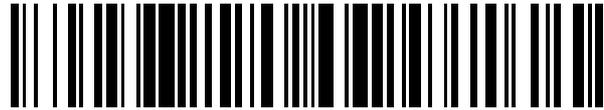


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 756 923**

21 Número de solicitud: 201800244

51 Int. Cl.:

H02H 9/04 (2006.01)

H02H 7/05 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

25.10.2018

43 Fecha de publicación de la solicitud:

27.04.2020

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

18.11.2020

Fecha de concesión:

09.02.2021

45 Fecha de publicación de la concesión:

16.02.2021

73 Titular/es:

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA (50.0%)
Pabellón de Gobierno, Avda. de los Castros s/n
39005 Santander (Cantabria) ES y
VIESGO DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA S. L. (50.0%)

72 Inventor/es:

MAÑANA CANTELI, Mario;
PIGAZO LÓPEZ, Alberto;
MÍNGUEZ MATORRAS, Rafael;
ÁLVAREZ LAVIN, Marcos y
RODRÍGUEZ ALONSO, José Iván

74 Agente/Representante:

LEÓN SERRANO, Javier

54 Título: **Sistema electrónico y método para la mitigación de ferroresonancias en transformadores de tensión**

57 Resumen:

Sistema configurado para la mitigación de ferroresonancias en transformadores de tensión, conectado al triángulo abierto de protección (11) formado por los devanados de protección del conjunto de transformadores de tensión conectados a una red eléctrica de potencia, que comprende: a) un bloque de decisión (22), y b) un bloque emulador de resistencia (23), que comprende a su vez un convertidor de potencia (25) y un procesador del valor de la tensión de entrada (24). Método para la mitigación de ferroresonancias en transformadores de tensión.

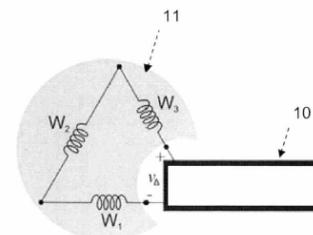


FIGURA 1

ES 2 756 923 B2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.
Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

DESCRIPCIÓN

Sistema electrónico y método para la mitigación de ferroresonancias en transformadores de tensión

5

Campo de la invención

La presente invención pertenece al campo de la ingeniería eléctrica, a la producción y distribución de la energía eléctrica, y más concretamente a los sistemas y métodos de protección en sistemas de medida y redes, en el área del amortiguamiento de ferroresonancias en transformadores de tensión empleados en sistemas eléctricos de potencia.

10

Antecedentes de la invención

El fenómeno de ferroresonancia tiene su origen en las características no lineales de los elementos empleados en los sistemas eléctricos de potencia. Condiciones de operación/explotación extraordinarias, pueden dar lugar a modos de oscilación no deseados que, a su vez, pueden ocasionar sobretensiones y sobrecorrientes.

15

Los sistemas eléctricos de distribución con neutro aislado son especialmente susceptibles de sufrir este fenómeno, debido a la saturación de los transformadores de tensión durante la ocurrencia de eventos, tales como faltas a tierra, que excitan frecuencias de oscilación del sistema distintas de la nominal, pudiendo resultar en este estado de operación estable, pero no deseado. Entre otras consecuencias, la aparición de ferroresonancias en transformadores de tensión da lugar al aumento de la temperatura en los transformadores [1], daños por calentamiento en el equipamiento eléctrico, rotura de los aisladores e incluso la destrucción total o parcial del transformador, así como el fallo de las protecciones del sistema [2].

20

25

Las ferroresonancias, atendiendo a sus características en el dominio de la frecuencia [19], pueden clasificarse en subarmónicas, fundamentales, periódicas y caóticas.

30

Existen diversas maneras de prevenir la ocurrencia de ferroresonancias en sistemas eléctricos de neutro aislado con transformadores de tensión. En una fase inicial de diseño del sistema es posible seleccionar parámetros y configuraciones que minimicen la posibilidad de ocurrencia de ferroresonancias estables. Por ejemplo, sobredimensionando los transformadores. Posteriormente, el estudio del sistema puede dar lugar a la necesidad de evitar determinado tipo de operaciones que puedan resultar en transitorios que, a su vez, produzcan ferroresonancias. Sin embargo, ambas aproximaciones son de tipo preventivo y no garantizan que se eviten las ferroresonancias. Solamente la utilización de sistemas de amortiguamiento apropiados permite asegurar una protección adecuada del sistema [3].

35

40

La configuración habitual para la medida de la tensión en sistemas eléctricos con neutro aislado consiste en la utilización de un juego de tres transformadores de tensión monofásicos con dos devanados secundarios, uno de medida y otro de protección. Los devanados de protección se configuran en triángulo abierto y a éste se conecta una resistencia de amortiguamiento para la mitigación del fenómeno. La elección del valor de la resistencia de amortiguamiento más apropiada en cada caso requiere el conocimiento previo de las características eléctricas de la red en el punto de conexión, del juego de transformadores de tensión, así como de las características eléctricas específicas de éstos [1].

45

50

De forma general, existen dos aproximaciones para amortiguar la ocurrencia de ferresonancias en sistemas eléctricos con transformadores de tensión: soluciones en el lado del primario, como las planteadas en [4-8], y soluciones en el lado del secundario [3, 9, 10].

5 La utilización de inductancias saturables en CA [4-5] y CC [6] permite limitar la corriente de falta y, evitar la ocurrencia de ferresonancias en transformadores de tensión. En el caso de transitorios que exciten la aparición de ferresonancias, como consecuencia de una sobretensión, la utilización de sistemas de amortiguamiento, como el mostrado en [7], pueden evitar la ocurrencia de ferresonancias. También, orientada hacia la amortiguación en el lado
10 del primario, en [8] se muestra la posibilidad de utilización de determinados equipos, como FACTS, para contribuir a su eliminación. Sin embargo, estos equipos trabajan con el nivel de tensión propio de la red de distribución, muy superior al del secundario del transformador de medida, siendo así más grandes, caros y complejos, debiendo cumplir con los niveles de aislamiento asociados.

15 Las soluciones disponibles en el secundario del transformador de tensión se pueden clasificar en tres categorías principales [9-10]: activas, pasivas y basadas en electrónica, también activas. A estos métodos se puede añadir la utilización de termistores [3]. La utilización de alguna de las soluciones de las dos primeras categorías da lugar a pérdidas durante
20 situaciones de operación distintas de las nominales de la red, incluida la de ferresonancia, mientras que la tercera categoría, emplea dispositivos electrónicos de potencia para conectar una resistencia de amortiguamiento al secundario de protección en caso de previsión o detección de ferresonancia.

25 Existen equipos comerciales de las dos primeras categorías [11-14]. De la tercera categoría existen patentes, como ES8201762, US3401272A o US6560128B1, y literatura especializada [15-18]. El esquema general adoptado en la tercera categoría consiste en la conexión en serie de dispositivos electrónicos de potencia, operando como interruptores estáticos, con un elemento resistivo que es el que realiza el amortiguamiento de la ferresonancia en el
30 devanado de protección. Los equipos disponen de una estrategia de detección y control que determina la forma de conectar la resistencia de amortiguamiento al devanado de protección. Sin embargo, la mitigación es llevada a cabo por la resistencia de amortiguamiento y el comportamiento del sistema es dependiente del valor de ésta. Dentro de esta categoría, el concepto de emulador resistivo se presenta en [20] que, mediante la conmutación de los
35 dispositivos electrónicos de potencia a una frecuencia varios órdenes de magnitud mayor que la nominal del sistema, es capaz de emular el comportamiento eléctrico de una resistencia.

Desde el punto de vista de las operadoras del sistema eléctrico, la prevención de los eventos de ferresonancia debidos a la presencia de transformadores de tensión no es trivial. Por un
40 lado, las características de la red cambian dinámicamente, dependiendo de la configuración y estado de operación de ésta, lo que dificulta la elección del valor óptimo de la resistencia de amortiguamiento. Por otro lado, las características de los transformadores de tensión conectados a una misma red eléctrica, y más específicamente sus curvas de magnetización, son diversas, dificultando el despliegue de una solución concreta de amortiguamiento,
45 especialmente cuando las instalaciones ajenas al operador de la red disponen también de juegos de transformadores de tensión. Adicionalmente, si bien la utilización de resistencias puede ser, en general, una solución válida para el amortiguamiento de las ferresonancias en transformadores de tensión, la conexión permanente de ésta al triángulo abierto de protección del juego de transformadores de tensión puede deteriorar térmicamente a éstos durante
50 eventos distintos a la ferresonancia, como es el caso de las faltas a tierra. Las soluciones pasivas y activas en [3, 9, 10] sufren uno, o ambos, de los dos inconvenientes indicados.

En referencia a los equipos de amortiguamiento basados en electrónica, en ES8201762, US3401272A, US6560128B1 y [15-18], los dispositivos electrónicos de potencia se emplean como interruptores que permiten conectar y desconectar la resistencia de amortiguamiento, que debe ser diseñada para las condiciones específicas en las que se produce el fenómeno de la ferresonancia, lo que limita la posibilidad de desplegar las soluciones que cubran una casuística amplia. Por otra parte, los dispositivos electrónicos de potencia utilizados en estas patentes y trabajos son solamente adecuados para su operación a frecuencias de conmutación bajas, típicamente en el ámbito de decenas-centenas de Hz, limitando las posibilidades de amortiguamiento de determinados tipos de ferresonancia, por ejemplo, de tipo fundamental [3, 19], donde parte de la energía del fenómeno debe dispersarse a una frecuencia superior.

Dentro de la categoría de los equipos de amortiguamiento basados en electrónica, la solución propuesta en [20] consiste en un convertidor de potencia *elevador Boost* que emula una resistencia, R_e , conectada a la red mediante un parámetro g_c establecido por el controlador del emulador. Sin embargo, debido a la restricción del convertidor *elevador Boost*, por la que la tensión de salida debe ser mayor que la de entrada, pueden darse situaciones en las que $R_e \rightarrow \infty$ durante el evento de la ferresonancia, impidiendo su adecuado amortiguamiento. En consecuencia, la solución en [20] requiere un diseño adecuado a las condiciones específicas de la ferresonancia, que no son enteramente previsibles, lo que también limita las posibilidades de despliegue de la solución.

Referencias

- [1] S. Mišák and J. Fulneček, "The influence of ferresonance on a temperature of voltage transformers in underground mines," 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/EPE.2017.7967361.
- [2] S. Rezaei, "Adaptive overcurrent protection against ferresonance," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 12, no. 7, pp. 1573-1588, 4 10 2018. doi: 10.1049/iet-gtd.2017.0651.
- [3] E. Price, "A tutorial on ferresonance," 2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, 2014, pp. 676-704. doi: 10.1109/CPRE.2014.6799036.
- [4] H.R. Abbasi Fordoei, H. Heydari, S.A. Afsari, "Elimination of chaotic ferresonance in power transformer by ISFCL", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 68, 2015, Pages 132-141, ISSN 0142-0615.
- [5] Hamid Reza Abbasi Fordoei, Ahmad Gholami, Seyyed Hamid Fathi, Ataollah Abbasi, "A new approach to eliminating of chaotic ferresonant oscillations in power transformer", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 67, 2015, Pages 152-160, ISSN 0142-0615.
- [6] H. Radmanesh, A. Heidary, S. H. Fathi and G. Babamalek Gharehpetian, "Dual function ferresonance and fault current limiter based on DC reactor," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 9, pp. 2058-2065, 6 9 2016. doi: 10.1049/iet-gtd.2015.1032.
- [7] T. Abdelazim, T. J. Dionise and R. Yanniello, "Protecting voltage transformers from switching induced transients and ferresonance," 2016 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference, Dallas, TX, 2016, pp. 1-17. doi: 10.1109/CITCON.2016.7742671.

- [8] S. Rezaei, "Impact of transmission line and plant outage on ferroresonance in AC transmission system and new suppression method," 13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017), Manchester, 2017, pp. 1-6. doi: 10.1049/cp.2017.0069.
- 5
- [9] C. Venkatesh, K. Shanti Swarup, "Performance assessment of distance protection fed by capacitor voltage transformer with electronic ferro-resonance suppression circuit", Electric Power Systems Research, Volume 112, 2014, Pages 12-19, ISSN 0378-7796.
- 10
- [10] S. A. Khan, A. H. A. Bakar, N. A. Rahim and C. Tan, "Analysis of ferroresonance suppression and transient response performances for various ferroresonance suppression circuits in capacitive voltage transformers," 3rd IET International Conference on Clean Energy and Technology (CEAT) 2014, Kuching, 2014, pp. 1-6. doi: 10.1049/cp.2014.1474.
- 15
- [11] VT Guard Pro / VT Guard Pro — D Solution for Ferroresonance Elimination, ABB, Videnska 117, 619 00 Brno, Czech Republic, 2016.
- [12] Damping Unit Against Ferro Resonance Oscillation, RITZ, Hamburg, Germany, 2013.
- 20
- [13] BE - Choke module for suppressing ferro-resonance, ELEQ, Tukseweg 130, 8331 LH Steenwijk, The Netherlands.
- [14] Ferro-damp ferroresonance protection, RION ELEKTRIK ELEKTRONIK BILIŞİM SAN. VE TIC. LTD. ŞTI. Tuzla, istanbul, Tiirkiye.
- 25
- [15] Mohammad Navaei, Ali Akbar Abdoos, Majid Shahabi, "A new control unit for electronic ferroresonance suppression circuit in capacitor voltage transformers", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 99, 2018, Pages 281-289, ISSN 0142-0615.
- 30
- [16] Ming Yang, Wenxia Sima, Lijun Chen, Pan Duan, Potao Sun, Tao Yuan, "Suppressing ferroresonance in potential transformers using a model-free activeresistance controller", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 95, 2018, Pages 384-393, ISSN 0142-0615.
- 35
- [17] Y. N. Ryzhkova and S. A. Tsyruk, "Ferroresonance suppression in distribution networks," 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, 2016, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911458.
- 40
- [18] W. Sima, M. Yang, Q. Yang, T. Yuan and M. Zou, "Simulation and experiment on a flexible control method for ferroresonance," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 8, no. 10, pp. 1744-1753, October 2014. doi: 10.1049/ietgtd. 2014.0046.
- [19] Ph. Ferraci, "Cahier Technique Schneider n° 190, Ferroresonance", Schneider Electric, 1998.
- 45
- [20] E. Bayona, F. Lopez, R. Martinez, R. Minguez, J.I. Rodriguez, C. Capellan, P. Lamo, F.J. Azcondo, M. Mafiana, A. Pigazo, M. Alvarez, "Dispositivos activos para la mitigación de ferroresonancias en transformadores de tensión en redes eléctricas de distribución de neutro aislado", CIGRE Workshop monitorizacion de lineas, Santander, 2017.
- 50

Resumen de la invención

La presente invención trata de resolver los inconvenientes mencionados anteriormente mediante un sistema y método configurados para la mitigación de ferroresonancias en transformadores de tensión.

El sistema está conectado al triángulo abierto de protección formado por los devanados de protección del conjunto de transformadores de tensión conectados a una red eléctrica de potencia, y comprende: a) un bloque de decisión, y b) un bloque emulador de resistencia, que comprende a su vez un convertidor de potencia y un procesador del valor de la tensión de entrada; tal que los terminales de entrada del bloque emulador de resistencia y del bloque de decisión se conectan a los terminales del triángulo abierto de protección, proporcionando dichos terminales la tensión de entrada al sistema $v\Delta$.

- la entrada del bloque de decisión se conecta a la entrada del procesador del valor de la tensión de entrada; y la salida del bloque de decisión se conecta al bloque emulador de resistencia, activándolo con el valor de resistencia a emular para la mitigación de la ferroresonancia o desactivándolo, tal que el bloque de decisión comprende una circuitería configurada para 1) comparar la tensión de entrada al sistema $v\Delta$ con un valor de referencia programable; 2) configurar el tiempo seleccionado para mitigar el fenómeno de ferroresonancia t_{amo} ; y 3) comunicarse con el procesador del valor de la tensión de entrada para indicar el valor de la resistencia equivalente R_e ;

- el procesador del valor de la tensión de entrada se conecta al triángulo abierto de protección con el fin de adquirir el valor de la tensión de entrada al sistema $v\Delta$, al bloque de decisión, que le proporciona el valor de la resistencia equivalente R_e , y al convertidor de potencia, tal que el procesador del valor de la tensión de entrada está configurado para que a partir del valor de resistencia equivalente R_e , obtener el tiempo t_{on} en el que cambia el estado de conmutación del al menos un interruptor activo que forma parte del convertidor de potencia, y generar, a partir de este valor t_{on} una señal de control c con dos posibles niveles (digital) que aplica al convertidor de potencia, con un flanco al inicio de cada periodo de conmutación y con un flanco opuesto en t_{on} ;

- el convertidor de potencia es un convertidor conmutado, CA/CC, unidireccional y de tipo *reductor-elevador*, y se conecta al triángulo abierto de protección con el fin de procesar la energía de la ferroresonancia, y al procesador del valor de la tensión de entrada, que le proporciona la señal de control, c , tal que el estado de operación de dicho convertidor de potencia está configurado para ajustar su estado de conmutación con la indicación de la señal de control c , y tal que cuando el convertidor de potencia se activa, impone la forma de $i\Delta$ para que sea proporcional a $v\Delta$, debido a que el convertidor de potencia emula la resistencia equivalente obtenida por el bloque de decisión, y se comporta de esta forma mediante la señal de control c que le proporciona el procesador del valor de la tensión de entrada;

- El bloque de carga (zona de corriente continua, CC) del convertidor de potencia recibe la energía desde el triángulo abierto de protección al que se conecta el sistema (zona de corriente alterna, AC).

En una posible realización, la implementación del bloque de decisión consiste en un filtro *anti-aliasing* y un controlador, con interfaces de entrada-salida analógicas y digitales.

En una posible realización, el procesador del valor de la tensión de entrada es un dispositivo digital programable tipo FPGA. Alternativamente, el procesador del valor de la tensión de

entrada es un circuito integrado dedicado, como es el caso del L6561 para realizaciones que sitúen al convertidor en el modo de operación límite entre el modo de conducción continuo y discontinuo.

- 5 En una posible realización, el bloque de carga del convertidor de potencia es un almacenador / disipador / convertidor de energía.

10 En una posible realización, el convertidor de potencia presenta una primera etapa CA/CC que consiste en un rectificador de diodos, y una segunda etapa CC/CC de conversión de potencia de tipo *reductor-elevador Flyback*, que comprende un inductor y un conmutador materializado por dos dispositivos de potencia que operan como interruptores, y adopta el modo de emulador de resistencia.

15 En una posible realización, en función de las necesidades de mitigación y de potencia, se acoplan en paralelo, es decir conectados a los terminales del triángulo abierto de protección dos o más sistemas de la invención, tal que, con cada sistema, la potencia nominal de todo el conjunto aumenta de forma sucesiva y la resistencia equivalente aplicada al triángulo abierto de protección varía en un intervalo mayor.

20 En otro aspecto de la invención, se proporciona un método para la mitigación de ferresonancias en transformadores de tensión utilizando el sistema definido anteriormente. El método comprende las etapas de:

25 - el bloque de decisión determina componentes de la tensión de entrada al sistema $v\Delta$, en diferentes bandas de frecuencia, y en función de los valores de referencia determina si existe o no ferresonancia y su severidad;

30 - en caso de ocurrencia de la ferresonancia, el bloque de decisión a partir de la tensión de entrada al sistema $v\Delta$ y del tiempo seleccionado para mitigar el fenómeno de ferresonancia t_{amo} , obtiene el valor de la resistencia equivalente R_e , según la ecuación:

$$R_e = R_1 \left(1 - \frac{R_2}{R_1} e^{-\frac{t}{t_{amo} - t_{act}/4}} \right) \quad [1]$$

donde:

las resistencias R_1 ; y R_2 dependen de $v\Delta$ y limitan el valor máximo (R_1) y mínimo (R_2) de la resistencia equivalente;

35 el tiempo t_{act} : corresponde al instante de tiempo en el que inicia su operación el emulador de resistencia;

40 - a continuación, el procesador del valor de la tensión de entrada determina, a partir del valor de resistencia equivalente R_e , el tiempo t_{on} en el que cambia el estado de conmutación del al menos un interruptor activo que forma parte del convertidor de potencia;

45 - a partir de este valor t_{on} , el procesador del valor de la tensión de entrada genera una señal de control c con dos posibles niveles (digital) que aplica al convertidor de potencia, con un flanco al inicio de cada periodo de conmutación y con un flanco opuesto en t_{on} , tal que el estado de conmutación de los interruptores del convertidor de potencia, conducción y no conducción, se establece mediante la señal de control c ;

- a continuación, el convertidor de potencia se activa con la indicación (señal de control c) del procesador del valor de la tensión de entrada, que indica en cada instante si el transistor del convertidor conduce corriente (t_{on}) o bloquea tensión (t_{off}), y la secuencia de tiempos t_{on} Y t_{off} resulta en la forma de onda y amplitud de corriente que impone el convertidor de potencia,
5 necesarias para conseguir la sincronización entre la corriente de entrada al sistema $i\Delta$ y la tensión de entrada al sistema $v\Delta$;

- la operación del convertidor de potencia resulta en una transferencia de energía desde el triángulo abierto de protección al que se conecta el sistema (zona de corriente alterna, AC) al
10 bloque de carga (zona de corriente continua, CC);

tal que cada cierto tiempo, el bloque de decisión obtiene un nuevo valor de resistencia equivalente, el procesador del valor de la tensión de entrada actualiza el valor t_{on} , y por ende la señal de control c , y el convertidor de potencia emula la resistencia equivalente actualizada,
15 garantizando la sincronización de tensión e intensidad.

En una posible realización, el bloque de decisión, en una primera fase, obtiene el valor eficaz de la tensión de entrada $v\Delta$ en al menos dos bandas de frecuencia i) alrededor de la fundamental definida por las frecuencias máxima y mínima de la red, según establezcan los
20 estándares aplicables, ii) resto de frecuencias o aquellos intervalos de frecuencias que se consideren de interés; en una segunda fase, compara los valores eficaces de cada una de las bandas de frecuencia con los límites establecidos para i) la detección de las condiciones de ocurrencia de la ferresonancia y ii) la confirmación de la ocurrencia de la ferresonancia; y en una tercera fase, determina si estos niveles se mantienen durante el tiempo necesario para
25 requerir o mantener la señal de activación del bloque emulador de resistencia.

Breve descripción de las figuras

Con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de
30 acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica del mismo, y para complementar esta descripción, se acompaña como parte integrante de la misma, un juego de dibujos, cuyo carácter es ilustrativo y no limitativo. En estos dibujos:

La figura 1 muestra un detalle de la conexión del sistema de la invención al triángulo abierto de
35 protección del juego de transformadores de medida de tensión.

La figura 2 muestra un diagrama de bloques del sistema de la invención.

La figura 3 muestra un esquema de la señal de control c , de acuerdo a una posible realización
40 de la invención.

La figura 4 muestra una gráfica del efecto mitigador del sistema de la invención, de acuerdo a una posible realización de la invención.

45 Descripción detallada de la invención

En este texto, el término “comprende” y sus variantes no deben entenderse en un sentido excluyente, es decir, estos términos no pretenden excluir otras características técnicas, aditivos, componentes o pasos.
50

Además, los términos “aproximadamente”, “sustancialmente”, “alrededor de”, “unos”, etc. deben entenderse como indicando valores próximos a los que dichos términos acompañen, ya que por errores de cálculo o de medida, resulte imposible conseguir esos valores con total exactitud.

5 Las características del sistema de la invención, así como las ventajas derivadas de las mismas, podrán comprenderse mejor con la siguiente descripción, hecha con referencia a los dibujos antes enumerados.

10 Las siguientes realizaciones preferidas se proporcionan a modo de ilustración, y no se pretende que sean limitativos de la presente invención. Además, la presente invención cubre todas las posibles combinaciones de realizaciones particulares y preferidas aquí indicadas. Para los expertos en la materia, otros objetos, ventajas y características de la invención se desprenderán en parte de la descripción y en parte de la práctica de la invención.

15 A continuación, se describe el sistema electrónico y método de la invención para la mitigación de ferresonancias en transformadores de tensión mediante la utilización de convertidores electrónicos de potencia operando como emuladores resistivos, de acuerdo con el esquema del mismo de las figuras 1 y 2. El sistema de la invención 10 se conecta al triángulo abierto de protección 11 formado por los devanados de protección del conjunto de transformadores de tensión conectados a una red eléctrica de potencia.

20 El sistema comprende dos partes con diferentes cometidos: a) un bloque de decisión 22; y b) un bloque emulador de resistencia 23, que comprende a su vez un convertidor de potencia 25 y un procesador del valor de la tensión de entrada 24. El conjunto bloque emulador de resistencia 23 y bloque de decisión 22 conforman el sistema de la invención.

30 Los terminales de entrada del bloque emulador de resistencia 23 (convertidor de potencia 25 y procesador del valor de la tensión de entrada 24) y del bloque de decisión 22 se conectan a los terminales del triángulo abierto de protección, proporcionando dichos terminales la tensión de entrada al sistema $v\Delta$. Además, el bloque emulador de resistencia 23 impone la corriente de entrada al sistema $i\Delta$, que circula por el triángulo abierto de protección.

35 A lo largo de la presente descripción, se denominará $v\Delta$, a la tensión de entrada al sistema, y $i\Delta$ a la intensidad de entrada al sistema; no obstante, es importante tener en cuenta que la tensión de entrada al sistema es la misma que la tensión entre los terminales del triángulo abierto de protección; y la intensidad de entrada al sistema es la misma que la intensidad que circula por el secundario en configuración de triángulo, una vez conectado éste con la invención.

40 a) La entrada del bloque de decisión 22 se conecta a la entrada del procesador del valor de la tensión de entrada 24; y la salida del bloque de decisión 22 se conecta al bloque emulador de resistencia 23, activándolo con el valor de resistencia a emular para la mitigación de la ferresonancia o desactivándolo.

45 El bloque de decisión 22 determina a partir de la tensión de entrada al sistema $v\Delta$ si, mediante la comparación con uno o varios valores de referencia, las condiciones de operación de los transformadores de tensión del triángulo de protección pueden resultar en una situación de ferresonancia y, en su caso, confirma este modo de operación no deseado. El bloque de
50 decisión 22 determina los instantes de activación y detención del bloque emulador de resistencia 23. Dependiendo del modo de operación seleccionado, la activación se produce bien cuando las condiciones de operación pueden dar lugar a la ocurrencia de una

ferroresonancia, o bien una vez se ha confirmado su ocurrencia, para proceder a su mitigación. El tiempo transcurrido entre la confirmación de la ocurrencia de la ferroresonancia y la activación del mitigador es configurable.

- 5 Para ello, el bloque de decisión 22 determina componentes de la tensión de entrada al sistema $v\Delta$ en diferentes bandas de frecuencia, y en función de los valores de referencia determina si existe o no ferroresonancia y su severidad.

10 En caso de ocurrencia de la ferroresonancia, el bloque de decisión 22 activa el bloque emulador de resistencia 23 presentando una resistencia equivalente R_e ajustable en función de la severidad de la ferroresonancia, controlando así, la forma de extraer la energía asociada al fenómeno.

15 Es decir, el bloque de decisión 22, a partir de la tensión de entrada al sistema $v\Delta$ y del tiempo seleccionado para mitigar el fenómeno de ferroresonancia t_{amo} , obtiene el valor de la resistencia equivalente R_e , según la ecuación:

$$R_e = R_1 \left(1 - \frac{R_2}{R_1} e^{-\frac{t}{t_{amo} - t_{act}/4}} \right)$$

Donde:

20 Las resistencias R_1 ; y R_2 dependen de $v\Delta$ y limitan el valor máximo (R_1) y mínimo (R_2) de la resistencia equivalente. Esta información (umbrales de operación) la proporciona el bloque de decisión 22 en función de la configuración realizada por el usuario. Una resistencia equivalente inferior a R_2 implica una sobrecarga del transformador, mientras que una resistencia equivalente superior a R_1 ; puede dificultar la mitigación de la ferroresonancia en el tiempo requerido.

El tiempo t_{act} corresponde al instante de tiempo en el que inicia su operación el bloque emulador de resistencia 23.

30 En una realización de la invención, el bloque de decisión 22, en una primera fase, obtiene el valor eficaz de la tensión de entrada $v\Delta$ en al menos dos bandas de frecuencia i) alrededor de la fundamental, ii) resto de frecuencias o aquellos intervalos de frecuencias que se consideren de interés. Un experto en la materia entenderá que la banda de frecuencias alrededor de la fundamental está definida por las frecuencias máxima y mínima de la red, según establezcan los estándares aplicables. En una segunda fase, compara los valores eficaces de cada una de las bandas de frecuencia con los límites establecidos para i) la detección de las condiciones de ocurrencia de la ferroresonancia y ii) la confirmación de la ocurrencia de la ferroresonancia. En una tercera fase, determina si estos niveles se mantienen durante el tiempo necesario para requerir o mantener la señal de activación del bloque emulador de resistencia 23.

40 La circuitería del bloque de decisión 22 debe ser aquella que permita 1) comparar la tensión de entrada al sistema $v\Delta$ con un valor de referencia programable; 2) configurar el tiempo seleccionado para mitigar el fenómeno de ferroresonancia t_{amo} ; y 3) comunicarse con el procesador del valor de la tensión de entrada 24 para indicar el valor de la resistencia equivalente R_e . En una realización concreta se han utilizado un filtro anti-aliasing y un controlador, con interfaces de entrada-salida analógicas y digitales, para la implementación del bloque de decisión 22, aunque un experto en la materia entenderá que otras configuraciones son posibles.

b) El bloque emulador de resistencia 23 está configurado para transformar la energía de la ferresonancia con efecto equivalente al que produce la conexión de una resistencia variable cuyo valor está controlado por la tensión en el triángulo abierto de protección. Como se ha indicado anteriormente, el bloque emulador de resistencia 23 comprende el procesador del valor de tensión de entrada 24 y el convertidor de potencia 25.

- El procesador del valor de la tensión de entrada 24 se conecta a los terminales del triángulo abierto de protección con el fin de adquirir el valor de la tensión de entrada al sistema v_{Δ} . Además, se encuentra conectado al bloque de decisión 22, que le proporciona el valor de la resistencia equivalente R_e , y al convertidor de potencia 25.

El procesador del valor de la tensión de entrada 24 determina, a partir de la tensión de entrada al sistema v_{Δ} y del valor de resistencia equivalente R_e , la intensidad de entrada al sistema i_{Δ} , mediante la ecuación:

$$i_{\Delta} = v_{\Delta} / R_e$$

Además, el procesador del valor de la tensión de entrada 24 obtiene el tiempo t_{on} en el que cambia el estado de conmutación del al menos un interruptor activo que forma parte del convertidor de potencia 25.

Este valor, t_{on} , depende del tipo de convertidor de potencia 25 utilizado y de su modo de operación: modo de operación continuo en el que la corriente por el o los inductores nunca es cero, modo de operación discontinuo en el que en parte del periodo de conmutación la corriente por el inductor o uno de los inductores es cero o límite entre el modo de conducción continuo y discontinuo en el que la corriente por el inductor o uno de los inductores llega a ser cero al final del periodo de conmutación.

Por ejemplo, para un convertidor de potencia 25 *reductor-elevador* con aislamiento tipo *Flyback*, con un único interruptor, operando en modo de conducción discontinuo y con periodo de conmutación, T , y L la inductancia de magnetización vista desde el primario del componente magnético que proporciona aislamiento, t_{on} se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$t_{on} = \sqrt{\frac{2LT}{R_e}}$$

Por ejemplo, en el caso de imponer a este convertidor la operación en el límite entre modo de conducción continuo y discontinuo y considerando una relación de vueltas entre el devanado secundario y primario del componente magnético que proporciona aislamiento $N_2/N_1 = n$ y una tensión de salida v_o , t_{on} se obtendría mediante la siguiente ecuación:

$$t_{on} = \frac{2L}{R_e} \left(1 + n \frac{v_{\Delta}}{v_o} \right)$$

A partir de este valor t_{on} , y como se observa en la figura 3, el procesador del valor de la tensión de entrada 24 genera una señal de control c con dos posibles niveles (digital) que aplica al convertidor de potencia 25, con un flanco al inicio de cada periodo de conmutación y con un flanco opuesto en t_{on} . Esto es, el estado de conmutación de los interruptores del convertidor de potencia 25, conducción y no conducción, se establece mediante la señal de control c con frecuencia típicamente varios órdenes de magnitud mayor que la nominal de la red.

El procesador del valor de la tensión de entrada 24 del bloque emulador de resistencia 23, que controla la operación del convertidor de potencia 25 puede ser digital o analógico.

5 En el primer caso, se utiliza de forma preferente un dispositivo digital programable tipo FPGA. En el segundo caso, un circuito integrado dedicado, como es el caso del L6561 para realizaciones que sitúen al convertidor en el modo de operación límite entre el modo de conducción continuo y discontinuo.

10 - El convertidor de potencia 25 se conecta a los terminales del triángulo abierto de protección con el fin de procesar la energía de la ferresonancia. Además, se encuentra conectado al procesador del valor de la tensión de entrada 24, que le proporciona la señal de control, *c*. El convertidor de potencia 25 comprendido en el bloque emulador de resistencia 23 es un convertidor de potencia 25 conmutado, CA/CC, unidireccional y de tipo *reductor-elevador*:

- 15 1) conmutado para permitir que, a través de al menos un interruptor, sea posible la selección de los estados de conducción y no conducción (bloqueo) y, de esta forma, ajustar R_e ;
- 2) CA/CC porque la entrada al convertidor de potencia 25 proviene de la red eléctrica y por lo tanto siempre es alterna;
- 20 3) unidireccional porque el objetivo del sistema de la invención es extraer la energía de la ferresonancia de la red eléctrica, pero no volverla a inyectar durante el tiempo en el que se mitiga la ferresonancia;
- 4) de tipo *reductor-elevador* para que sea posible ajustar R_e de forma continua a lo largo de todo el proceso de mitigación de la ferresonancia, sin condiciones restrictivas entre los valores de tensión de entrada y salida.

25 El convertidor de potencia 25 se activa con la indicación (señal de control *c*) del procesador del valor de la tensión de entrada 24. La señal *c* indica en cada instante si el transistor del convertidor de potencia 25 conduce corriente (t_{on}) o bloquea tensión (t_{off}) y la secuencia de tiempos t_{on} y t_{off} resulta en la forma de onda y amplitud de corriente $i\Delta$ necesarias para cumplir el valor de R_e . Por tanto, cuando el convertidor de potencia 25 se activa, este impone la forma de $i\Delta$ para que sea proporcional a $v\Delta$. La constante de proporcionalidad entre $v\Delta$ e $i\Delta$, R_e , la indica también el procesador del valor de la tensión de entrada 24. La operación del convertidor de potencia 25 resulta en una transferencia de energía desde el triángulo de protección al que se conecta el sistema (zona de corriente alterna, AC) al bloque de carga (zona de corriente continua, CC). El bloque de carga del convertidor de potencia 25 puede ser un sistema almacenador de energía, uno disipador de energía u otro sistema almacenador / disipador / convertidor de energía, en función de la utilidad que quiera darse a la energía extraída de la red durante la ferresonancia.

40 Un experto en la materia entenderá que la sincronización entre la corriente de entrada al sistema $i\Delta$, y la tensión de entrada al sistema $v\Delta$ es necesaria para conseguir el efecto de emulación de resistencia. De lo contrario, si corriente e intensidad no se encontrasen en fase, el comportamiento del sistema y método de la invención ya no sería equivalente al de una resistencia. El sistema y método de la invención permite esta sincronización gracias a la señal de control *c*. Esto es, el convertidor de potencia 25 emula la resistencia equivalente obtenida por el bloque de decisión 22, y se comporta de esta forma mediante la señal de control *c* que le proporciona el procesador del valor de la tensión de entrada 24.

50 El método de la invención para la mitigación de ferresonancias en transformadores de tensión es un método dinámico, de ahí su gran interés, pues la resistencia equivalente es variable y se ajusta a las condiciones de la red. Es decir, cada cierto tiempo (por ejemplo, en el flanco ascendente de cada periodo de conmutación), el bloque de decisión 22 obtiene un valor

de resistencia equivalente. A continuación, el procesador del valor de la tensión de entrada 24 actualiza el valor t_{on} , y por ende la señal de control c . Esta actualización de c , permite al convertidor de potencia 25 emular la resistencia equivalente actualizada, garantizando la sincronización de tensión e intensidad. Esto es, el valor promedio de la corriente de entrada al sistema $i\Delta$; en cada periodo de conmutación adopta la forma (amplitud y fase) de la referencia de corriente obtenida a través de $v\Delta$ tendiendo a obtener un factor de potencia unidad durante la mitigación de la ferresonancia. Como consecuencia, se obtiene un comportamiento equivalente a una resistencia variable controlada por el valor de la tensión de entrada al sistema, $v\Delta$.

10 La sincronización y el control del convertidor de potencia 25 como emulador de resistencia se consigue con una señal de control c aplicada al convertidor de potencia 25, que cumpla con determinadas características en función del convertidor utilizado:

15 - convertidores indirectos, de tipo *reductor-elevador Buck-Boost*, *reductor-elevador con aislamiento Flyback*, *Ćuk*, *SEPIC*... operando a frecuencia de conmutación constante ($t_{on} + t_{off}$ constante) o tiempo conducción constante (t_{on} constante).

20 En una posible realización, el convertidor de potencia 25 presenta una primera etapa CA/CC que consiste en un rectificador de diodos, y una segunda etapa CC/CC de conversión de potencia de tipo *reductor-elevador Flyback*, que comprende un inductor y un conmutador materializado por dos dispositivos de potencia que operan como interruptores, y adopta el modo de emulador de resistencia, es decir, de tal forma que el valor inicial y final de la corriente de entrada al sistema $i\Delta$, es idealmente cero en cada periodo de conmutación y el valor máximo es proporcional a la tensión de entrada.

25 En este ejemplo de realización, la segunda etapa CC/CC está configurada para que, sin necesidad de un control lineal de corriente, el resultado sea que el valor medio de corriente de entrada al sistema en cada periodo de conmutación, que es también la corriente que circula por el inductor, sea proporcional a la tensión de entrada $v\Delta$ y por tanto se garantice la operación como emulador de resistencia. Un experto en la materia entenderá que la operación como emulación de resistencia también se puede obtener con otro tipo de control no lineal o lineal, sin necesariamente trabajar en el límite entre el modo de conducción continuo y discontinuo.

35 En el caso de utilizar un rectificador con diodos, si la corriente de salida del rectificador de diodos, que es la corriente de entrada al convertidor de potencia 25 conmutado mantiene la misma forma que la tensión salida del rectificador de diodos, entonces la corriente de entrada al rectificador de diodos mantiene la misma forma que la tensión de entrada $v\Delta$, consiguiendo la operación como emulador de resistencia.

40 En función de las necesidades de mitigación y de potencia, es posible acoplar en paralelo, es decir conectados a los terminales del triángulo abierto de protección, dos o más sistemas de la invención. Con cada sistema, la potencia nominal de todo el conjunto aumentará de forma sucesiva y la resistencia equivalente aplicada al triángulo abierto de protección varía en un intervalo mayor. Un experto en la materia entenderá que, si el convertidor de potencia 25 incluye aislamiento galvánico, las salidas de diversos sistemas de la invención conectados a la misma $v\Delta$, pueden también conectarse, obteniendo una salida unificada. En el caso de utilizar sistemas de la invención diferentes o de no disponer de aislamiento, las salidas de cada sistema serán independientes. El bloque de decisión 22 es único para cada sistema.

50 El funcionamiento del sistema de la invención es el siguiente: el bloque de decisión 22 monitoriza la tensión de entrada del sistema $v\Delta$. Cuando la medida presenta componentes frecuenciales y valores propios de una ferresonancia, activa el bloque emulador de

resistencia 23. Durante la mitigación de la ferresonancia, la amplitud de la señal de tensión de entrada del sistema $v\Delta$ permite al bloque de decisión 22 establecer el nivel de energía de la ferresonancia y, a partir de éste, establece el valor más adecuado de resistencia equivalente, R_e , a aplicar.

5

En el bloque emulador de resistencia 23, el procesador del valor de la tensión de entrada 24 utiliza la medida de la tensión de entrada del sistema $v\Delta$ y el valor de la resistencia equivalente a emular para establecer la señal de control del convertidor de potencia 25. Operando éste con una eficiencia cercana a la unidad, la energía procesada por el convertidor electrónico de potencia durante la mitigación se transfiere a un bloque de carga, donde la energía se almacena y disipa, dependiendo del funcionamiento del convertidor electrónico de potencia.

10

El efecto mitigador del sistema de la invención se observa en la figura 4, donde se muestra la tensión de entrada del sistema $v\Delta$ para una ferresonancia de tipo subarmónico. Durante la falta, el circuito resonante equivalente aumenta su energía. Una vez se activan las protecciones aparece la ferresonancia en el transformador de tensión, en el instante t_{ini} . El bloque de detección del mitigador mantiene $R_e \rightarrow \infty$ hasta que confirma la ferresonancia y activa el emulador resistivo en el instante t_{act} reduciendo R_e a valores típicamente en la decena de ohmios. El emulador de resistencia, activado en t_{act} , mediante el bloque de procesado de la tensión, conforma la forma de onda de la corriente de entrada al sistema $i\Delta$, durante la mitigación y, la amplitud de ésta, es modulada por R_e . Como resultado de la R_e aplicada al triángulo abierto de protección, la ferresonancia es amortiguada en el instante t_{amo} .

15

20

De forma alternativa a la estrategia de detección descrita, es posible emplear otras estrategias de detección existentes, como la basada en la medida de las vibraciones y ruido recogida en la patente ES 2 617 105 B2. Sin embargo, debe considerarse que no todas las estrategias de detección permiten establecer qué conjunto de transformadores de tensión se encuentra en riesgo de sufrir ferresonancia y, en ese caso, el mitigador solo podría activarse en caso de ocurrencia de la ferresonancia. Tal es el caso de la patente ES 2 617 105 B2. Además, las estrategias de detección en la literatura no establecen el valor de R_e .

25

30

El principio de funcionamiento del sistema de la invención se sustenta en el de los emuladores resistivos presentados en [20]. A diferencia de la solución en [20], las topologías de emulador resistivo seleccionadas para la invención permiten obtener una resistencia equivalente dependiente, per se, de la energía de la ferresonancia, permitiendo desacoplar este efecto en el diseño de la etapa de potencia y el controlador.

35

El sistema de la invención se comporta de forma equivalente a una resistencia variable, cuyo valor depende de la energía de la ferresonancia y es independiente del tipo de ferresonancia considerada. El valor de la resistencia equivalente se ajusta dinámicamente mediante el controlador empleado. Además, el sistema es capaz de detectar las condiciones de operación previas a la ocurrencia de una ferresonancia en transformadores de tensión y puede actuar de forma preventiva, antes de su ocurrencia, o una vez sucede ésta, minimizando el efecto sobre el transformador de tensión y mitigando el fenómeno.

40

La potencia del sistema se puede adaptar en función de la aplicación o infraestructura donde vaya a ser utilizado, según el estado del arte de los dispositivos semiconductores y materiales magnéticos, considerando para el diseño la máxima tensión que debe soportar el sistema. Si la máxima energía que se prevé extraer en la situación de ferresonancia supera las especificaciones del módulo mitigador se pueden disponer en paralelo el número de sistemas necesarios, que se conectan al triángulo abierto de protección formado por los devanados de protección de los transformadores de tensión.

45

50

REIVINDICACIONES

1. Sistema configurado para la mitigación de ferresonancias en transformadores de tensión, conectado al triángulo abierto de protección (11) formado por los devanados de protección del conjunto de transformadores de tensión conectados a una red eléctrica de potencia, que comprende: a) un bloque de decisión (22), y b) un bloque emulador de resistencia (23), que comprende a su vez un convertidor de potencia (25) y un procesador del valor de la tensión de entrada (24); tal que los terminales de entrada del bloque emulador de resistencia (23) y del bloque de decisión (22) se conectan a los terminales del triángulo abierto de protección (11), proporcionando dichos terminales la tensión de entrada al sistema $v\Delta$, donde:

- la entrada del bloque de decisión (22) se conecta a la entrada del procesador del valor de la tensión de entrada (24); y la salida del bloque de decisión (22) se conecta al bloque emulador de resistencia (23), activándolo con el valor de resistencia a emular para la mitigación de la ferresonancia o desactivándolo, tal que el bloque de decisión (22) comprende una circuitería configurada para 1) comparar la tensión de entrada al sistema $v\Delta$ con un valor de referencia programable; 2) configurar el tiempo seleccionado para mitigar el fenómeno de ferresonancia t_{amo} ; y 3) comunicarse con el procesador del valor de la tensión de entrada (24) para indicar el valor de la resistencia equivalente R_e ;

- el procesador del valor de la tensión de entrada (24) se conecta a los terminales del triángulo abierto de protección (11) con el fin de adquirir el valor de la tensión de entrada al sistema $v\Delta$, y al bloque de decisión (22), que le proporciona el valor de la resistencia equivalente R_e , y al convertidor de potencia (25), tal que el procesador del valor de la tensión de entrada (24) está configurado para a partir del valor de resistencia equivalente R_e o del valor de la resistencia equivalente R_e y de la tensión de salida v_o , según el convertidor de potencia empleado, obtener el tiempo t_{on} en el que cambia el estado de conmutación del al menos un interruptor activo que forma parte del convertidor de potencia (25), y generar, a partir de este valor t_{on} , que limita la tensión de salida v_o del convertidor de potencia, una señal de control c con dos posibles niveles (digital) que aplica al convertidor de potencia (25), con un flanco al inicio de cada periodo de conmutación y con un flanco opuesto en t_{on} ;

- el convertidor de potencia (25) es un convertidor conmutado, CA/CC, unidireccional y de tipo *reductor-elevador*, y se conecta a los terminales del triángulo abierto de protección (11) con el fin de procesar la energía de la ferresonancia, y al procesador del valor de la tensión de entrada (24), que le proporciona la señal de control, c , tal que el estado de operación de dicho convertidor de potencia (25) está configurado para ajustar su estado de conmutación con la indicación de la señal de control c , y tal que cuando el convertidor de potencia (25) se activa, impone la forma de $i\Delta$ para que sea proporcional a $v\Delta$, debido a que el convertidor de potencia (25) emula la resistencia equivalente obtenida por el bloque de decisión (22), y se comporta de esta forma mediante la señal de control c que le proporciona el procesador del valor de la tensión de entrada (24);

- El bloque de carga (zona de corriente continua, CC) del convertidor de potencia (25) recibe la energía desde el triángulo abierto de protección (11) al que se conecta el sistema (zona de corriente alterna, AC).

2. El sistema de la reivindicación anterior, donde la implementación del bloque de decisión (22) consiste en un filtro anti-*aliasing* y un controlador, con interfaces de entrada-salida analógicas y digitales.

3. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el procesador del valor de la tensión de entrada (24) es un dispositivo digital programable tipo FPGA.
- 5 4. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1 y 2, donde el procesador del valor de la tensión de entrada (24) es un circuito integrado dedicado, como es el caso del L6561 para realizaciones que sitúen al convertidor de potencia (25) en el modo de operación límite entre el modo de conducción continuo y discontinuo.
- 10 5. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el bloque de carga del convertidor de potencia (25) es un sistema almacenador / disipador / convertidor de energía.
- 15 6. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el convertidor de potencia (25) presenta una primera etapa CA/CC que consiste en un rectificador de diodos, y una segunda etapa CC/CC de conversión de potencia de tipo *reductor-elevador Flyback*, que comprende un inductor y un conmutador materializado por dos dispositivos de potencia que operan como interruptores, y adopta el modo límite entre conducción continua y discontinua.
- 20 7. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde en función de las necesidades de mitigación y de potencia, se acoplan en paralelo, es decir conectados a los terminales del triángulo abierto de protección (11) dos o más sistemas de la invención, tal que, con cada sistema, la potencia nominal de todo el conjunto aumenta de forma sucesiva y la resistencia equivalente aplicada al triángulo abierto de protección (11) varía en un intervalo mayor.
- 25 8. Método para la mitigación de ferroresonancias en transformadores de tensión utilizando el sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que comprende las etapas de:
- 30 - el bloque de decisión (22) determina componentes de la tensión de entrada al sistema $v\Delta$ en diferentes bandas de frecuencia, y en función de los valores de referencia determina si existe o no ferroresonancia y su severidad;
- 35 - en caso de ocurrencia de la ferroresonancia, el bloque de decisión (22) a partir de la tensión de entrada al sistema $v\Delta$ y del tiempo seleccionado para mitigar el fenómeno de ferroresonancia t_{amo} , obtiene el valor de la resistencia equivalente R_e , según la ecuación:

$$R_e = R_1 \left(1 - \frac{R_2}{R_1} e^{-\frac{t}{t_{amo} - t_{act}/4}} \right)$$

donde:

- las resistencias R_1 y R_2 dependen de $v\Delta$ y limitan el valor máximo (R_1) y mínimo (R_2) de la resistencia equivalente;
- 40 el tiempo t_{act} corresponde al instante de tiempo en el que inicia su operación el bloque emulador de resistencia (23);
- a continuación, el procesador del valor de la tensión de entrada (24) determina, a partir del valor de resistencia equivalente R_e , el tiempo t_{on} en el que cambia el estado de conmutación del al menos un interruptor activo que forma parte del convertidor de potencia (25);
- 45

- 5 - a partir de este valor t_{on} , el procesador del valor de la tensión de entrada (24) genera una señal de control c con dos posibles niveles (digital) que aplica al convertidor de potencia (25), con un flanco al inicio de cada periodo de conmutación y con un flanco opuesto en t_{on} , tal que el estado de conmutación de los interruptores del convertidor de potencia (25), conducción y no conducción, se establece mediante la señal de control c ;
- 10 - a continuación, el convertidor de potencia (25) se activa con la indicación (señal de control c) del procesador del valor de la tensión de entrada (24), que indica en cada instante si el transistor del convertidor de potencia (25) conduce corriente (t_{on}) o bloquea tensión (t_{off}), y la secuencia de tiempos t_{on} y t_{off} resulta en la forma de onda y amplitud de corriente que impone el convertidor de potencia (25), necesarias para conseguir la sincronización entre la corriente de entrada al sistema $i\Delta$ y la tensión de entrada al sistema $v\Delta$;
- 15 - la operación del convertidor de potencia (25) resulta en una transferencia de energía desde el triángulo abierto de protección (11) al que se conecta el sistema (zona de corriente alterna, AC) al bloque de carga (zona de corriente continua, CC);
- 20 tal que cada cierto tiempo, el bloque de decisión (22) obtiene un nuevo valor de resistencia equivalente, el procesador del valor de la tensión de entrada (24) actualiza el valor t_{on} , y por ende la señal de control c , y el convertidor de potencia (25) emula la resistencia equivalente actualizada, garantizando la sincronización de tensión e intensidad.
- 25 9. El método de la reivindicación anterior donde el bloque de decisión (22), en una primera fase, obtiene el valor eficaz de la tensión de entrada $v\Delta$ en al menos dos bandas de frecuencia i) alrededor de la fundamental definida por las frecuencias máxima y mínima de la red, según establezcan los estándares aplicables, ii) resto de frecuencias o aquellos intervalos de frecuencias que se consideren de interés; en una segunda fase, compara los valores eficaces de cada una de las bandas de frecuencia con los límites establecidos para i) la detección de las condiciones de ocurrencia de la ferresonancia y ii) la confirmación de la ocurrencia de la
- 30 ferresonancia; y en una tercera fase, determina si estos niveles se mantienen durante el tiempo necesario para requerir o mantener la señal de activación del bloque emulador de resistencia (23).

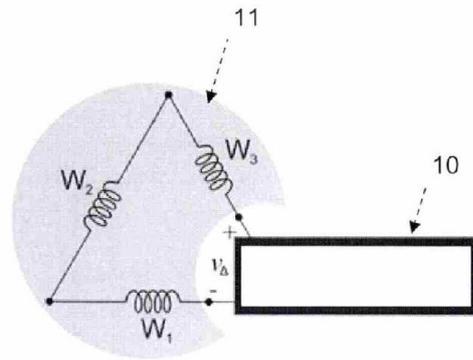


FIGURA 1

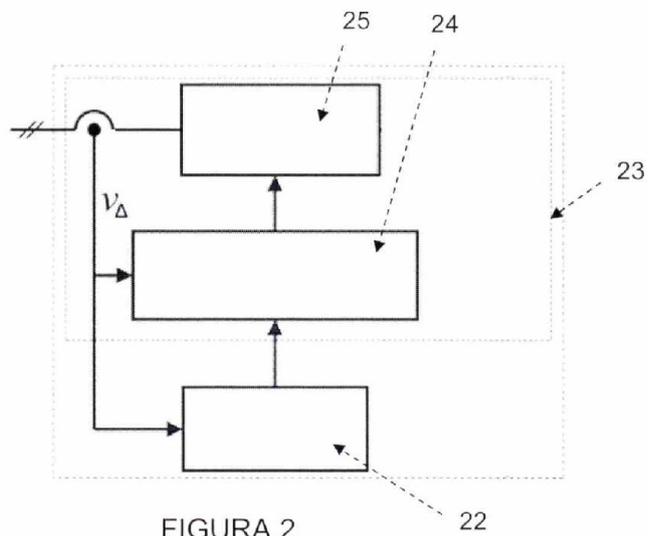


FIGURA 2

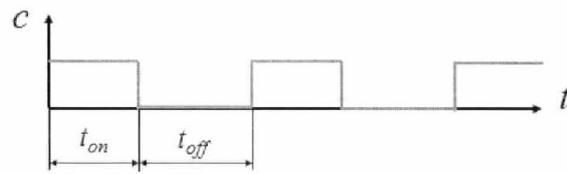


FIGURA 3

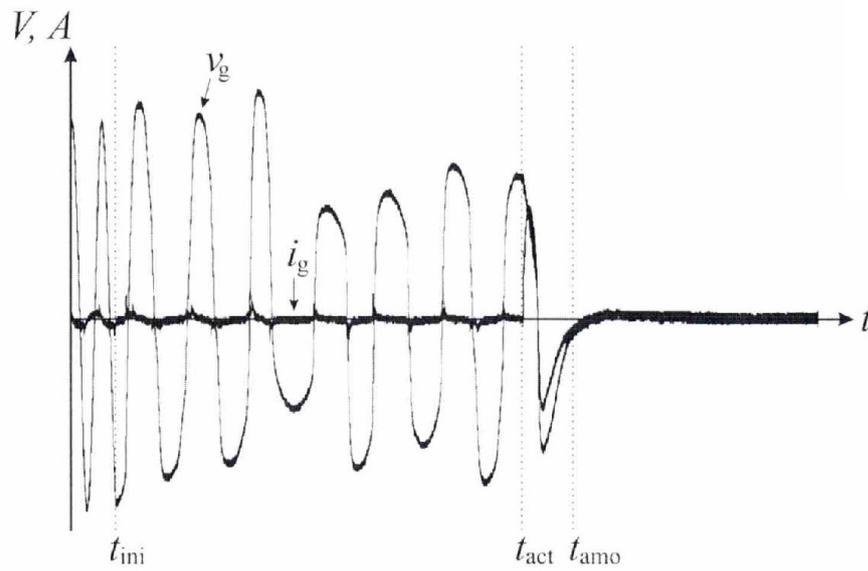


FIGURA 4