(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **1 331 965**

(21) Número de solicitud: 202531209

(51) Int. CI.:

G01R 31/00	(2006.01)	***G06F 17/00***	(2009.01)
G01R 19/25	(2006.01)	***H02J 13/00***	(2006.01)
H02J 3/26	(2006.01)		
G01R 29/00	(2006.01)		

(12) SOLICITUD DE MODELO DE UTILIDAD U

(22) Fecha de presentación:

17.05.2023

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

23.10.2026

(71) Solicitantes:

UNIVERSIDAD DE HUELVA (100,00%)
Dr. Cantero Cuadrado, 6
21071 Huelva (Huelva) ES

(72) Inventor/es:

SÁNCHEZ HERRERA, Mª Reyes;
RODRÍGUEZ VÁZQUEZ, Jesús;
PÉREZ LITRÁN, Salvador;
DELGADO MARTÍN, Aránzazu;
DÍAZ CANO, Juan Mª y
GÓMEZ RUIZ, Gabriel

(74) Agente/Representante:

MARQUEZ DOMINGUEZ, Juan Antonio

(54) Título: **Sistema de monitorización de la calidad de onda en microrredes eléctricas**

ES 1 331 965 U

DESCRIPCIÓN

Sistema de monitorización de la calidad de onda en microrredes eléctricas

SECTOR DE LA TÉCNICA

La presente invención se encuentra englobada dentro de la industria relacionada con la ingeniería eléctrica, electrónica y de comunicaciones. Dentro de este sector, la invención se centra en soluciones que comprenden una red de sensores con los que se puede medir y analizar magnitudes eléctricas, y más concretamente, la calidad de la potencia eléctrica.

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

La calidad del suministro eléctrico (electric power quality EPQ) y, en concreto, la calidad de la onda eléctrica es un tema con una importancia creciente en el ámbito de la Ingeniería Eléctrica. En efecto, hasta hace unas décadas, el mayor problema del Regulador del Sistema era garantizar el suministro. Hoy día, una vez solucionado este problema, en un porcentaje alto en los países desarrollados están apareciendo otras muchas cuestiones con efectos negativos.

En este sentido, el uso creciente en instalaciones comerciales e industriales de cargas cuyo funcionamiento se basa en la electrónica de potencia, ha tenido como consecuencia directa el aumento de la distorsión armónica en los sistemas de corriente alterna. Esta distorsión es uno de los problemas que conforman el conjunto de alteraciones o perturbaciones del suministro de energía eléctrica que pueden producir fallos de funcionamiento o deterioro de los equipos que dependan de ella.

Entre otros, uno de los efectos de la proliferación de cargas no lineales que consumen una intensidad no sinusoidal puede ser el funcionamiento incorrecto de los sistemas de protección, las sobrecargas, o el aumento de la temperatura en conductores y en generadores. Estas corrientes distorsionadas pueden propagarse por todo el sistema de energía eléctrica en la forma de armónicos de tensión e intensidad.

La normativa UNE-EN 61440 indica que el índice a utilizar para medir esa distorsión es la distorsión armónica total (THD, Total Harmonic Distortion), tanto de tensión como de intensidad. Además, la normativa señala valores límite para estos índices y para el

valor de los armónicos más comunes en cualquier punto de la red. Sin embargo, no indica nada sobre los métodos a emplear para disminuir esos niveles ni sobre la determinación de la responsabilidad sobre esa distorsión de cada agente del sistema.

Efectivamente, la mera medida de los niveles de distorsión en una red puede poner de manifiesto la necesidad de tomar medidas para su control. Dentro de esas medidas están el uso de filtros de potencia (activos, pasivos o híbridos) en sus distintas configuraciones. Sin embargo, la determinación de los puntos en que es más conveniente la disposición de estos dispositivos es un tema que requiere un análisis más profundo de la microrred (μred: un subconjunto de nudos de la red con distintas cargas conectadas a cada uno). En efecto, es necesario un estudio de las distintas cargas y de la determinación de la responsabilidad de cada una en los niveles de distorsión/desequilibrio globales. Asimismo, la configuración del dispositivo de mitigación más apropiado requiere de la caracterización de esas cargas con una responsabilidad mayor en la existencia de las no conformidades. Esta información la suministra el dispositivo de la invención que, además de distribuir la responsabilidad sobre los niveles globales de distorsión/desequilibrio entre cada agente, informa de si las cargas responsables son del tipo fuente de armónicos de tensión o fuente de armónicos de intensidad. Esta información es la más relevante a la hora de determinar la configuración del filtro de potencia más adecuado para mitigar la distorsión que produce cada una.

La monitorización de redes eléctricas es algo que, hoy en día, se hace a nivel de usuario o de empresa distribuidora y en el mercado se puede encontrar una gran variedad de productos con este fin. También existen numerosos dispositivos para monitorizar la calidad de la potencia eléctrica en un nudo determinado de una red eléctrica.

Estos últimos dispositivos toman los datos necesarios, los analizan y nos presentan una “foto” del estado de la tensión y la intensidad en el punto concreto donde ha sido conectado. También pueden almacenar los datos obtenidos de la red, que se pueden descargar a posteriori o el mismo equipo puede enviarlos a través de una red de datos.

Ejemplos de dispositivos como los mencionados se pueden encontrar en [1]-[3]. En concreto, en [1], se ofrecen de forma comercial analizadores de calidad de la potencia eléctrica. Suelen mostrar además de la forma de onda (que también la muestran otros, como los osciloscopios), éstos presentan el espectro de cada una de esas ondas e índices específicos de calidad como el THD e identifican no conformidades como los huecos de tensión, el flicker (cambio visible y repetitivo en la intensidad causado en su

mayoría por las fluctuaciones de voltaje en las redes eléctricas), el desequilibrio, etc.

Sin embargo, estos dispositivos tienen dos limitaciones clave en las que son superados por la presente invención:

- Se trata de dispositivos individuales que monitorizan de forma independiente el nudo de la red en la que se conectan.
- El análisis de calidad de la potencia eléctrica se limita a mostrar el nivel de distorsión/desequilibrio en el punto de conexión, sin considerar el origen de esa distorsión/desequilibrio ni la parte de responsabilidad que tengan en la misma las cargas conectadas en el punto de conexión del dispositivo medidor.

Existe un dispositivo monofásico que, además, de hacer el típico análisis de la potencia eléctrica de la red en el punto en el que se conecta, estudia la responsabilidad de cada agente en la distorsión detectada, [4], y lo hace a través de los algoritmos presentados en [5], que calculan el LCI (load characterization index) o índice de caracterización de carga)

Sin embargo, el hecho de contar, no con un dispositivo monofásico individual como en el citado antecedente, sino con un conjunto de equipos trifásicos, conectados al mismo tiempo en distintos nudos de la red y que tomen medidas de las magnitudes eléctricas de forma simultánea, abre un abanico de posibilidades que se describen a continuación.

Los dispositivos trifásicos permiten evaluar el desequilibrio además de la distorsión en el sistema y la medida simultánea en distintos nudos de la red hace posible la determinación de aquellas cargas responsables de la distorsión y/o del desequilibrio a partir de índices que pueden ser usados para distribuir los costes ocasionados por esas no conformidades entre los distintos agentes del sistema, de forma proporcional a la responsabilidad de cada uno.

La distorsión y el desequilibrio presentes en cada nudo de la red no suele ser responsabilidad solamente de las cargas conectadas al mismo, sino que la distorsión/desequilibrio inyectadas en el sistema por cada carga “viajan” por el mismo y pueden provocar que existan esas no conformidades en nudos en los que solo hay cargas lineales y equilibradas. Por tanto, es importante discriminar responsabilidades y localizar las cargas que realmente introducen distorsión/desequilibrio en el sistema. De esta forma se pueden optimizar la localización y el dimensionado de los sistemas de eliminación de esos defectos de onda y también se pueden distribuir los costes causados por ellos en el sistema entre las distintas cargas conectadas al mismo de

forma proporcional a la responsabilidad de cada una.

Existen en la literatura técnica numerosos métodos que pretenden identificar esas fuentes de distorsión/desequilibrio en la red eléctrica, [6]-[12]. Algunos de los principios teóricos en los que están basados estos métodos son los siguientes:

- Algunos de ellos están basados en las potencias activas armónicas, [5]-[7].
- Otros representan la carga aguas abajo del punto de medida mediante su circuito equivalente Thevenin o Norton y de la misma forma el circuito aguas arriba, [8]-[9].
- Otros modelan la carga mediante un circuito eléctrico con dos partes diferenciadas: una lineal (formada por elementos lineales, básicamente resistencias y bobinas) y otra no lineal que es la verdadera fuente de armónicos, [10].
- También hay métodos que se basan en los referenciados y aplican en base a ellos fórmulas de reparto de la responsabilidad de la distorsión global del sistema, [11]-[12].

Sin embargo, ninguno de estos algoritmos consigue realmente identificar las fuentes de distorsión/desequilibrio en una red eléctrica. El que más se acerca a la determinación de las cargas distorsionantes es el presentado en [5] e implementado en [4]. Y, como se indica en [13], tampoco este algoritmo funciona con todas las cargas o sistemas de inyección de potencia eléctrica que actualmente suelen encontrarse conectados a los distintos nudos del sistema de potencia o de una microrred determinada. Además, [4] es un dispositivo monofásico individual, que no evalúa el desequilibrio.

Con respecto al desequilibrio, el índice que mejor identifica las fuentes que lo inyectan a una microrred eléctrica es el UCR (unbalance current ratio), definido en [14]

Las citadas referencias [1] – [14] se muestran a continuación:

[1] “*Fluke test and measurement tools*” [Online]. Available: https://www.fluke.com/. [Accessed: 08-Dec-2022].

[2] “*Rigol*” [Online]. Available: https://rigolshop.eu/. [Accessed: 08-Dec-2022].

[3] “*PeakTech*” [Online]. Available: https://www.peaktech.de/es/. [Accessed: 08-Dec-

2022].

[4] Inventores: Marco A. Márquez Sánchez, Andrés Mejías Borrero, M. Reyes Sánchez Herrera. Título: *Dispositivo y método de medida de magnitudes eléctricas*. N.º de solicitud: P201530359 - PCT/ES2016/070167. Fecha de concesión: 30-05-2017. Entidad titular: Universidad de Huelva.

[5] R. Herrera. P. Salmerón, *Harmonic Disturbance Identification in Electrical Systems with Capacitor Banks*. Electric Power System Research 82.1 (2012) 18-26.

[6] [1] C. Muscas, *Assessment of electrical power quality: indices for identifying disturbing loads*, ETEP 8.4 (1998).

[7] Polina Shcherbakova, P, Senderovych, G, Abramovitz, A. *An approach to assessing and accounting for consumers' share of harmonic generation*. Electric Power Systems Research 212 (2022) 108639.

[8] W. Xu, X. Liu y Y. Liu. *An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination*. IEEE Transactions on Power Delivery, 18.1 (2003) 214-219.

[9] Ch. Chen, X. Liu, D. Koval, W. Xu y T. Tayjasanant. *Critical Impedance Method- A New Detecting Harmonic Sources Method in Distribution Systems*. IEEE Transactions on Power Delivery 19.1 (2004) 288-297.

[10] Dell´Aquila, M. Marinelli, V. G. Monopoli y P. Zanchetta. *New Power-Quality Assessment Criteria for Supply Under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions*. IEEE Transactions on Power Delivery 19.3 (2004) 1284-1290.

[11] C. Muscas, L. Peretto, S. Sulis, R. Tinarelli, *Investigation on Multipoint Measurement Techniques for PQ Monitoring*, IEEE Trans. Instrum. Meas. 51, (2006) 1684-1690.

[12] E.J. Davis, A.E. Emanuel, D.J. Pileggi, *Evaluation of single-point measurements method for harmonic pollution cost allocation*, Power Delivery, IEEE Transactions on, 15.1 (2000) 14–18.

[13] D. Martín, R. S. Herrera, J. R. Vázquez, P. Crolla, G. M. Burt, *Unbalance and Harmonic Distortion Assessment in an Experimental Distribution Network*, Electric Power Systems Research 127 (2015) 271-279. doi: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.06.005

[14] Herrera, R.S. and Vázquez, J.R. *Identification of Unbalanced Loads in Electric Power Systems*, International Transaction on Electrical Energy Systems 24.9 (2014) 1232-1243, doi: https://doi.org/10.1002/etep.1772

Habida cuenta de las soluciones conocidas en el estado de la técnica y de los problemas arriba indicados que no están resueltos o son resueltos de una manera no satisfactoria, la presente invención presenta un sistema con el que se consigue superar los citados problemas y que permite medir la tensión y la intensidad instantáneas en cada nudo de una microrred, con las condiciones necesarias para analizar la calidad de esas ondas de tensión e intensidad e identificar las fuentes de distorsión/desequilibrio en la microrred eléctrica usando el algoritmo descrito más adelante en este documento. La medida y el análisis simultáneo de las tensiones e intensidades en todos los nudos de la microrred permite además repartir los costes derivados de la falta de calidad de onda entre las distintas cargas de forma proporcional a su responsabilidad.

EXPLICACIÓN DE LA INVENCIÓN

La presente invención consiste en un sistema de monitorización de la calidad de onda en microrredes eléctricas (monitoring system, MS, a partir de ahora) y que comprende una serie de dispositivos o nodos inteligentes (smart sensor, SS) que miden la tensión y la intensidad instantáneas en cada nudo de una microrred y que le envía estos datos a un servidor central, que los procesa y proporciona la siguiente información:

- Formas de onda de las tensiones y de las intensidades medidas en cada punto monitorizado o nudo (monitorized node, MN). Las tensiones e intensidades serán dos en caso de monofásico y cuatro en caso de trifásico. Esta información la pueden suministrar analizadores de red comerciales.
- Espectros de las señales indicadas en el punto anterior. Esta información también la suministran los analizadores de red comerciales.
- La distorsión armónica total (THD) de cada fase de tensión e intensidad en cada MN. Esta información la suministran los analizadores de red comerciales.
- Potencias (activa, reactiva y aparente) en cada MN y sus correspondientes componentes fundamentales. Esta información la suministran los analizadores de red comerciales.
- Índice que mide la responsabilidad de las cargas conectadas en cada MN sobre la distorsión global de la microrred (improved load characterization index ILCI). Este parámetro no lo suministran los analizadores de red comerciales y, aunque existen varios procedimientos de cálculo a nivel de investigación,

ninguno suministra resultados buenos para cualquier tipo de carga/sistema generador de potencia.

- Índice que mide la responsabilidad de las cargas conectadas en cada MN sobre el nivel de desequilibrio global de la microrred (improved unbalanced current ratio (IUCR). Este parámetro no lo suministran los analizadores de red comerciales y, aunque existen varios procedimientos de cálculo a nivel de investigación, ninguno suministra resultados buenos para cualquier tipo de carga/sistema generador de potencia.
- Porcentaje de reparto de los costes generados por la distorsión y el desequilibrio en la microrred entre los distintos MN. Estos dos parámetros se basan en los dos anteriores y en la existencia de una red completa de dispositivos de medida que toman datos simultáneamente. No existe algo así, que los autores de esta patente sepan.
- Tipo de filtro que habría que conectar en cada MN para disminuir el nivel de distorsión y/o desequilibro en la microrred. De esta forma, el gestor de la microrred podría optar por instalar un filtro de menor potencia en el MN que introduzca mayor distorsión/desequilibrio en lugar de uno de mayor potencia y más difícilmente sintonizable en cabecera de la microrred, con el correspondiente ahorro económico y energético. Esto también es nuevo y se basa en que el cálculo de los parámetros de responsabilidad anteriores proporciona además la información del tipo de fuente de que está constituido cada MN (fuente de armónicos de tensión o fuente de armónicos de intensidad).

En este sentido, la realización preferida del sistema de monitorización de la calidad de onda en microrredes eléctricas comprende:

- Un conjunto de nodos inteligentes SS (tantos como nudos tenga la microrred en la que se pretenda usar).
- Un sistema de comunicaciones que, mediante puerto serie con los SS y por protocolo TCP/IP, como WebSocket con el servidor, hace al MS capaz de solicitar y recibir desde los SS los datos de medidas de tensión e intensidad con los parámetros establecidos desde ese servidor.
- El servidor que está constituido por una serie de programas desarrollados en el entorno de MATLAB y que pueden ser instalados en cualquier ordenador que cuente con esta aplicación.

Los SS toman medidas de las tensiones y las intensidades (3 fases y neutro en trifásico) en un mismo nudo de la microrred (o de una tensión y una intensidad en el caso monofásico) de forma simultánea. Esa toma de datos se realiza obteniendo un número de puntos por ciclo que corresponde a una potencia de dos (128, 256, etc.), condición necesaria para el cálculo del espectro de las distintas formas de onda, que constituye la información necesaria para la aplicación del algoritmo encargado de realizar el análisis de la calidad de onda y de identificar las fuentes de distorsión y/o desequilibrio. El número concreto de puntos por ciclo y el número de ciclos obtenido por los SS será establecido por el usuario mediante la interfaz de toma de datos. Datos correspondientes a un solo ciclo son suficientes para realizar el análisis de armónicos, que es el que realiza la invención. Sin embargo, con un número de ciclos mayor se podría hacer también un estudio de interarmónicos, lo que supondría una mejora de la invención con una simple modificación de software. La limitación que presenta la invención para la toma de datos viene determinada por la capacidad de la memoria y es la correspondiente a cuatro ciclos si se toman ocho señales (caso trifásico) con 256 puntos por ciclo. Por debajo de ese límite, el usuario establece cada parámetro de toma de datos a través del programa de solicitud de datos (P2).

Esos datos, recibidos en el servidor a través de un sistema de comunicaciones por ejemplo basado en protocolo TCP/IP, como WebSocket y diseñado al efecto para el MS, se procesan y ordenan en Matlab u otro software similar, asociados a cada forma de onda y en el formato correcto. En el caso del sistema que se propone, los datos se reciben desde los SS en formato hexadecimal y todos seguidos, separando los correspondientes a cada fase separados, por ejemplo, por un carácter “$”. El programa que ordena los datos divide los correspondientes a cada fase colocándolos en distintas columnas y los convierte a formato decimal.

Una vez ordenados y en formato decimal, son analizados calculando los espectros de cada señal de fase de tensiones e intensidades, mediante la transformada rápida de Fourier en cualquier lenguaje de programación y se calculan los índices que se muestran después a través de la interfaz P5. El resultado de ese análisis son varios parámetros entre los que se encuentran el ILCI y el IUCR que cuantifican respectivamente la distorsión y el desequilibrio que la carga monitorizada introduce en la microrred. Los algoritmos de cálculo de esos parámetros son los mismos que los usados para calcular los parámetros LCI y UCR con la salvedad de que en esta invención se consideran circuitos equivalentes de la carga donde la resistencia es

negativa, lo que hace válidos estos dos índices, no solo para cargas pasivas, sino también para cargas que inyectan potencia en la microrred, como sistemas fotovoltaicos u otras formas de generación distribuida. A modo de ejemplo del funcionamiento del sistema, se explica que el cálculo de los índices LCI y UCR, consiste en lo siguiente:

- Se definen distintos circuitos lineales equivalentes para cada fase de datos tomados en cada nudo de la microrred. Esos circuitos lineales equivalentes están formados por tres ramas en paralelo: una rama resistiva pura (R_1), otra capacitiva pura (C_1)y otra resistivo-inductiva (R_{L1} en serie con L_1), ver figura 1. Los valores límite de cada elemento se calculan a partir de los valores de la componente fundamental de tensión e intensidad de cada fase de cada nodo de la microrred de la siguiente forma:
    - Se establece un factor de potencia mínimo ($\cos\varphi_{max}$) y a partir de ese valor se calcula el valor máximo del condensador como la longitud de la componente reactiva de la intensidad de la figura 2 (I_{C1max}). El valor máximo de R se calcula a partir de la componente activa de la intensidad de la figura 2. El subíndice 1 en las figuras hace referencia a la componente fundamental de V e I y a los valores de los elementos de los circuitos correspondientes a esas componentes fundamentales. El subíndice n1 hace referencia a las componentes armónicas.
    - Se ensayan circuitos con distintos valores de R_1 y C_1 entre 0 y los respectivos valores máximos.
    - Para cada uno de ellos, se calculan los valores de los elementos de la rama inductiva a partir del valor de la componente fundamental de la intensidad real (I_1), restándole las consumidas por las ramas resistiva (V_1/R_1) y capacitiva ($-jV_1\omega C_1$). De esa forma, la intensidad de la rama inductiva del circuito ensayado se calcula como $I_{1ind}= I_1- V_1/R_1-(-jV_1\omega C_1)$. Los valores de los elementos se calculan como el cociente entre la componente fundamental de la tensión y el de la intensidad calculada: $RL_1+j\omega L_1=V_1/I_{1ind}$.
    - Para cada conjunto de valores de los elementos del circuito equivalente, se calculan los distintos armónicos de intensidad que consumirían y se comparan con los reales que se han medido. Si la diferencia entre ambas intensidades es nula, el circuito conectado al nudo es lineal. En caso contrario, es no lineal y existe una componente no lineal de la

intensidad consumida por el circuito conectado al nudo, que se representa en la figura 1 como I_{n1}. En este caso, se le asigna un valor del índice LC (intermedio para calcular el LCI) proporcional al valor eficaz de I_{n1}.

- Eso mismo se sigue con esos mismos circuitos lineales, pero descomponiendo la tensión en lugar de la intensidad. Ahora lo que se calcula es la tensión no lineal, V_{n1} en la figura 3, que representa este segundo grupo de circuitos lineales. Ahora, en el caso de que V_{n1} sea no nula, se le asigna un valor proporcional a su valor eficaz al índice NLC (intermedio para calcular el LCI).
- En el caso de que LC o NLC sean nulos para algún circuito de los ensayados, LCI es nulo. En caso contrario, LCI toma el valor correspondiente a LC.
- Una vez establecido el circuito lineal equivalente a la carga, se establece una carga equilibrada base a partir de la fase con el valor eficaz mínimo de la intensidad consumida, y se calcula la intensidad consumida por esa carga base como la relación entre la tensión y esa carga. La diferencia entre la intensidad lineal correspondiente a la consumida por el circuito lineal y esa equilibrada consumida por la carga base, será la componente desequilibrada de la intensidad. El valor de UCR será proporcional al valor eficaz de esa intensidad desequilibrada.

Los índices ILCI e IUCR se calculan igual, pero se ensayan circuitos con resistencias negativas además de las positivas. En los circuitos lineales ensayados en las referencias [4] y [15] están compuestos por resistencias de valor positivo y por tanto solo valen para evaluar las cargas pasivas conectadas a cada MN. Para que esto sea válido en el caso de que lo que haya conectado al MN sea un generador de potencia eléctrica, en la invención los parámetros ILCI e IUCR ensayan, además de los circuitos anteriores, otros en los que el elemento resistivo sea negativo. Esto es un paso relevante relacionado a los parámetros LCI y UCR con respecto a lo conocido en el estado de la técnica.

Todos los SS son iguales y su diseño está basado en el uso de microcontroladores del tipo DSPIC. Se presenta una foto de uno de ellos en la figura 4. Son configurables el número de fases que monitoriza, el número de puntos por ciclo que obtiene y el número de ciclos, según se ha explicado arriba. La toma de datos se ordena (una vez

establecidos los parámetros correspondientes) mediante la interfaz de toma de datos que se puede ver gráficamente en la figura 8. Una vez obtenidos los datos por los SS y enviados al servidor mediante el sistema de comunicaciones, esos datos son convertidos a formato decimal y ordenados en los correspondientes a las distintas formas de onda involucradas. El SS toma los datos de tensión e intensidad de acuerdo con los parámetros indicados por el servidor, los almacena momentáneamente en una memoria externa y luego envía todos esos datos por el puerto serie a una Raspberry Pi que, por protocolo TCP/IP como WebSocket, envía los datos al servidor. El servidor recoge los datos por WebSocket mediante MATLAB, en cuyo entorno se ordenan, se analizan y se presentan los resultados.

Por tanto, el sistema cuenta con los siguientes módulos en el servidor:

P1. Un primer programa que mantiene abierta una comunicación con todos los SS. En cada SS se instala un cliente WebSocket. El maestro se instala en el servidor y es el que lanza la orden de toma de datos simultánea a todos los SS en el momento establecido por el usuario.

P2. Un segundo que ordena la lectura de datos a los SS y los recibe (éste es una interfaz).

P3. Un tercero que interpreta los datos recibidos y los ordena. O sea, que los convierte a decimal (vienen en hexadecimal) y los separa en los correspondientes a cada forma de onda, como se ha descrito arriba.

P4. Un cuarto que procesa esos datos y calcula los resultados. Este algoritmo es el que calcula los distintos parámetros que se muestran luego en la interfaz que muestra los resultados y que se presenta en el punto siguiente. Este algoritmo calcula:

- Los valores de THD de tensión e intensidad a partir de las ecuaciones VTHD=$\frac{\sum_2^n V_i}{V_1}$ e ITHD=$\frac{\sum_2^n I_i}{I_1}$.
- Las distintas componentes de potencia mediante las ecuaciones P=VIcosφ y Q=VIsinφ, aplicada a las componentes fundamentales o armónicas de tensión e intensidad según corresponda:
- Los valores de ILCI y IUCR según lo explicado anteriormente.
- Los porcentajes en que cada nudo de la microrred es responsable de la distorsión y/o el desequilibrio presente en la misma. El cálculo de estos porcentajes se hace de forma proporcional a los valores de los parámetros ILCI e IUCR, respectivamente, que se han obtenido en cada nudo de la microrred.

Este cálculo tan sencillo es posible por el hecho de que los datos tomados de cada MN tienen las mismas características y las medidas se realizan simultáneamente, lo que hace los resultados comparables.

- El tipo de filtro necesario en cada nudo para compensar la distorsión y el desequilibrio que inyecta en la microrredsegún el circuito equivalente del nudo sea del tipo de la figura 1 o del tipo de la figura 3. Se considera que la carga/sistema de potencia conectado a cada MN es una fuente de armónicos de tensión si el circuito lineal equivalente que mejor se adapta al mismo es del tipo representado en la figura 3 y fuente de armónico de intensidad si el circuito lineal equivalente que mejor se adapta al mismo es del tipo representado en la figura 1. Esto también es una novedad con respecto a los procedimientos de cálculo presentados en [5] y [14].

P5. Un quinto (una interfaz) que presenta los resultados. Los resultados presentados en esta interfaz son los valores de THD de tensión e intensidad, los distintos componentes de potencia, los de ILCI y IUCR, los porcentajes en los que cada nudo participa en la distorsión y el desequilibrio totales que hay en la microrred y el tipo de filtro necesario en cada caso para compensarlos. Además presenta también las formas de onda de las tensiones e intensidades en los distintos MN y en la cabecera y sus correspondientes espectros.

El análisis de los datos (P4) se ha explicado arriba.

Además, el hecho de ser calculados contando con datos de tensión e intensidad tomados de forma simultánea en todos los MN de la microrred, permite calcular la responsabilidad de cada nudo en la distorsión y/o el desequilibrio existente. En efecto, ese cálculo de la responsabilidad de cada nudo solo se puede determinar si se calculan esos índices a partir de datos tomados simultáneamente.

A partir de los resultados proporcionados por el programa de análisis de los datos (P4), una interfaz presenta los resultados indicados arriba (P5). Esa interfaz presenta un esquema con todos los nudos de la microrred (figura 4). Pinchando en cada uno se pueden ver las formas de onda (figura5) y/o los espectros de las magnitudes eléctricas, según la elección del usuario. En el esquema de la microrred se pueden leer directamente los siguientes grupos de datos correspondientes a cada MN:

- Valores de THD de la tensión y la intensidad.
- Las potencias activa y reactiva y las correspondientes componentes

fundamentales.

- El índice de responsabilidad sobre la distorsión (ILCI) y sobre el desequilibrio (IUCR) de la microrred de cada nudo.
- El porcentaje de coste derivado del nivel de distorsión y/o desequilibrio asignado a cada nudo.
- El tipo de sistema de compensación recomendado en cada nudo.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

En la figura 1 se presenta el tipo de circuito ensayado para identificar las cargas lineales y las fuentes de armónicos de intensidad.

En la figura 2 se presenta el diagrama fasorial de una fase cualquiera de un MN cualquiera correspondiente al circuito representado en la figura 1.

En la figura 3 se presenta el tipo de circuito ensayado para identificar las cargas lineales y las fuentes de armónicos de tensión.

En la figura 4 se presenta una foto del SS en la que se indican los siguientes componentes:

- Comparador analógico (1)
- Amplificador operacional (2).
- Sensor de intensidad (3).
- Amplificador de precisión (4).
- LED (5).
- Conversor analógico-digital (6)
- Reloj en tiempo real (7) (LFXTAL014692).
- Pulsador (8).
- CPU (9) (dsPIC30F5011).
- Decodificador/demultiplexor (10)

En la figura 5 se presenta un esquema de la microrred con los distintos nodos (MN) y cargas/generadores conectados a cada uno de ellos. También se presenta en esta figura el punto de conexión de cada SS y Raspberry Pi (una por SS y MN). En ella se indican los siguientes componentes:

Red eléctrica (11).

Nodo inteligente y sistema de comunicaciones (12).

Carga no lineal inductiva desequilibrada (13).

Carga no lineal capacitiva (14).

Carga lineal inductiva (15).

Carga lineal capacitiva (16).

Motor comercial (17).

Resistencias desequilibradas (18).

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCIÓN

A continuación, se detalla la forma de realización preferida. Para que el MS funcione como se ha descrito arriba, lo primero es conectar los nodos-SS en los distintos nudos-MN de la microrred y abrir las comunicaciones de todos ellos con el servidor a través de WebSocket (programa P1) usando como clientes sendas Raspberry Pi, que estarán a su vez conectadas con los SS a través del puerto serie.

Una vez estén los dispositivos conectados y las conexiones abiertas, desde el servidor se parametrizará la toma de datos (trifásica/monofásica, número de ciclos y número de puntos por ciclo) y se solicitará la toma de datos simultánea a todos los SS (a través del programa P2 cuya interfaz se muestra en la figura 8). Una vez recibidos todos, se interpretarán y se ordenarán mediante el programa P3. A continuación, los datos son analizados y se calculan los resultados mediante el programa P4.

Estos resultados constituyen una radiografía de la calidad de onda de tensión e intensidad en la microrred e identifican aquellos MN responsables de la distorsión y/o el desequilibrio presente en la misma. Igualmente, este proceso se puede automatizar en Matlab para que se realice cada cierto tiempo y almacenar los datos promedio horario (por ejemplo), que podrán ser rescatados e utilizados en cualquier momento posterior. Esto abre las siguientes posibilidades al gestor de la microrred:

- Imputar los costes derivados del nivel de distorsión y/o desequilibrio existente en la microrred entre los distintos nudos que la componen, de forma proporcional a su responsabilidad en la misma. Para ello se podría usar el parámetro de porcentaje de coste de cada nudo, que se presenta en la interfaz de resultados del MS.
- Optimizar el diseño de sistemas de compensación de distorsión y/o desequilibrio a instalar en la microrred, de forma que se compensen en su

origen (los nudos que la generan), donde será necesaria una capacidad de filtro más pequeña que si se compensa todo junto en cabecera. Esto supone una disminución de los costes correspondientes a la inversión en equipos de compensación y un aumento de su eficiencia. Esta información es una consecuencia directa del algoritmo de cálculo de los índices ILCI e IUCR porque estos están basados en calcular el modelo de circuito que mejor se adapta a las tensiones e intensidades monitorizadas. Si la parte lineal de ese circuito equivalente contiene una carga capacitiva, la carga será una fuente de tensión armónica y el filtro activo más adecuado para compensar la distorsión introducida por ese MN en la microrred es el de configuración serie. En otro caso, se aconsejará usar un filtro activo paralelo.

La microrred objeto de estudio con el MS puede ser un edificio, una microrred industrial o cualquier conjunto de nudos en una instalación eléctrica.

El sistema funciona de la siguiente forma:

Dada la microrred presentada, por ejemplo, en la figura 5 con un par SS/Raspberry Pi conectado a la entrada de cada carga/generador, desde el servidor y se ordena la toma de datos simultánea de todos esos SS con las características indicadas arriba, y que permitan el análisis del suministro eléctrico. Esto es, un número de puntos por ciclo que sea potencia de 2, 256 puntos, por ejemplo. La toma de datos y la transmisión de los mismos al servidor hacen que en este se cuente con los valores de tensión en intensidad de cada fase y cada MN, tomados al mismo tiempo.

El sistema calcula los valores de los parámetros ILCI e IUCR correspondientes a cada MN. A partir de esos valores, se calcula el porcentaje de responsabilidad en la distorsión y/o el desequilibrio existente en la microrred, de forma proporcional a los valores de los parámetros ILCI e IUCR correspondientes a cada MN. Además, el algoritmo de cálculo establece si los MN con valores positivos del parámetro ILCI son fuentes de armónicos de tensión o fuentes de armónicos de intensidad, según se describe más arriba.

Se ha construido una microrred con las cargas presentadas y nodos representados en la figura 5. En esa microrred se han conectado los SS como se indica en la figura 5 y se ha procedido de la siguiente forma:

- Se han abierto las comunicaciones entre el servidor y cada uno de los SS

conectados en los distintos MN de la microrred y se han establecido los parámetros de toma de datos: 8 formas de onda con 256 puntos por ciclo en cada una.

- Se ha ordenado la toma de datos simultánea a través de la interfaz de toma de datos.
- Se ha ordenado el procesamiento de todos esos datos para calcular los resultados mediante la interfaz. De esta forma se calculan los índices THD de tensión e intensidad, los distintos términos de potencia, el ILCI y el IUCR. A partir de los datos ILCI e IUCR el programa calcula el porcentaje de responsabilidad de cada MN en la distorsión y/o desequilibrio existente en la microrred y el tipo de sistema de compensación más adecuado en los MN con mayor responsabilidad.

Se puede apreciar que el sistema distribuye la responsabilidad de la distorsión existente en la microrred entre las cargas 3 y 4 (números 13 y 14 de la figura 5), aunque le asigna también una pequeña parte a los sistemas de generación de energía debido principalmente a los armónicos de alto orden producidos por los mismos. Con respecto a la responsabilidad del desequilibrio, la distribuye entre las cargas 3 y 8 de la microrred (números 13 y 18 de la figura 5). Además, propone la conexión de un filtro activo serie en el nudo 4 (14 en la figura 5) y de un filtro paralelo en el nudo 3 (13 en la figura 5).

Lo descrito arriba puede también ser ordenado automáticamente cada cierto tiempo (por ejemplo, cada 10 minutos) y guardar los datos promedio de cada hora durante todo el tiempo que dure una campaña de medidas. Esos datos históricos quedarían almacenados en el servidor y se podrían consultar y utilizar con posterioridad al final del estudio.

REIVINDICACIONES

1- Sistema de monitorización de la calidad de onda en microrredes eléctricas, para obtener los parámetros ILCI (improved load characterization index - índice de caracterización de carga mejorado) y IUCR desequilibrio global de la microrred (improved unbalanced current ratio – ratio de desequilibrio global mejorado) de una microrred eléctrica; caracterizado por que comprende:

- un conjunto de nodos inteligentes, tantos nodos como nudos tenga la microrred para medir la intensidad y la tensión en los nudos; donde cada nodo inteligente comprende: un comparador analógico (1); un amplificador operacional (2); un sensor de intensidad (3); un amplificador de precisión (4); un LED (5); un conversor analógico-digital (6); un reloj en tiempo real (7); un pulsador (8); un CPU (9); y un decodificador/demultiplexor (10)
- un sistema de comunicaciones que comprende un puerto serie para comunicarse con los nodos y un puerto TCP/IP para enviar las medidas realizadas a un servidor; y
- un servidor.

Figura 1

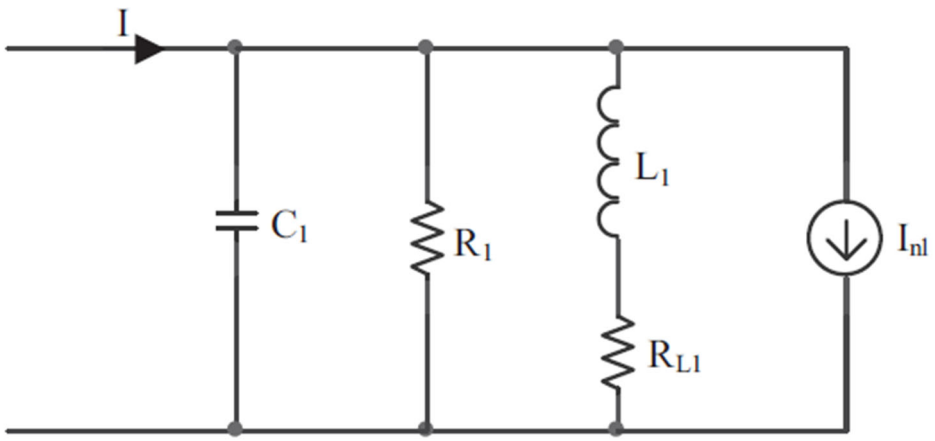


Figura 2

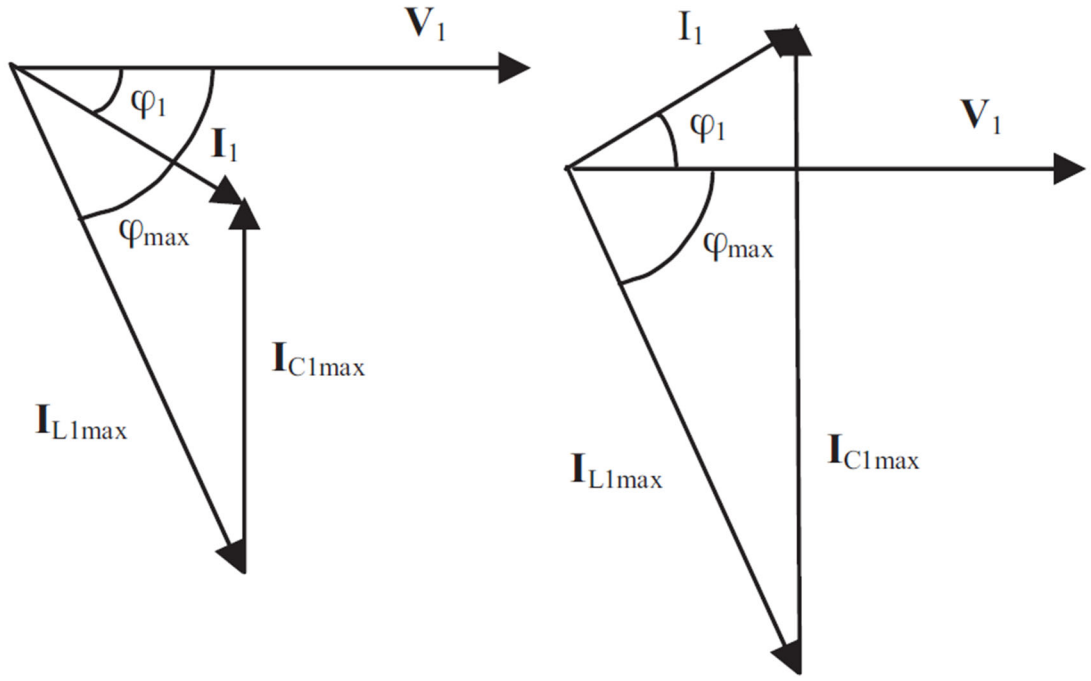


Figura 3

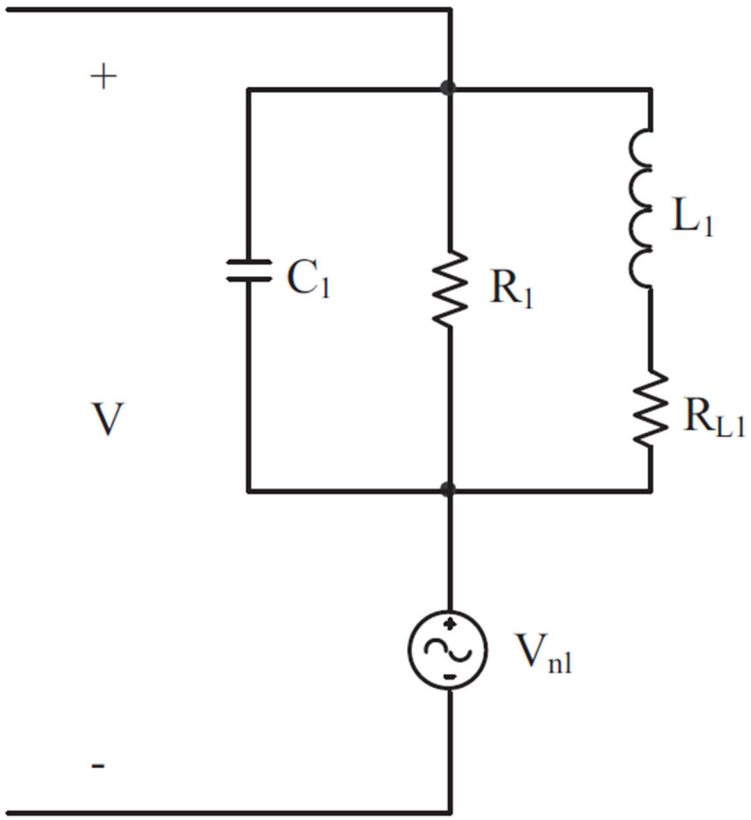


Figura 4

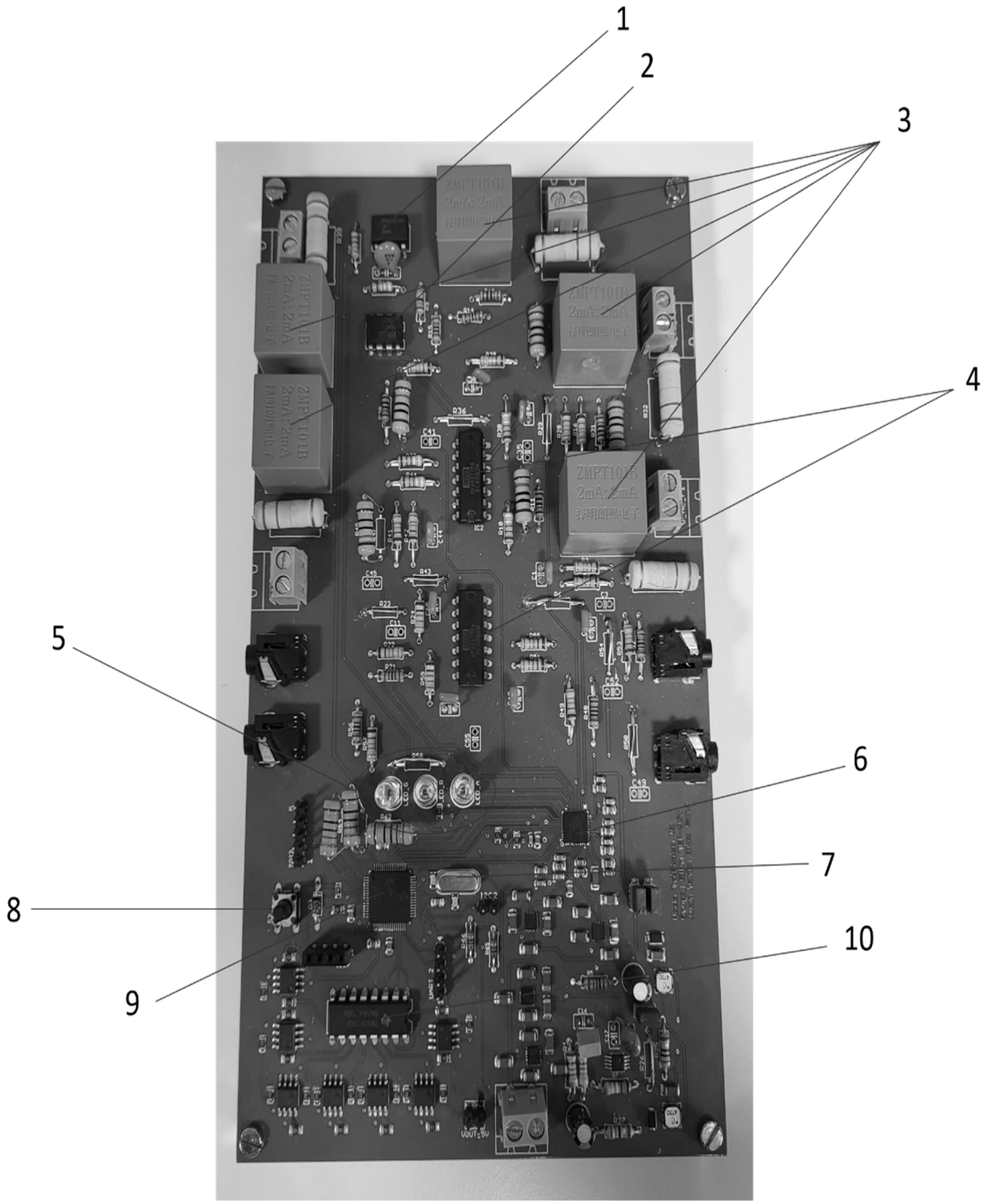


Figura 5.

