

Estrategia para la corrección global de la calidad en redes de distribución



Eva González-Romera
Enrique Romero-Cadaval
María Isabel Milanés-Montero
Sergio Ruiz-Arranz

Doctora Ingeniera Industrial
Doctor Ingeniero Industrial
Doctora Ingeniera Industrial
Ingeniero Industrial

Universidad de Extremadura. Escuela de Ingenierías Industriales.
Avda. de Elvas, s/n – 06006 Badajoz. Tfno: +34 924 289300. evagzlez@unex.es

Recibido: 05/09/2011 • Aceptado: 10/04/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4373>

STRATEGY FOR THE OVERALL CORRECTION OF POWER QUALITY IN DISTRIBUTION NETWORKS

ABSTRACT

- Proliferation of pollutant loads and distributed generation in distribution networks leads to pursue strategies of overall instead of local correction of power quality. The use of an active power filter for correction of harmonic distortion in distribution networks with pollutant loads is studied in this paper. The action of the active power filter is assessed as a power quality corrective device, in situations in which the number of filters is lower than the number of pollutant loads. The objective is to look for overall correction strategies in networks instead of local correction strategies with the consequent equipment cost saving. With that aim, a performance strategy for the active power filter inspired in perfect harmonic cancellation is proposed. The analysis is performed by a harmonic power flow algorithm. The effectiveness of an active power filter for the power quality of the voltage in nodes of a radial and a meshed network and the influence of its location is analyzed, when more than one pollutant load exist. The operation strategy of the active power filter has proved to be effective in the reduction of voltage harmonic distortion in nodes, as an overall correction system. Its usefulness for distribution companies or individuals who own distribution lines is shown, with an important investment cost saving.
- **Keywords:** active power filters, power quality, harmonic power flow, pollutant loads, overall harmonic correction.

RESUMEN

La proliferación de cargas contaminantes y generación distribuida en redes de distribución llevan a buscar estrategias de corrección de la calidad de suministro en la red de forma global y no local. En este trabajo se estudia la utilización de un filtro activo para la corrección de la distorsión armónica en redes de distribución donde existen cargas contaminantes. Se valora la actuación del filtro activo en situaciones en que el número de filtros es inferior al de cargas productoras de perturbaciones, con el objetivo de buscar estrategias de corrección de calidad globales de la red en lugar de locales, con el consiguiente ahorro en adquisición de equipos. Para ello, se propone una estrategia de funcionamiento del filtro activo inspirada en la denominada cancelación perfecta de armónicos y se realiza el análisis mediante un algoritmo de flujo de potencia con armónicos. Se estudia la eficacia del filtro activo en la corrección de la calidad de onda de la tensión en los nudos de una red de distribución radial y cerrada en bucle y la influencia de la ubicación del mismo cuando hay más de una carga contaminante. La estrategia de operación del filtro activo muestra ser eficaz en la reducción de la distorsión armónica de la tensión en los nudos como sistema de corrección global. Se manifiesta la utilidad para las compañías distribuidoras o particulares propietarios de líneas de distribución, con un importante ahorro en costes de inversión.

Palabras clave: filtros activos, calidad de suministro, flujo de potencia con armónicos, cargas contaminantes, corrección global de armónicos.

FILTROS ACTIVOS

Los filtros activos de potencia (en inglés APF, *Active Power Filters*) son equipos electrónicos destinados a acondicionar las señales eléctricas en un nudo de la red eléctrica. Su principal función es cancelar los armónicos de corriente y/o de tensión en el nudo donde están conectados. Los armónicos de corriente son ocasionados por la demanda de corriente no senoidal por parte de cargas contaminantes conectadas al nudo, mientras que los armónicos de tensión son consecuencia del paso de estas corrientes distorsionadas por la impedancia propia de la red. Además, pueden contribuir a mejorar el factor de potencia y los desequilibrios presentes en el nudo de la red.

La principal diferencia que presentan con los filtros pasivos (elementos RLC con frecuencias de resonancia sintonizadas con las frecuencias de los armónicos a cancelar) es que los filtros activos son capaces de adaptarse a distintas situaciones de carga y de perturbaciones, ya que toman medidas de la red, generan a partir de ellas consignas de funcionamiento y actúan en consecuencia.

Un filtro activo está formado básicamente por un convertidor (normalmente un inversor de tensión VSI), un elemento de almacenamiento de energía (un condensador), elementos de medida y bloques de control y de modulación, este último genera las señales de disparo de los interruptores del inversor. Puede conectarse en paralelo (si su objetivo es corregir armónicos de corriente) o en serie (para armónicos de tensión) o bien de forma mixta para cumplir ambas funciones, y puede hibridarse con filtros pasivos para reducir el tamaño y coste del equipo electrónico.

1. INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución cuentan en la actualidad con elevados niveles de armónicos y otras perturbaciones ocasionadas, generalmente, por cargas no lineales conectadas en ciertos nodos de las mismas, aunque también pueden ser fuente de perturbaciones las plantas de generación distribuida, en ciertas circunstancias, o elementos de las propias redes de distribución (Romero, 2008). Por otro lado, los receptores eléctricos son cada vez más sensibles a las perturbaciones, con lo que la corrección de la calidad del suministro es un tema prioritario en la operación de sistemas eléctricos y, sobre todo, de redes de distribución. La normativa que regula la calidad de suministro y la compatibilidad electromagnética (AENOR 1997-2011, 2011; IEEE, 1992) limita la presencia de armónicos localmente en instalaciones generadoras y receptoras, pero la integración de múltiples cargas contaminantes e incluso de fuentes de generación distribuida también contaminantes, puede afectar negativamente a la distorsión armónica de la tensión en los nudos de una red, especialmente en las redes operadas radialmente, el caso más habitual en distribución.

La corrección local de armónicos y otros problemas de calidad de suministro puede ser abordada mediante mecanismos conocidos, como los filtros pasivos, activos o híbridos (Milanés, Romero y Barrero, 2007; Ghosh y Ledwich, 2001). Sin embargo, la contribución de dichos dispositivos a la mejora de la calidad de suministro de una red en global está actualmente en estudio (Cheng y Lee, 2006; Leng, Chung y Cartes, 2010) y la realización sencilla y automática de dicha tarea requiere el desarrollo de nuevas herramientas.

Para el estudio de la transmisión de armónicos a través de los nudos de una red eléctrica se utilizan algoritmos de

flujo de potencia con armónicos. Esta es una herramienta sobradamente conocida y ampliamente utilizada para conocer la influencia de la presencia de cargas contaminantes en su entorno (Arrillaga, Medina y Lisboa, 1995; Chuang et al., 2003).

Los filtros activos son elementos altamente eficientes en la corrección local de armónicos. En este trabajo se aborda el caso de la utilización de un filtro activo en redes de distribución radiales y cerradas en anillo para la corrección global de la distorsión armónica (*Total Harmonic Distortion*, THD) en la tensión de los nudos de la red en general. De esta forma, se persigue el objetivo de corrección reduciendo el coste en equipos (un solo filtro activo puede corregir la influencia de varias cargas contaminantes). Para ello, se utiliza un algoritmo de flujo de potencia con armónicos que trabaja en el dominio de la frecuencia. En dicho algoritmo se integra la aportación de las cargas contaminantes y de un filtro activo que puede cambiar su ubicación. Además, la estrategia de funcionamiento de un filtro activo puede integrarse en equipos electrónicos presentes en algunas tecnologías de generación distribuida, por ejemplo, en los inversores de plantas fotovoltaicas. De esta forma, la corrección de calidad podría recaer sobre estas instalaciones sin necesidad de disponer de otros costosos equipos de corrección.

La estructura del artículo es la siguiente: el apartado 2, "Material y métodos" corresponde a la descripción de las redes objeto de estudio y los métodos empleados, así como los modelos de simulación de los diferentes elementos de la red; en el apartado 3, "Resultados" se presentan los resultados de simulación en una red radial y cerrada en anillo; y el apartado 4, "Discusión" corresponde a las conclusiones.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 FLUJO DE POTENCIA CON ARMÓNICOS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Se propone en este artículo un algoritmo de flujo de potencia con armónicos, fácilmente programable (Fig. 1). Aunque el método de cálculo del flujo de potencia con armónicos es sobradamente conocido y ampliamente tratado en la bibliografía, el algoritmo preparado para incluir cargas no lineales y filtros activos, programado en MATLAB®, es una aportación propia de los autores.

Se supone en este algoritmo que la tensión en el nudo o nudos de suministro eléctrico es conocida y la corriente inyectada en este nudo, y proveniente del sistema eléctrico, cuenta con una buena calidad del suministro (ausencia de armónicos). El algoritmo parte de circuitos equivalentes Norton de los elementos conectados a los distintos nudos para facilitar los cálculos (Arrillaga, Medina y Lisboa, 1995). Como criterio de signos, las corrientes se suponen positivas cuando entran al nudo y negativas cuando salen de éste hacia un elemento conectado al mismo.

El algoritmo se aplica de forma repetida para cada armónico, hasta un orden máximo prefijado, modificando la corriente inyectada por los elementos activos y los parámetros de los elementos pasivos que dependen de la frecuencia, como se explica posteriormente.

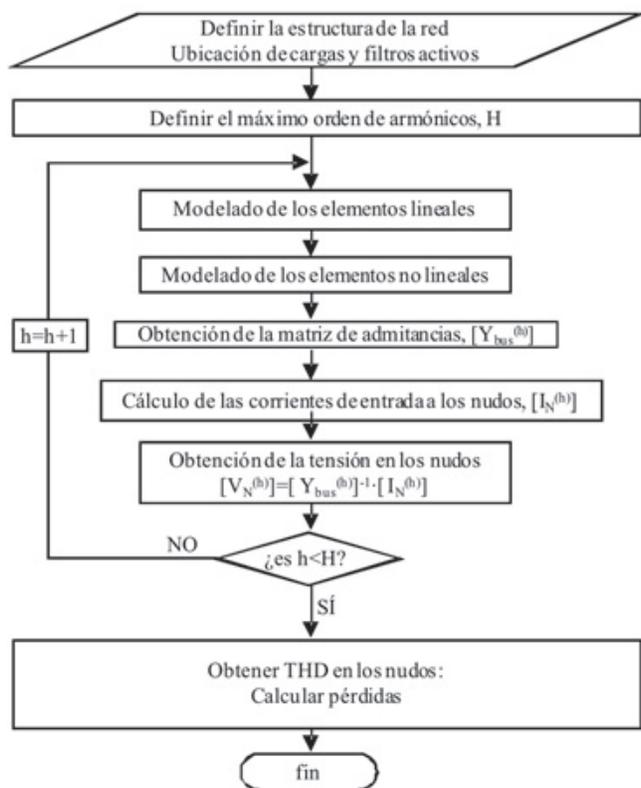


Fig. 1: Algoritmo propuesto para el flujo de potencia con armónicos

Finalmente, tras calcular los armónicos de tensión en cada nudo de la red, se calcula la tasa de distorsión armónica

(THD) de la tensión de los nudos. El valor de THD para un nudo genérico *i* se muestra en la ecuación (1).

$$THD_i(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H (V_{i,h})^2}}{V_{i,1}} \tag{1}$$

En (1):

- $V_{i,h}$ es la componente de tensión correspondiente al armónico *h* en el nudo *i*
- $V_{i,1}$ es la componente fundamental de la tensión en el nudo *i*
- *H* es el máximo orden de armónico considerado.

2.2 MODELOS PARA FUENTES, LÍNEAS Y CARGAS

Como se ha mencionado antes, se emplean los circuitos equivalentes Norton para aplicar el algoritmo de flujo de potencia descrito en la Fig. 1. Es necesario, por tanto, modelar los elementos conectados a la red calculando sus impedancias equivalentes y la corriente que inyectan en el nudo al que están conectados. Una vez calculados dichos parámetros, el algoritmo obtiene la tensión en los distintos nudos.

Para nuestra simulación, consideramos las fuentes de suministro y las cargas como elementos activos, cuyos equivalentes Norton deben ser calculados y considerados en el algoritmo. Esta simulación se realiza sobre una red radial (Fig. 2 a) y la misma red cerrada en anillo (Fig. 2 b), a modo de ejemplo. Se trata de una red trifásica equilibrada y su objetivo es mostrar la utilidad de la propuesta.

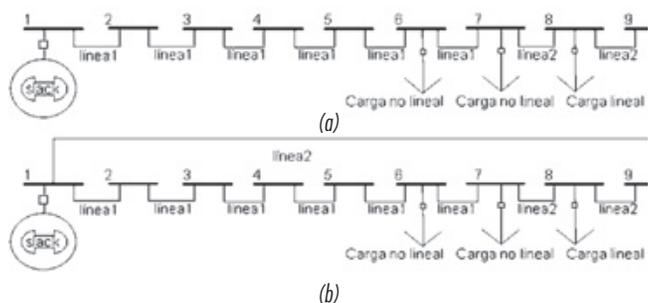


Fig. 2: Red (a) radial y (b) cerrada en anillo, usada para las simulaciones

2.2.1 Modelo para la fuente

En los ejemplos de la Fig. 2 hay solo una fuente de suministro, situada en el nudo 1. Presenta una impedancia unitaria de 0,017j (todas las magnitudes pu de este trabajo están referidas a una potencia base de 6 kVA y una tensión base de 220 V). Para el cálculo de la corriente Norton, se considera una tensión 1 pu en este nudo, por las razones expuestas anteriormente. Al considerarse que esta fuente proporciona corrientes exentas de armónicos, solo actuará como fuente en la etapa del algoritmo correspondiente al primer armónico, o componente fundamental. Para el resto de armónicos, este elemento se considera una impedancia paralelo pasiva.

2.2.2. Modelo para las líneas

Las líneas eléctricas suelen ser modeladas mediante la combinación de una impedancia serie y una admitancia paralelo. Para longitudes de los tramos de línea de pocos kilómetros, como es el caso de las redes de distribución, dichos parámetros pueden considerarse concentrados sin cometer un gran error, por lo que se emplea en este estudio un modelo equivalente en $\pi/3$ para cada tramo de línea, que cuenta con una impedancia (resistencia y reactancia) en serie concentrada y componentes capacitivas en cada extremo de la línea. Estas ramas capacitivas han sido ubicadas en los nudos de la red para la simulación.

Aunque la resistencia de la línea sólo se ve influida por la frecuencia debido al efecto pelicular o *skin*, este efecto puede considerarse despreciable para este estudio. Sin embargo, la reactancia inductiva y la susceptancia son proporcionales a la frecuencia y sus valores deben ser adaptados al orden del armónico considerado. Para cada armónico se multiplica el valor de las reactancias inductiva y la susceptancia para el armónico 1 (50 Hz), por el orden del armónico, para tener en cuenta la relación de proporcionalidad.

En los ejemplos de la Fig. 2 hay dos tipos diferentes de líneas. Los valores de sus parámetros para la frecuencia fundamental de 50 Hz, se muestran en la Tabla 1.

Tipo de línea	línea 1	línea 2
Resistencia (pu)	0,0062	0,0123
Reactancia Inductiva (pu)	0,0093	0,0186
Susceptancia (pu)	0,0913	0,0913

Tabla 1: Parámetros de líneas (pu), referidos a 6000 VA y 220 V base

2.2.3 Modelo para la carga lineal

En las cargas lineales, la corriente demandada puede ser calculada a partir de la tensión en el nudo al que está conectada y su impedancia. En este trabajo se ha empleado una carga lineal en el nudo 8. Esta actúa como un elemento pasivo cuya resistencia paralelo es de 0,4 pu.

2.2.4 Modelo para las cargas no lineales

Se emplea como carga no lineal un rectificador trifásico ideal no controlado de 6 pulsos, con corriente continua constante (una aproximación aceptable para rectificadores conectados a cargas R-L) (Fig. 3). Este tipo de rectificadores son una fuente habitual de perturbaciones en instalaciones receptoras y, por tanto, en redes de distribución. Para modelar dicha carga es necesario tener en cuenta la distorsión de la forma de onda de la corriente que demanda a la red. Esta corriente puede descomponerse en *serie de Fourier* y cada componente armónica puede ser considerada una fuente de corriente demandada de la red. De esta forma, pueden obtenerse las componentes armónicas de la tensión en los nudos mediante un barrido de frecuencias (Fig. 4).

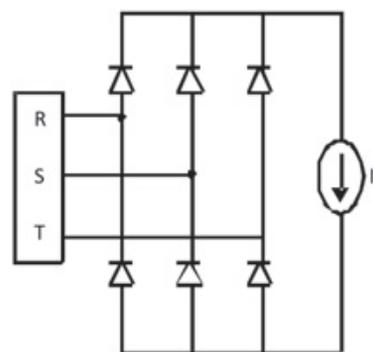


Fig. 3: Rectificador trifásico de 6 pulsos no controlado

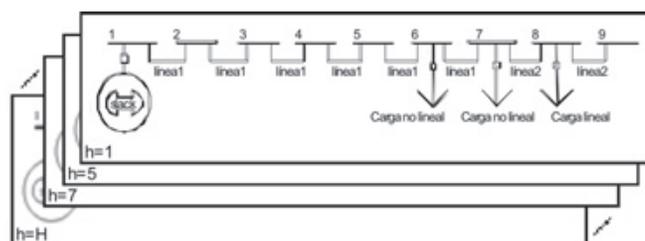


Fig. 4: Simulación de una de las redes para distintos armónicos

Por lo tanto, las cargas no lineales pueden ser modeladas como fuentes de corriente constante pero diferente para cada armónico, cuyo valor se calcula a partir de la componente fundamental de la corriente.

La descomposición en *serie de Fourier* de la corriente demandada por un rectificador ideal como el de la Fig. 3 es bien conocida y consta de una componente fundamental $I_{R,1}$ y una combinación de corrientes armónicas calculadas según la ecuación (2).

$$I_{R,h} = \frac{I_{R,1}}{h} \quad (2)$$

$I_{R,h}$ es la componente armónica de corriente, correspondiente al armónico h , demandada por el rectificador. En este caso los armónicos pares y múltiplos de tres son cero (Mohan y Undeland, 2003).

$I_{R,1}$ es la componente fundamental de la corriente demandada por el rectificador, la cual se obtiene de (3).

$$I_{R,1} = \frac{4}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} I_0 \cdot \text{sen}(\theta) \cdot d\theta \quad (3)$$

donde I_0 es la corriente continua producida por el rectificador, la cual se supone constante.

Integrando la expresión anterior, se obtiene la siguiente:

$$I_{R,1} = \frac{4}{\pi} I_0 [\cos\theta]_{\pi/6}^{\pi/2} = \frac{4}{\pi} I_0 \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_0 \quad (4)$$

Si V_0 es el valor medio de tensión continua producida por el rectificador, R es la resistencia equivalente en corriente continua, obtenida a partir de la potencia nominal del rectificador ($S_{RECTIF.}$), la cual es conocida, y la tensión de línea en el lado de alterna V_{LL} :

$$I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{1.35 \cdot V_{LL}}{R} \quad (5)$$

con

$$R = \frac{(1.35 \cdot V_{LL})^2}{S_{RECTIF.}} \quad (6)$$

Por otro lado, la resistencia equivalente en estrella del rectificador con vistas al modelado de su comportamiento para la componente fundamental puede expresarse como:

$$R_{eq} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3} \cdot I_{R,1}} \quad (7)$$

Y por lo tanto, la resistencia equivalente resulta:

$$R_{eq} = \frac{1.35 \cdot \pi \cdot V_{LL}^2}{6 \cdot S_{RECTIF.}} \quad (8)$$

Para el primer armónico, o componente fundamental, el rectificador se considera una resistencia pasiva, cuyo valor se obtiene en (8). Para los restantes armónicos, el circuito equivalente Norton para el rectificador es una fuente de corriente calculada a partir de (2). En este cálculo, $I_{R,1}$ se obtiene a partir de la resistencia en (8) y la componente fundamental de la tensión obtenida en el nudo al que está conectado (7).

En los ejemplos presentados en este artículo se utilizan dos rectificadores ideales trifásicos de 6 pulsos no controlados. Sus parámetros se muestran en la Tabla 2.

Parámetros:	Rectificador 1	Rectificador 2
Potencia nominal, $S_{RECTIF.}$ (pu)	0,46	0,554
Resistencia equivalente, R_{eq} (pu)	1,5356	1,2759

Tabla 2: Datos de los rectificadores (pu), referidos a 6000 VA y 220 V base

2.2.5 Modelo para el filtro activo

Los filtros activos, o *Active Power Filters* (APFs) en inglés, han sido estudiados como solución a problemas de calidad de suministro en los nudos en los cuales están conectadas las cargas contaminantes. Se han propuesto diversas topologías y estrategias de control. Milanés, Romero y Barrero (2007) discuten y comparan cuatro estrategias de control diferentes para filtros activos, en distintas condiciones de calidad de la corriente demandada por la carga contaminante. En dicho trabajo, la estrategia de control denominada cancelación perfecta de armónicos (se suele denominar por sus siglas en inglés, PHC, de *Perfect Harmonic Cancellation*) demuestra que proporciona el método de corrección más completo en presencia de armónicos, desequilibrios y potencia reactiva. Su filosofía consiste en la definición de una corriente de referencia sincronizada con la componente fundamental de secuencia directa de la tensión en el nudo de conexión, la cual se calcula con el objetivo de cancelar todos los

armónicos demandados por la carga y otras perturbaciones presentes en el nudo.

En este artículo se presenta una red de distribución, radial y cerrada en anillo, con cargas lineales y no lineales. En los casos en los que hay diversas cargas contaminantes, sería necesario instalar un filtro activo en cada uno de los nudos donde existan cargas de este tipo para cancelarlos totalmente. Una solución más económica sería colocar un menor número de filtros activos pero seleccionando su estrategia y ubicación de forma que la contribución de los mismos a la corrección de la calidad del suministro sea óptima. En esta situación, el objetivo del filtro activo no es cancelar totalmente los armónicos en el nudo donde está conectado, sino contribuir a la reducción de la tasa de distorsión armónica de la tensión en todos los nudos de la red.

En este capítulo se propone la aplicación de una estrategia de funcionamiento del filtro activo inspirada en PHC (Milanés, Romero y Barrero, 2007), para reducir la distorsión de la tensión en todos los nudos de las redes de distribución de la Fig. 2.

La acción del filtro activo se introduce en el algoritmo de flujo de potencia descrito en el segundo apartado de este artículo y los resultados son evaluados teniendo en cuenta la tasa de distorsión armónica (THD) de tensión definida en (1).

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo del filtro activo en este trabajo es corregir la calidad de onda de la tensión en todos los nudos, y no sólo en aquel en el que está conectado, por lo tanto, la estrategia del filtro debe ser diferente de la convencional, que consiste en cancelar los armónicos de tensión en el mismo nudo.

En este caso, se busca cancelar o, al menos, reducir tanto como sea posible, todas las componentes armónicas de corriente presentes en el tramo de línea situado justamente aguas arriba del nudo en el que se ubica el filtro activo (Fig. 5). En una línea radial, esta estrategia persigue reducir e, incluso, cancelar totalmente, todos los armónicos de tensión en los nudos situados aguas arriba del filtro activo.

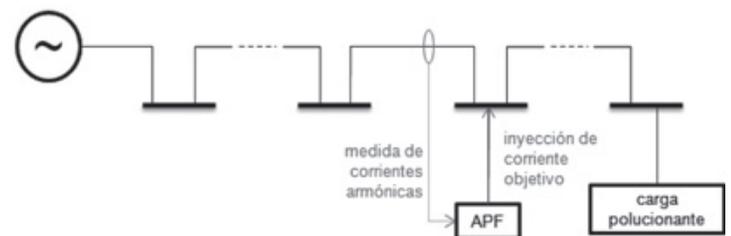


Fig. 5: Estrategia inspirada en cancelación perfecta de armónicos

Con esta estrategia, la THD sería nula en todos los nudos si se situara un filtro activo coincidiendo en los mismos nudos que cada carga contaminante. En otros casos no está garantizada la cancelación total de armónicos, pero el algoritmo presentado en este trabajo permitirá valorar y comparar las mejoras de calidad de suministro en las líneas

en distintas situaciones. Una desventaja evidente de esta estrategia es que un filtro activo situado aguas abajo de la carga contaminante no es útil y no puede contribuir a la cancelación de armónicos.

La integración de la estrategia propuesta para el filtro activo en nuestro caso, en el algoritmo de flujo de potencia, se lleva a cabo en dos pasos:

1) En primer lugar, se realiza el flujo de potencia sin considerar el filtro activo. De esta forma, se calculan las componentes armónicas de la tensión en los distintos nudos.

2) En una segunda etapa, se utiliza la corriente del tramo situado aguas arriba del filtro activo como referencia para cancelar los armónicos. En el caso de redes cerradas en anillo se estudia previamente cuál de los tramos adyacentes al nudo es el tramo aguas arriba, en función del sentido de flujo de cada armónico. Dicha corriente se calcula a partir de las tensiones del nudo anterior y el propio nudo donde se conecta el filtro activo, y se descompone en sus componentes armónicas. Una vez calculadas éstas, se impone al filtro activo la generación de esas mismas componentes armónicas de tal forma que las cancela totalmente. En último lugar, se repite el flujo de potencia con la contribución del filtro activo.

3. RESULTADOS

Tras describir los modelos empleados para los distintos elementos de las redes en estudio (Fig. 2), se muestran en este apartado los resultados de simulación obtenidos al aplicar el algoritmo propuesto en la Fig. 1 mediante MATLAB®.

Sobre los sistemas eléctricos de la Fig. 2 se añade un filtro activo que opera según la estrategia de control descrita en el apartado anterior de este artículo. Se prueban ubicaciones del filtro más cercanas a la alimentación (punto de suministro desde la red general y representado como un nudo de generación) y más cercanas a las cargas.

La Fig. 6 muestra la distorsión armónica de tensión resultante en cada nudo de la red para la red radial de la Fig. 2 (a), con el filtro activo situado en el nudo 3 (izda.) y 6 (dcha.). Se muestra también, en color rojo, la THD original, obtenida sin filtro activo, con el fin de comparar los resultados. La Fig. 7 muestra lo mismo para el caso de la red cerrada en anillo de la Fig. 2 (b). Se puede apreciar que la tasa de distorsión en los nudos situados aguas arriba del filtro activo es siempre nula en el caso de redes radiales o con operación radial (caso más habitual en redes de distribución). En ambas redes se aprecia que la presencia de un filtro activo operando con la estrategia propuesta contribuye a una mejora de la calidad

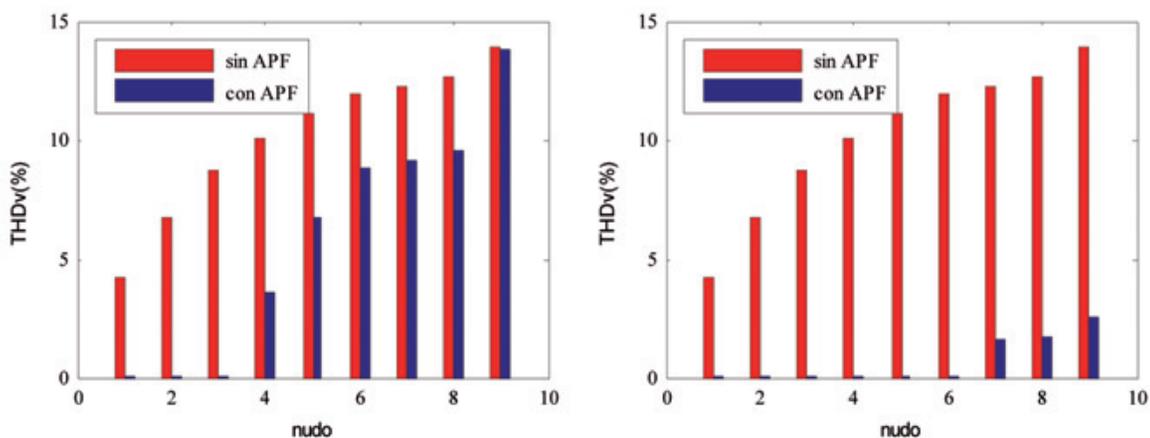


Fig. 6.: THD (%) en las tensiones de los nudos en la red radial de la Fig. 2 (a), con un filtro activo situado en el nudo 3 (izda.) y en el nudo 6 (dcha.)

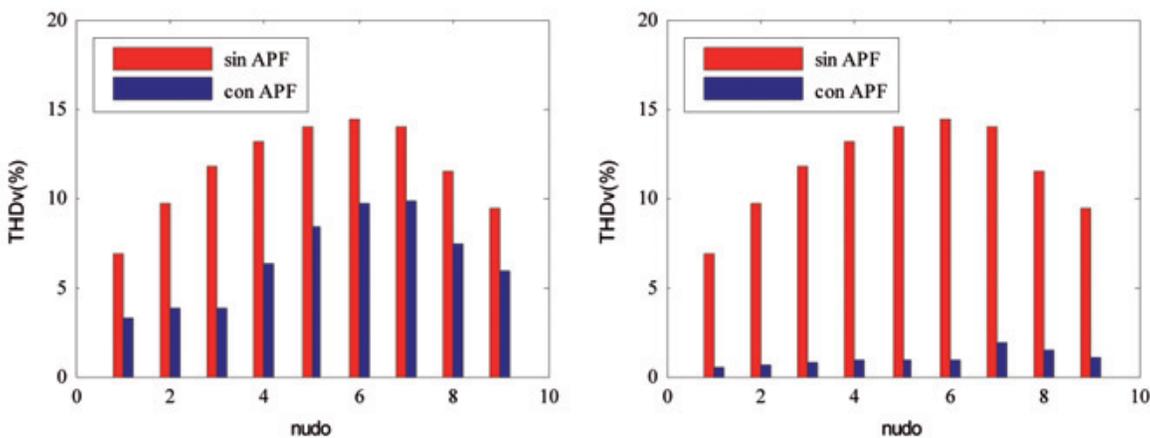


Fig. 7.: THD (%) en las tensiones de los nudos en la red cerrada en anillo de la Fig. 2 (b), con un filtro activo situado en el nudo 3 (izda.) y en el nudo 6 (dcha.)

de onda de la tensión en todos los nudos de la red, aunque el número de cargas contaminantes supera al de filtros activos. En el caso de que el filtro activo se acerca a la ubicación de las cargas, la corrección de calidad es altamente efectiva, sin necesidad de recurrir a correcciones locales en cada nudo.

4. DISCUSIÓN

En este artículo se propone un método de corrección global de calidad de suministro para redes de distribución radiales o cerradas en anillo, mediante filtros activos. Se presenta también un algoritmo para la evaluación de su funcionamiento, con el propósito de reducir la tasa de distorsión armónica de la tensión de los distintos nudos en la red en global. La estrategia propuesta para el filtro activo se inspira en la cancelación perfecta de armónicos (*Perfect Harmonic Cancellation*, PHC), presentada por Milanés, Romero y Barrero (2007). Su contribución se integra en un algoritmo de flujo de potencia en el dominio de la frecuencia para obtener las componentes armónicas de tensión en los distintos nudos.

El algoritmo presentado es sencillo de programar y permite integrar cualesquiera otros elementos lineales y no lineales en las redes, con el fin de estudiar su ubicación y su estrategia de control, en su caso.

Para evaluar el método se ha utilizado una red de distribución radial y cerrada en anillo, con cargas lineales y no lineales y un filtro activo destinado a mejorar la calidad de onda de la tensión de los nudos. El número de filtros activos, en este caso, es inferior al de cargas contaminantes, con el fin de evaluar la actuación del primero como sistema de corrección global de la red. Los resultados obtenidos evidencian que la estrategia propuesta para el filtro activo se muestra efectiva en la reducción de la distorsión armónica de la tensión en los nudos. De esta forma se prueba la eficacia del filtro activo como sistema de corrección de calidad global de la red, con lo que se permite ahorrar en inversión en equipos con respecto a la situación actual, en la que se realiza una corrección local. El algoritmo desarrollado permite también realizar otras evaluaciones sobre las redes, como optimizar la ubicación de los filtros activos, variar el número y posición de estos y de las cargas contaminantes, etc.

Con este trabajo se aborda una línea de investigación de corrección de calidad en redes de distribución de forma global, sin la necesidad de operar de forma local y favoreciendo, por tanto, el ahorro en las estrategias de corrección y la facilidad de gestión de las redes por parte de las compañías distribuidoras o los propietarios de las redes.

A partir de aquí se plantean trabajos futuros relacionados con la estrategia de funcionamiento de los filtros activos en redes malladas con fuerte presencia de elementos contaminantes y la corrección de calidad de las redes mediante los equipos integrados en plantas de generación distribuida.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, a través del proyecto SIDER "Inversor Inteligente para Fuentes de Energía Distribuida: Control de tensión en nodo y de inyección de potencia (TEC2010-19242-C03-01)", dentro del programa de Proyectos de Investigación Fundamental del Plan Nacional I+D+i 2008-2011.

6. BIBLIOGRAFÍA

- (AENOR, 1997-2011) AENOR. *Compatibilidad electromagnética (CEM)*. UNE-EN 61000. Madrid: AENOR, 1997-2011.
- (AENOR, 2011) AENOR. *Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*. UNE-EN 50160. Madrid: AENOR, 2011.
- (Arrillaga, Medina y Lisboa, 1995) Arrillaga J, Medina A, Lisboa MLV et al. "The harmonic domain. A frame of reference for power system harmonic analysis". *IEEE Trans Power Systems*. Febrero 1995. Vol.10-1, p.433-440. <http://dx.doi.org/10.1109/59.373968>
- (Cheng y Lee, 2006) Cheng PT, Lee TL. "Distributed Active Filter Systems (DAFSs): A new approach to power system harmonics". *IEEE Trans Industry Applications*. Sept.-Oct. 2006. Vol.42-5, p.1301 - 1309. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2006.880856>
- (Chuang et al., 2003) Chuang HJ, Chen CS, Lin CH et al. "Stochastic harmonic load flow analysis and distortion mitigation of mass rapid transit systems". *IEEE Bologna Power Tech Conference*, Bolonia, Italia: 23-26 Junio 2003. <http://dx.doi.org/10.1109/PTC.2003.1304427>
- (Ghosh y Ledwich, 2001) Ghosh A, Ledwich G. "A unified power quality conditioner (UPQC) for simultaneous voltage and current compensation". *Electric Power Systems Research*. 2001. Vol.59, p.55-63. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7796\(01\)00141-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7796(01)00141-9)
- (IEEE, 1992) IEEE. *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. IEEE Std. 519-1992. Piscataway, NJ: IEEE, 1992. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.1993.114370>
- (Leng, Chung y Cartes, 2010) Leng S, Chung IY, Cartes DA. "Distributed operation of multiple shunt active power filters considering power quality improvement capacity". *2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*. Agosto 2010. p.543 - 548. <http://dx.doi.org/10.1109/PEDG.2010.5545917>
- (Milanés, Romero y Barrero, 2007) Milanés M, Romero E, Barrero F. "Comparison of control strategies for shunt active power filters in three-phase four-wire systems". *IEEE Trans Power Electronics*. Enero 2007. Vol.2-1, p.229-236. <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2006.886616>
- (Mohan y Undeland, 2003) Mohan N, Undeland TM, Robbins WP. *Power electronics. Converters, applications and design*. USA: John Wiley & Sons, 2003. ISBN: 0-471-58408-8.
- (Romero, 2008) Romero, JM. "Sistema de medida de calidad de onda en Sevillana". *DYNA Ingeniería e industria*. Febrero 2008. Vol 83. p.54-60.