el convertidor de potencia (5) se conecta de nuevo a la red de distribución (1) de modo que se calcula (172) el valor de la componente resistiva  $R_g$  de la impedancia de red de distribución  $Z_g$  (2); y por último se calcula (173) la componente reactiva  $L_g$  de la impedancia de red de distribución  $Z_g$  (2) teniendo en cuenta los valores de las componentes del filtro LCL (10), el

periodo de muestreo del sistema y los polos de la función de transferencia.

En la figura 1b se muestra un ejemplo adicional del método de la invención. Puede apreciarse que este ejemplo es similar al ejemplo de la figura 1a con la excepción de que después de filtrar las señales  $v$  (9) e  $i_1$  (4) con el filtro de muesca (ambas señales) y con el factor conocido de la función de transferencia (sólo  $v$ ), también se filtran (161.1) con un filtro de paso bajo para eliminar las componentes de alta frecuencia no deseadas.

Figuras 2a-2b: Método (100) para mejorar la respuesta transitoria y el rendimiento en estado estacionario a partir de los parámetros eléctricos estimados de una red de distribución (1)

Las figuras 2a-2b muestran ejemplos adicionales del método de la invención. En particular, dichos ejemplos comprenden etapas adicionales del diagrama de flujo representado en la figura 1a para incorporar la etapa de reajustar los parámetros del controlador de corriente (8.2) gracias al controlador digital (8).

El controlador digital (8), que está configurado para comandar el convertidor de potencia (5), comprende un módulo controlador de corriente (8.2) como el controlador digital (8) que se muestra en la figura 5. Gracias al método (100) para estimar la impedancia de red de distribución, es posible reajustar periódicamente los parámetros intrínsecos del controlador de corriente (8.2), lo que mejora ventajosamente la respuesta transitoria y el rendimiento en estado estacionario del convertidor de potencia. La periodicidad se define por medio de un período de optimización que es seleccionable.

En el ejemplo de la figura 2a, el controlador de corriente (8.2) es un controlador proporcional-integral PI, y los parámetros que definen su ancho de banda y robustez son dos ganancias diferentes, una ganancia proporcional  $K_p$  y una ganancia integral  $K_i$ .

Tal como puede observarse en tal figura, después de completar la estimación de  $R_{ESR}$ ,  $R_g$  y  $L_g$ , aparece una nueva etapa de reajustar (200) las ganancias  $K_p$  y  $K_i$  a través del módulo de procesamiento. Este reajuste se realiza según los valores de  $R_{ESR}$ ,  $R_g$  y  $L_g$ . En este ejemplo,  $K_p$  y  $K_i$  se ajustan tal como se describe en el siguiente documento: A. G. Yepes, A. Vidal, J. Malvar, O. Lopez y J. Doval-Gandoy, "Tuning Method Aimed at Optimized Settlement Time and Overshoot for Synchronous Proportional-Integral Current Control in Electric Machines", en IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, n.º 6, págs. 3041-3054, junio de 2014. doi: 10.1109/TPEL.2013.2276059:

$$K_p = \frac{4}{100} 2\pi f_s (R_g + R_{ESR}) = 3770$$

$$K_i = \frac{4}{100} 2\pi f_s (L_1 + L_2 + L_g) = 18$$

Después de un período  $t_o$  predefinido, se realiza nuevamente el método (100) para reajustar nuevamente las ganancias del controlador de corriente (8.2). En este ejemplo particular, el período de optimización  $t_o$  es de menos de cinco segundos. Por tanto, los nuevos valores de  $R_g$  y  $L_g$  son 2,5 ohmios y 2,5 mH. Finalmente,  $K_p$  y  $K_i$  se ajustan de nuevo tal como se indicó anteriormente:

$$K_p = \frac{4}{100} 2\pi f_s (R_g + R_{ESR}) = 10053$$

$$K_i = \frac{4}{100} 2\pi f_s (L_1 + L_2 + L_g) = 23$$

En un ejemplo particular, el controlador digital (8) es un controlador proporcional-resonante, PR. Los parámetros que han de ajustarse de tal tipo de controlador digital (8) son los mismos que los del controlador proporcional-integral PI.

La figura 2b muestra un ejemplo cuando el controlador digital (8) es un controlador de espacio de estados, siendo los resultados similares para otros tipos de controladores de orden superior, como los predictivos. En tales casos, los parámetros que pueden reajustarse son las ecuaciones que describen el modelo de planta de tales controladores (8), donde los parámetros  $R_g$  y  $L_g$  se actualizan según los valores obtenidos por el método (100).

Las ecuaciones que describen la planta son:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \begin{pmatrix} -\frac{R_g}{L_1} & 0 & \frac{1}{L_1} \\ 0 & -\frac{R_{ESR}}{L_2} & -\frac{1}{L_2} \\ -\frac{1}{C} & \frac{1}{C} & 0 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{pmatrix} v'_d(t)$$

$$i_1(t) = (1 \ 0 \ 0) x(t)$$

$$x(t) = \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ v_c \end{pmatrix}$$

Donde  $v'_d(t)$  es la tensión de salida de tiempo continuo del VSC,  $i_1$  es la corriente del lado de la red de distribución,  $i_2$  es la corriente del lado del convertidor y  $v_c$  es la tensión del condensador en el filtro LCL.

Figura 3: Método (300) para detectar condiciones de isla a partir de los parámetros eléctricos estimados de una red de distribución (1)

Tal como se explicó en los antecedentes, durante el funcionamiento de un convertidor de potencia debe tenerse en cuenta las condiciones de isla; es decir, la situación en la que el convertidor de potencia alimenta una microrred de distribución a la que está conectado mientras la potencia de la red de distribución principal ya no está presente. La condición de isla puede ser peligrosa para los trabajadores de servicios públicos, quienes tal vez no se den cuenta de que un circuito todavía está encendido. Por tanto, detectar tales condiciones de isla es esencial para evitar accidentes.

La figura 3 muestra un ejemplo de la invención que resuelve el problema anterior. En particular, se muestra un diagrama de flujo de un método (300) para detectar condiciones de isla midiendo periódicamente variaciones en la impedancia de red de distribución  $Z_g$  (2) que se estima mediante el método (100). En este ejemplo, el método (300) también se realiza a través del controlador digital (8). El periodo para calcular las variaciones,  $t_d$ , es seleccionable. En este ejemplo particular,  $t_d$  es inferior a cinco segundos.

Según diferentes normas, la condición de isla existe cuando una variación en la impedancia de red de distribución es mayor que un determinado umbral. Tal umbral depende de la norma que esté aplicándose. En este ejemplo particular, el umbral es 1 ohmio.

Tal como se puede observarse en la figura 3, después de completar el método (100) en el que se estiman  $R_{ESR}$ ,  $R_g$  y  $L_g$ , el método (300) determina además (305) si las componentes de la impedancia de la red de distribución  $Z_g$  (2), es decir,  $R_g$  y  $L_g$ , se guardaron antes:

- Si tales componentes no se guardaron antes, se guardan (310) dentro de un determinado dispositivo de almacenamiento de memoria, por ejemplo, un disco duro. Después de un período de determinación  $t_d$ , se realiza (320) nuevamente el método (100).
- Si tales componentes se guardaron antes, se comparan (330) las nuevas componentes estimadas con las guardadas para calcular la variación:
  - si la variación está por debajo del umbral, las nuevas componentes se guardan (310) y, después de un período de determinación  $t_d$ , se realiza (320) de nuevo el método (100). En este ejemplo el umbral es 1 ohmio.
  - si la variación está por encima del umbral, se detectan condiciones de isla. Entonces, se emite (340) una alarma informando al trabajador del servicio público para evitar un posible accidente y se desconecta (350) el convertidor de potencia (5) de la red de distribución (1). En un ejemplo no mostrado en la figura 3, el método finaliza una vez que se emite la alarma. En el ejemplo mostrado en la figura 3, las nuevas componentes se guardan (310) y, después de un período de determinación  $t_d$ , se realiza (320) nuevamente el método (100).

En este ejemplo, los valores calculados en el ejemplo de la figura 1a se guardan en el disco duro. Luego, el controlador digital espera 5 segundos y realiza de nuevo el método (100), obteniendo los nuevos valores de  $R_g$  y  $L_g$ : 2,5 Ohmios y 2,5 mH.

Entonces, la variación en la impedancia de red de distribución  $\Delta Z_g$  se calcula tal como sigue:

$$\Delta R_g = R_g(t) - R_g(t - t_d)$$

$$\Delta L_g = L_g(t) - L_g(t - t_d)$$

$$\Delta Z_g = \sqrt{\Delta R_g^2 + (2\pi\omega_g\Delta L_g)^2}$$

Como la variación es superior al umbral, el módulo de procesamiento emite (340) una alarma acústica y desconecta (350) el convertidor de potencia (5) apagando el interruptor de alimentación (10).

5 Figura 4: Modelo de simulación de las componentes necesarias para estimar los parámetros eléctricos de una red de distribución (1)

La figura 4 muestra un modelo de simulación de la combinación del convertidor de potencia (5), el filtro LCL (10) y la red de distribución (1). Tal como puede observarse, la entrada del convertidor de potencia (5) es la tensión de referencia  $v$  (9) y es comandada por un controlador digital (8), que se representa como un polo extra en la función de transferencia debido al retardo que implica. El convertidor de potencia (5), además, se representa como un módulo de retención de orden cero (7) en serie con una resistencia en serie equivalente (6). El filtro LCL (10), por otro lado, comprende dos inductores  $L_1$  y  $L_2$  y un condensador  $C$ , tal como puede observarse en la figura. Finalmente, la red de distribución (1) comprende una impedancia  $Z_g$  (2), a través de la cual fluye una corriente  $i_l$  (4), y una fuente de tensión de CA (3). En este ejemplo, un ordenador está conectado al controlador digital.

15 Figura 5: Esquema eléctrico de las componentes necesarias para estimar los parámetros eléctricos de una red de distribución (1) en el que se detallan los módulos del controlador digital (8)

La figura 5 muestra un esquema del sistema donde se representa en detalle el controlador digital (8). Comprende un modulador con modelado de ruido (8.1), un controlador de corriente (8.2), un elemento de identificación de la impedancia de red de distribución (8.3), un bucle de bloqueo de fase PLL (8.4) y tres elementos de transformación del marco de referencia (8.5). El modulador con modelado de ruido (8.1) está configurado para generar la tensión de referencia  $v$  (9) como entrada del convertidor de potencia (5). Además, en este ejemplo particular, el convertidor de potencia (5) y el filtro LCL (10) pueden conectarse y desconectarse de la red de distribución (1) por medio de un elemento conmutador (11).

Internamente, el controlador digital (8) ejecuta el PLL (8.4) para obtener la fase de la tensión de red de distribución. Posteriormente, transforma la corriente de red de distribución medida usando el elemento de transformación del marco de referencia (8.5) y ejecuta el controlador de corriente (8.2) para obtener una señal de modulación que luego se convierte en un vector sintetizable. Posteriormente, el controlador digital (8) convierte tal vector en señales de activación de los transistores del convertidor de potencia (5) y, finalmente, estima la impedancia de red de distribución  $Z_g$  (2) por medio del elemento de identificación de impedancia de red de distribución (8.3).

30

**REIVINDICACIONES**

1. Un método (100) para estimar los parámetros eléctricos de una red de distribución (1) a la que está conectado un convertidor de potencia (5) por medio de un filtro LCL (10), en el que

5 los parámetros eléctricos comprenden una componente resistiva  $R_g$  y una componente reactiva  $j\omega_g L_g$  de la impedancia de red de distribución  $Z_g$  (2), donde  $\omega_g$  es la frecuencia angular de la red de distribución en radianes por segundo,

la red de distribución eléctrica se modela como una fuente de tensión de CA  $v_g$  (3) en serie con la impedancia  $Z_g$ , (2), y

una corriente  $i_1$  (4) fluye a través de  $Z_g$  (2),

10 comprendiendo el método (100) las etapas de:

a) estimar (130) mediante un controlador digital (8), como modelo de ganancia de polo cero, una función de transferencia  $G(z)$  de un sistema que comprende el convertidor de potencia (5) conectado a la red de distribución eléctrica (1) por medio del filtro LCL (10),

en el que

15 el controlador digital (8) comprende medios de procesamiento configurados para estimar los parámetros eléctricos de la red de distribución (1);

el filtro LCL (10) se modela con dos inductores ( $L_1$ ,  $L_2$ ) y un condensador (C); y

el convertidor de potencia (5) comprende una tensión de referencia  $v$  (9) como entrada y una resistencia en serie equivalente del convertidor de potencia  $R_{ESR}$  (6); y

20 en el que la función  $G(z)$  comprende dos ceros de muestreo  $z_1$  y  $z_2$ ; un polo que representa un retardo computacional del controlador digital (8)  $z$ ; un polo a bajas frecuencias  $p_1$ ; dos polos resonantes  $p_2$  y  $p_3$  y una ganancia constante  $K$ :

$$G(z) = \frac{i_1}{v} = K \cdot \frac{(z - z_1) \cdot (z - z_2)}{z \cdot (z - p_1) \cdot (z - p_2) \cdot (z - p_3)}$$

25 b) separar (140) mediante el controlador digital (8) la función de transferencia  $G(z)$  en dos partes,  $G_{conocido}(z)$  y  $G_{desconocido}(z)$ , en el que:

- la función de transferencia  $G(z)$  es la multiplicación de ambas partes,

-  $G_{conocido}(z)$  comprende los términos de la función independientes de los cambios en la impedancia de red de distribución  $Z_g$  (2), los parámetros del filtro LCL (10) y/o la resistencia en serie equivalente  $R_{ESR}$  (6) del convertidor de potencia (5):

$$G_{conocido}(z) = \frac{(z - z_1) \cdot (z - z_2)}{z}$$

30 - y  $G_{desconocido}(z)$  es una función de transferencia de todos los polos de tercer orden que comprende los polos resonantes, el polo de CC y la ganancia:

$$G_{desconocido}(z) = \frac{K}{(z - p_1) \cdot (z - p_2) \cdot (z - p_3)}$$

35 c) convertir (150) mediante el controlador digital (8), el modelo de ganancia de polo cero de la función  $G_{desconocido}(z)$  en una expresión racional en la variable  $z$ :

$$G_{desconocido}(z) = \frac{n_1}{z^3 + m_1 z^2 + m_2 z + m_3}$$

d) obtener (160) mediante el controlador digital (8), los valores de  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ , y  $n_1$  siguiendo las subetapas siguientes:

5 d-i) filtrar (161), mediante el controlador digital (8), la corriente  $i_1$  (4) con un filtro de muesca sintonizado a la frecuencia de red de distribución fundamental  $f_g$  para eliminar las componentes de frecuencia de la red de distribución, obteniendo  $i_f$ ,

d-ii) filtrar (162), mediante el controlador digital (8), la tensión  $v$  (9) con  $G_{conocido}(z)$  y un filtro de muesca sintonizado a la frecuencia de red de distribución fundamental  $f_g$  para eliminar las componentes de frecuencia de la red de distribución, obteniendo  $v_f$ ,

10 d-iii) estimar (163), mediante el controlador digital (8), por medio de un algoritmo de estimación de mínimos cuadrados recursivos, RLS, un vector  $C(k)$ , siendo  $k$  un número natural, que comprende los coeficientes de  $G_{desconocido}(z)$ ; recibiendo el algoritmo de estimación de RLS como entradas la corriente  $i_f$  y la tensión  $v_f$ , en el que el vector  $C(k)$  es:

$$C(k) = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ n_1]^T$$

siendo  $G_{desconocido}(z)$ :

15 
$$G_{desconocido}(z) = \frac{i_f}{v_f}$$

e) obtener (170) mediante el controlador digital (8) los parámetros físicos que modelan el convertidor de potencia (5) a partir del vector  $C(k)$ , siguiendo las subetapas siguientes:

e-i) calcular (171) el valor de la resistencia en serie equivalente  $R_{ESR}$  (6) en condiciones de CC, es decir,  $z$  igual a 1

20 
$$G(z)|_{z=1} = \frac{1}{(R_{ESR} + R_g)}$$

y desconectar el convertidor de potencia (5) de la red de distribución (1) para dar  $R_g$  un valor de cero:

$$R_{ESR} = \frac{1}{G(1)|_{convertidor\_potencia\_desconectado}}$$

e-ii) calcular (172) el valor de  $R_g$  en condiciones de CC, es decir,  $z$  igual a 1 y conectar el convertidor de potencia (5) a la red de distribución (1):

25 
$$R_g = \frac{1}{G(1)|_{convertidor\_potencia\_conectado}} - R_{ESR}$$

e-iii) calcular (173) la inductancia de red de distribución  $L_g$  a partir de los valores  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $C$  y la frecuencia resonante del sistema  $\omega_{res}$ :

$$L_g = \frac{L_1 L_2 - \frac{1}{\omega_{res}^2 C} (L_1 + L_2)}{\frac{1}{\omega_{res}^2 C} - L_2}$$

30 en el que la frecuencia resonante del sistema se calcula a partir del periodo de muestreo  $T_s$  del convertidor de potencia (5) y los polos de  $G_{desconocido}(z)$ , concretamente, los polos resonantes  $p_2$  y  $p_3$ :

$$\omega_{res} = \frac{1}{2T_s} (|\ln p_2 + \ln p_3|).$$

2. El método (100) según la reivindicación 1, en el que el método comprende además una subetapa entre las fases d-ii) y d-iii) de filtrar (161.1)  $v_f$  (9) e  $i_f$  (4) con un filtro de paso bajo.
- 5 3. El método (100) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el convertidor de potencia (5) es un convertidor de fuente de tensión (VSC) modelado como un retenedor de orden cero (7), ZOH, en serie con la resistencia en serie equivalente  $R_{ESR}$  (6).
- 10 4. El método (100) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además las etapas siguientes:
  - reajustar (200) parámetros intrínsecos de un controlador de corriente (8.2) basándose en los parámetros físicos calculados,
  - después de un periodo de optimización,  $t_o$ , realizar (210) las etapas a) a e) del método (100) obteniendo una actualización de los parámetros físicos y realizar la etapa anterior con los parámetros físicos actualizados.
- 15 5. El método (100) según la reivindicación 4, en el que los parámetros intrínsecos del controlador de corriente (8.2) son una ganancia proporcional  $K_p$  y una ganancia integral  $K_i$ .
6. El método (100) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que en las etapas a) y e-ii) el convertidor de potencia (5) se conecta a la red de distribución por medio de un elemento conmutador (11) y en el que en la etapa e-i) el convertidor de potencia (5) se desconecta de la red de distribución y se cortocircuita su salida por medio de dicho elemento conmutador (11).
- 20 7. Método (300) para detectar condiciones de isla de una red de distribución (1) que comprende las etapas siguientes:
  - 1) realizar el método (100) para estimar los parámetros eléctricos de la red de distribución (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores,
  - 2) almacenar (310) los parámetros físicos dentro de una memoria,
  - 25 3) después de un periodo de determinación,  $t_d$ , realizar (320) las etapas a) a e) del método (100) para estimar los parámetros eléctricos de una red de distribución según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, obteniendo una actualización de los parámetros físicos,
  - 4) comparar (330) los parámetros físicos almacenados y los parámetros físicos actualizados,
  - 30 5) si las variaciones entre los parámetros físicos almacenados y los parámetros físicos actualizados son mayores que un umbral, emitir (340) una alarma al detectarse condiciones de isla.
8. El método (300) según la reivindicación 7, en el que si las variaciones entre los parámetros físicos y los parámetros físicos actualizados son menores o iguales que el umbral, realizar iterativamente las etapas siguientes:
  - i) almacenar los parámetros físicos actualizados, y
  - 35 ii) repetir las etapas 3) a 5) hasta que los parámetros físicos almacenados y los parámetros físicos actualizados sean mayores que el umbral.
9. El método (300) según las reivindicaciones 7 u 8, en el que la última etapa del método comprende además desconectar (350) el convertidor de potencia (5) de la red de distribución (1).
- 40 10. El método (300) según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9, en el que  $t_d$  es desde un milisegundo hasta cinco segundos y/o el umbral es desde 0,1 hasta 1 ohmios.
11. Sistema adaptado para estimar los parámetros eléctricos de una red de distribución (1) que comprende un convertidor de potencia (5), un filtro LCL (10), un controlador digital (8) y medios configurados para
  - realizar etapas del método (100) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, y/o
  - realizar etapas del método (300) según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 10.
- 45 12. El sistema según la reivindicación 11, en el que el controlador digital (8) comprende un modulador con

modelado de ruido (8.1), un bucle de bloqueo de fase (8.4) o PLL, al menos un elemento de transformación del marco de referencia (8.5), un controlador de corriente (8.2) y un elemento de identificación de la impedancia de red de distribución (8.3).

- 5 13. El sistema según la reivindicación 12, en el que el modulador con modelado de ruido (8.1) está configurado para generar la tensión de referencia  $v$  (9) que recibe el convertidor de potencia (5) en su entrada.
14. Un programa informático que comprende instrucciones que, cuando el programa se ejecuta mediante un sistema según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, hace que el sistema lleve a cabo
- las etapas del método (100) de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, y/o
  - las etapas del método (300) de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 10.
- 10 15. Un medio legible por ordenador que tiene almacenado en el mismo el programa informático según la reivindicación 14.

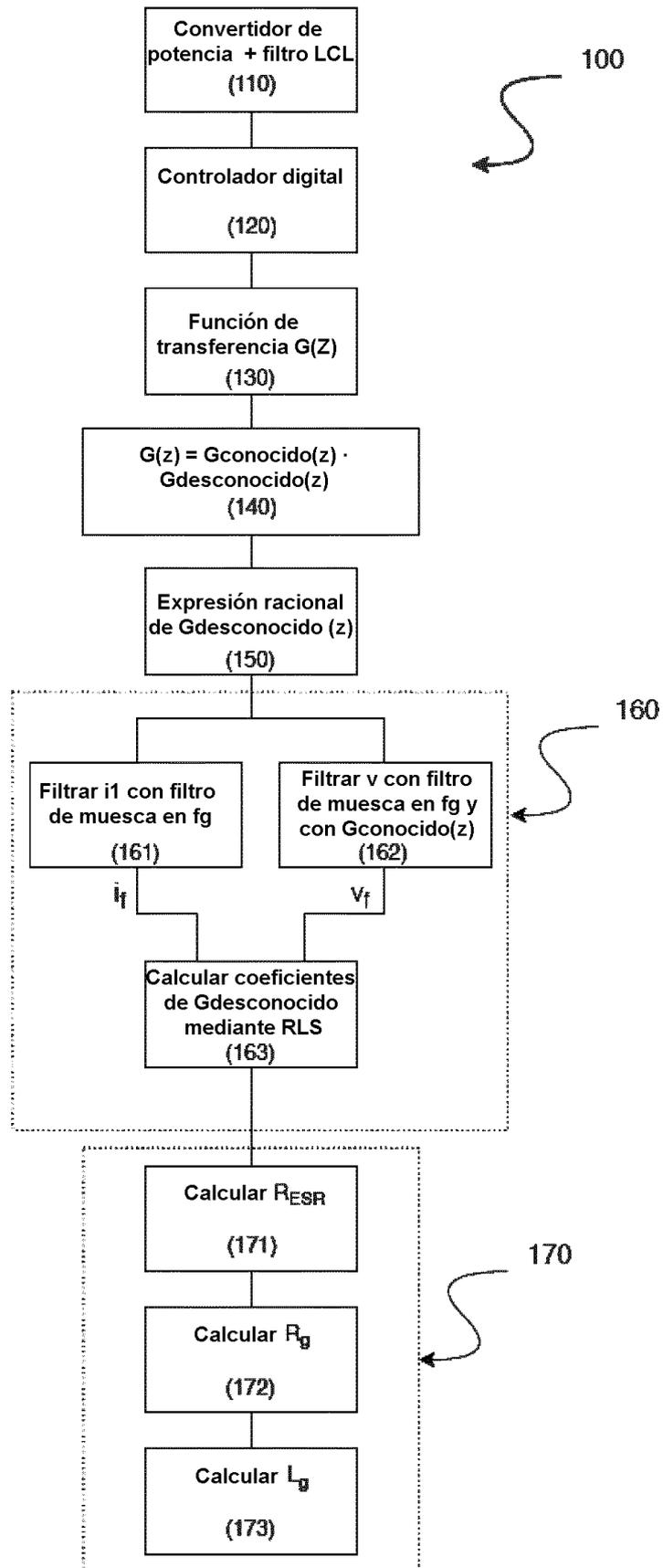


Fig.1a

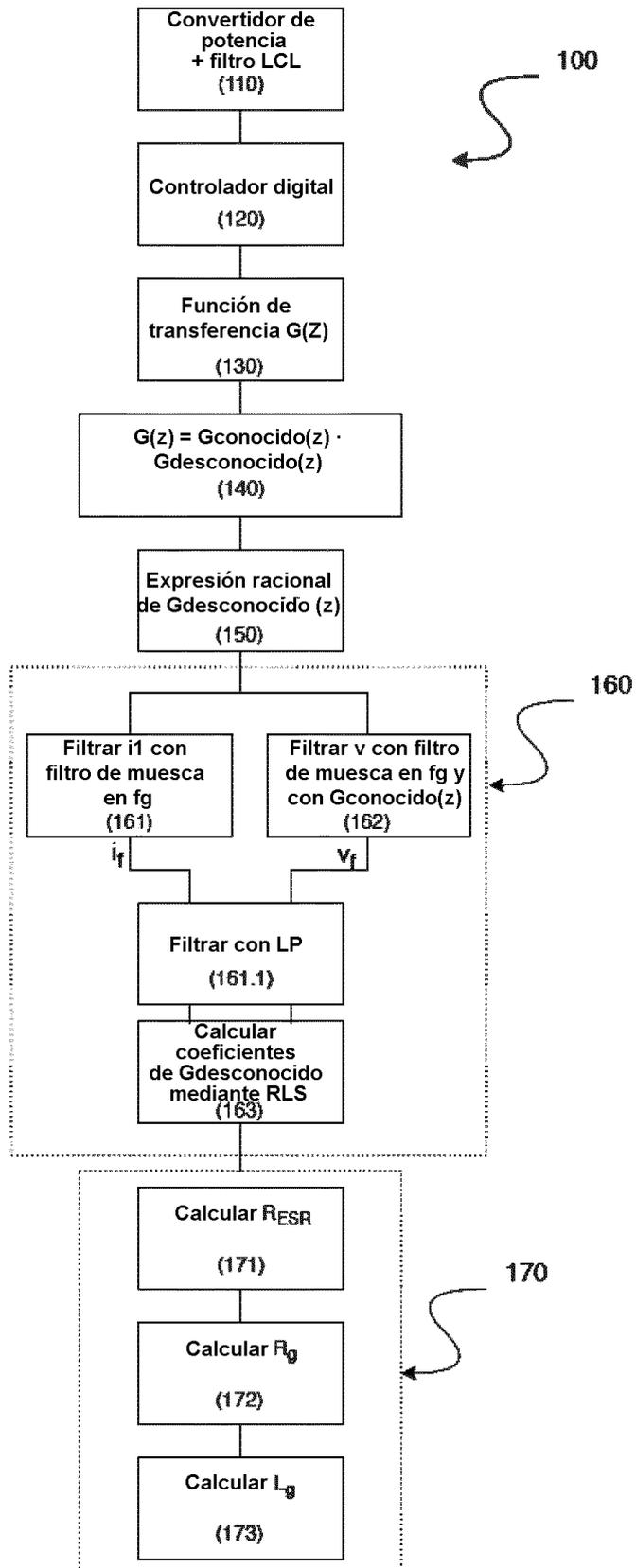


Fig.1b

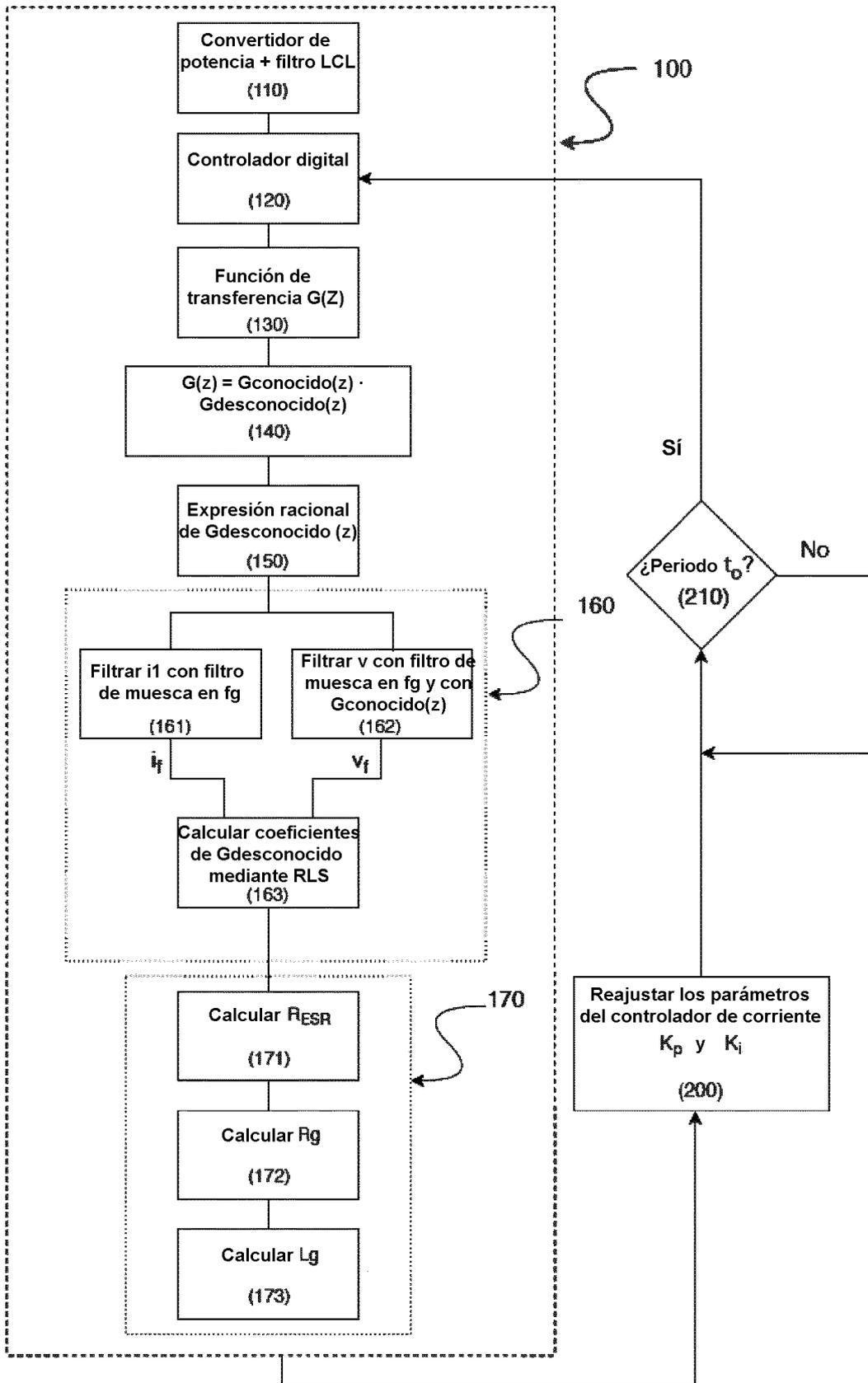


Fig.2a

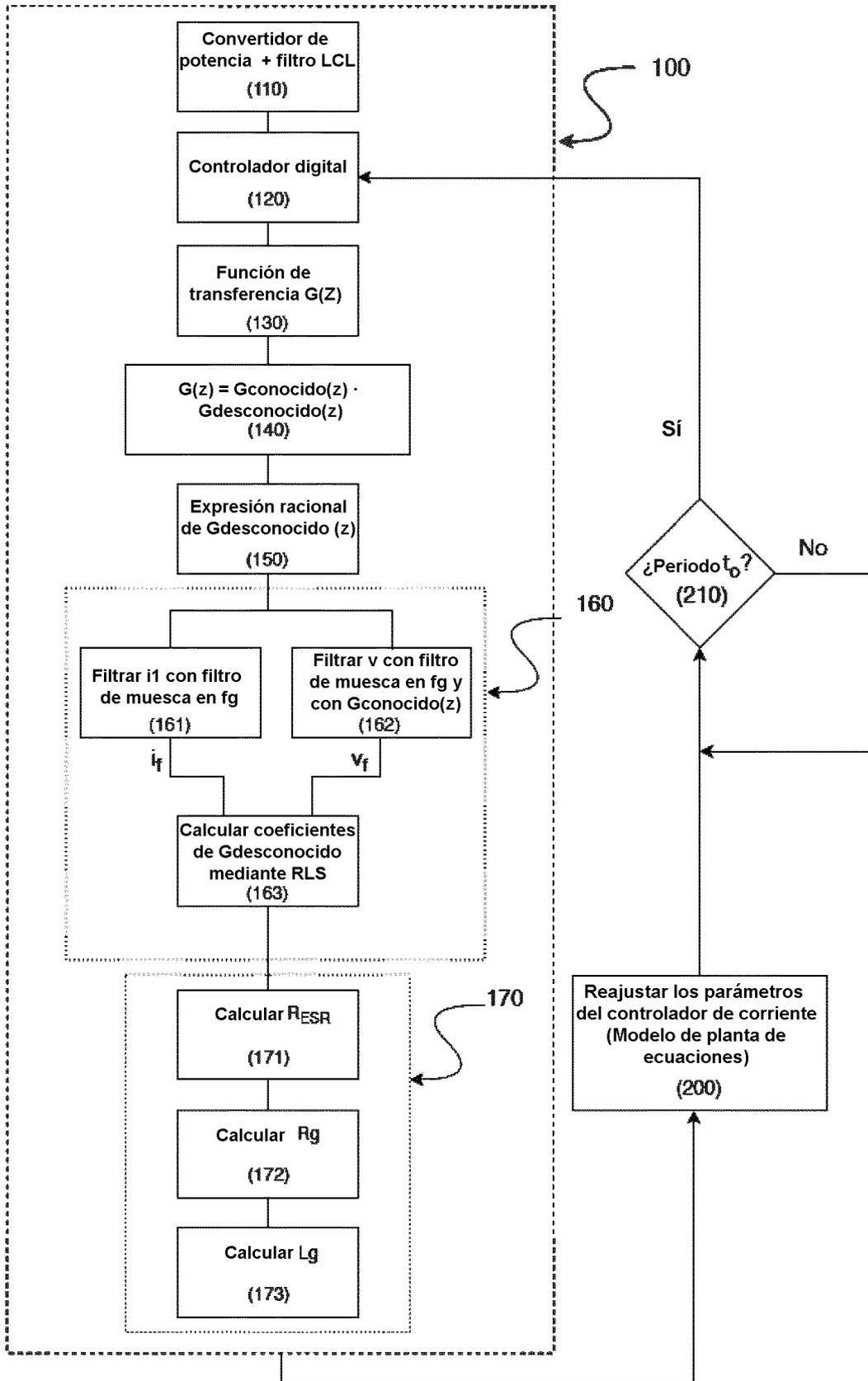


Fig.2b

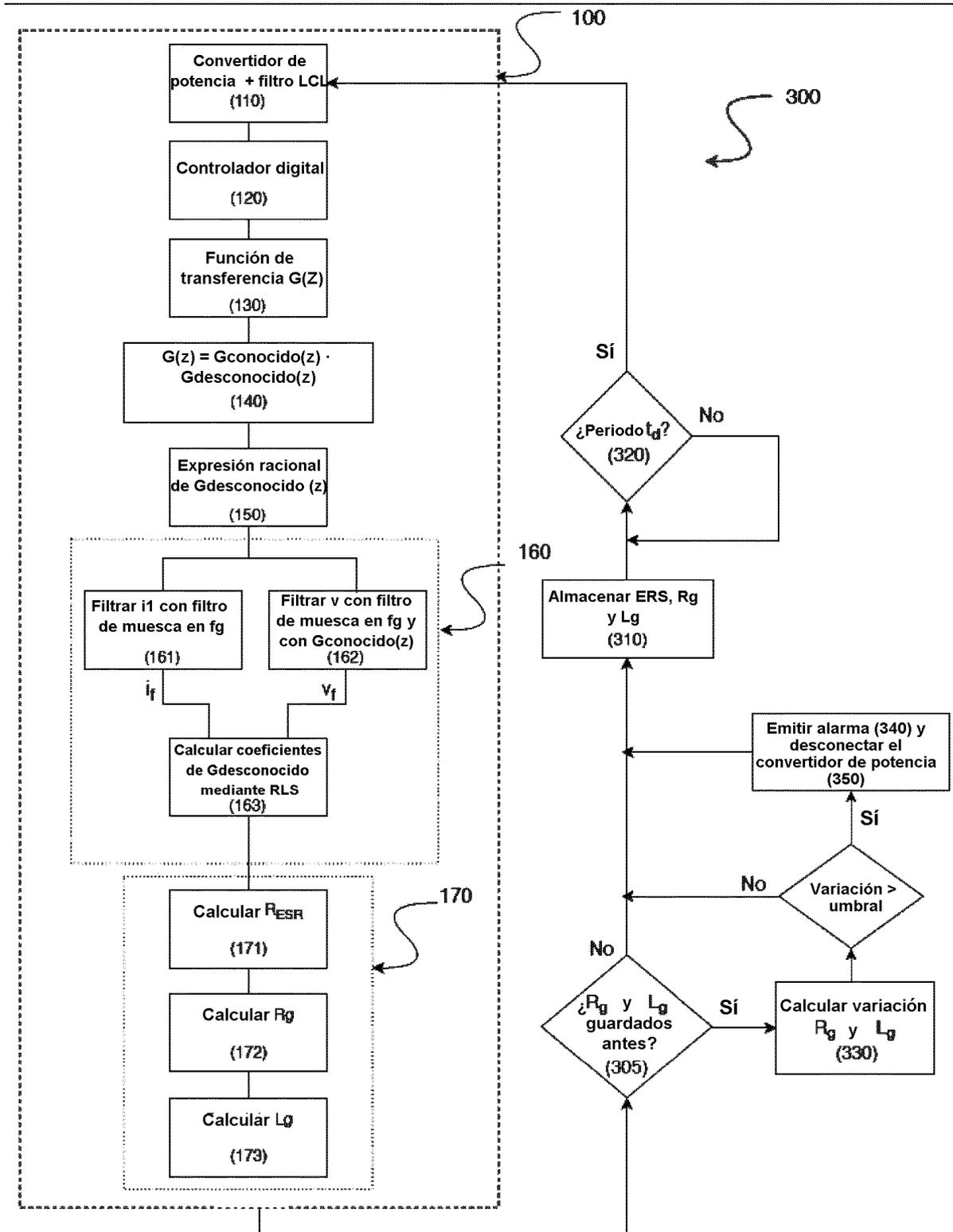


Fig.3

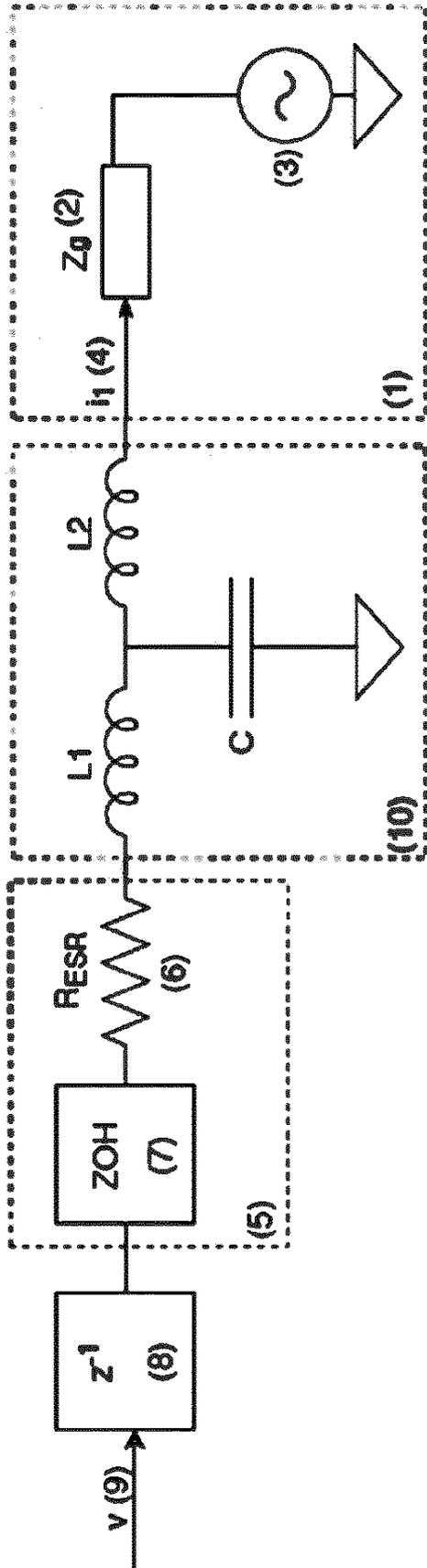


Fig.4

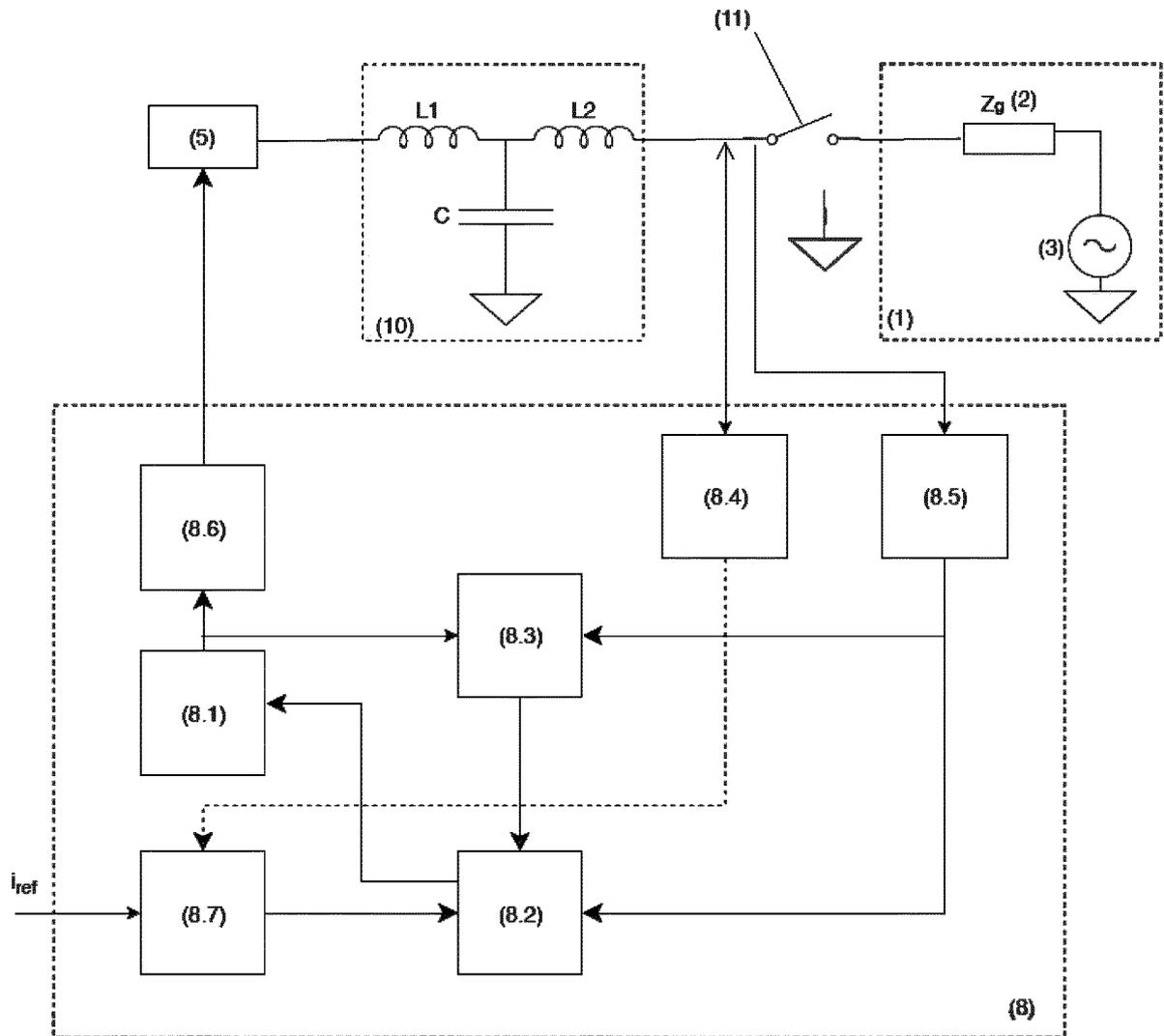


Fig.5