

Acondicionador Unificado de Calidad de la Potencia en Topología Dual iUPQC para Compensación Activa de Sobretensiones Transitorias

Inverted Unified Power Quality Conditioner to Compensate Overvoltage

DOI: <http://dx.doi.org/10.17981/ingecuc.13.2.2017.12>

Artículo de investigación científica. Fecha de recepción: 12 de octubre de 2017. Fecha de aceptación: 29 de noviembre de 2017.

Y.A. Garcés 

Universidad Católica de Manizales.
Unidad Académica de Formación en Ciencias Naturales y Matemáticas. Manizales (Colombia)
ygarcés@ucm.edu.co, yagarsesg@unal.edu.co

N. Toro 

Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales.
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación. Manizales (Colombia)
ntoroga@unal.edu.co

F.E. Hoyos 

Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.
Facultad de Ciencias, Escuela de Física. Medellín (Colombia)
fehoyosve@unal.edu.co

Para citar este artículo:

Y. Garcés, N. Toro y F. Hoyos, "Acondicionador Unificado de Calidad de la Potencia en Topología Dual iUPQC para Compensación Activa de Sobretensiones Transitorias" *INGE CUC*, vol. 13, no. 2, pp. 112-117, 2017. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.13.2.2017.12>

Resumen

Introducción– Los acondicionadores unificados de calidad de la potencia UPQC permiten corregir, en los sistemas eléctricos, distorsiones de la forma de onda en estado estable, como los armónicos o el parpadeo, así como el factor de potencia.

Objetivo– Este artículo presenta un nuevo concepto de compensación activa de sobretensiones transitorias por medio de un UPQC en topología dual.

Metodología– El estudio se presenta en cinco etapas: en la sección I, se realiza la introducción y el estado del arte; en la sección II, se presenta el acondicionador unificado de calidad de la potencia UPQC; en la sección III, se describe la teoría de la potencia reactiva generalizada aplicada al iUPQC (topología dual); en la sección IV, se muestran las simulaciones y resultados; y en la sección V, se presentan las conclusiones.

Resultados– Se demuestra la aplicabilidad del iUPQC a la compensación de sobretensiones transitorias y se comparan los resultados con la teoría más representativa en compensación de armónicos y factor de potencia.

Conclusiones– El algoritmo de control propuesto para el acondicionador unificado de calidad de la potencia en topología dual permite compensar las sobretensiones transitorias en sistemas eléctricos trifásicos al tiempo que permite corregir armónicos en tensión y corriente, así como el factor de potencia.

Palabras clave– Acondicionador unificado de calidad de la potencia; compensador de potencia serie; compensador de potencia paralelo

Abstract

Introduction– The use of unified power quality conditioners UPQC in the electric systems can correct waveform distortions in a steady state, like harmonics, flicker, and the power factor.

Objective– This paper presents a novel approach for active compensation of overvoltage with a UPQC in dual topology or iUPQC.

Methodology– The study it is presented in five stages, the section I shows an introduction and the state of the art, section II presents the unified power quality conditioner UPQC, section III describes the generalized reactive power theory applied to the iUPQC (dual topology), section IV shows the numerical simulations and the results and section V presents the conclusions of the study.

Results– The results for the application of the iUPQC to the compensation of overvoltage are proved and compared with the more representative theory related to compensation of harmonics and low power factor.

Conclusions– The control algorithm presented for the unified power quality conditioner in dual topology allows to compensate the overvoltage in three-phase systems as well as voltage and current harmonics and the low power factor.

Keywords– Unified power quality conditioner, series power compensator, parallel power compensator.



I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, uno de los principales problemas de calidad de la energía es el incremento de los dispositivos electrónicos, tanto a nivel residencial como industrial, los cuales requieren de un alto nivel de calidad de la forma de onda de tensión de alimentación para funcionar correctamente [1]. Sin embargo, son estos mismos dispositivos electrónicos, los principales responsables del deterioro de la calidad de la potencia eléctrica al actuar como cargas no lineales [2].

Los transitorios por conmutación de capacitores (*capacitor-switching transients CST*) son la causa más común de sobretensiones transitorias, superada únicamente por las descargas atmosféricas en frecuencia de ocurrencia en la mayoría de los sistemas [3]. Estos transitorios pueden ser la causa de malas operaciones o falla de dispositivos, tanto en sistemas residenciales como industriales, por lo que este problema de calidad de la potencia ha ganado atención en los años recientes debido a los dispositivos que usan electrónica de estado sólido y que son más sensibles a las sobretensiones que sus predecesores [4].

Los *custom power devices* (CPD) usados en los sistemas de distribución pueden controlar problemas de calidad de la potencia, como los armónicos en tensión y corriente, el bajo factor de potencia, el desbalance de la fuente, el desequilibrio de la carga y el flicker [5], [6]. Los dispositivos CPD más comunes son el filtro activo paralelo para compensar corriente y factor de potencia [7], [8] y el filtro activo serie para compensar tensión armónica, SAG y SWELL. Uno de los dispositivos CPD más eficientes consta de un filtro activo serie y uno paralelo con un bus DC común, que es llamado *condicionador unificado de calidad de la potencia UPQC* [1], [9], [10]. Esta combinación permite la compensación simultánea de la corriente del lado de la fuente por medio del compensador paralelo y de la tensión de la carga por medio del compensador serie, aislando, de esta forma, el sistema de los problemas de calidad generados por la carga, y la carga de los problemas de calidad provenientes del sistema de alimentación.

La generación de las señales de referencia de los CPD ha sido uno de los principales problemas de investigación. Actualmente, la generación de señales de referencia para compensación de la mayoría de los problemas de calidad de la potencia ha sido ampliamente estudiada, sin embargo, no existe un modelo de compensación de transitorios de tensión por medio de los CPD debido a que el modelo tradicional de compensación y los algoritmos de estimación requieren que el dispositivo CPD genere formas de onda con factores de distorsión armónica elevados en un amplio rango

de frecuencias. De esta forma, la mitigación de los transitorios ha estado enfocada en los dispositivos de protección de sobretensiones (SPD) del tipo limitador o conmutador, como los tubos de gas, MOV (*Metal Oxide Varistor*) y los dispositivos semiconductores de unión de avalancha [11].

En este artículo se desarrolla un método de control y un algoritmo de generación de señal de referencia que permita extender el uso de los CPD a la compensación de las sobretensiones transitorias.

Para la validación de los esquemas propuestos, se realiza la compensación de un sistema de potencia en un circuito de prueba por medio de simulación. Se compensarán bajo factor de potencia, armónicos en tensión y corriente y transitorios oscilatorios de tensión trifásicos con un UPQC en topología dual. Para este propósito, en la sección II, se presenta el acondicionador unificado de calidad de la potencia UPQC; en la sección III, se describe la teoría de la potencia reactiva generalizada aplicada al iUPQC; en la sección IV, se muestran las simulaciones y resultados; y en la sección V, se presentan las conclusiones.

II. ACONDICIONADOR UNIFICADO DE CALIDAD DE LA POTENCIA UPQC

A. Principio de funcionamiento

El acondicionador unificado de calidad de la potencia está compuesto por dos inversores de potencia conectados a un mismo bus DC actuando como fuentes controladas de tensión y de corriente, respectivamente.

En el modelo clásico de compensación, el filtro serie es modelado como una fuente de tensión no sinusoidal que compensa los problemas de la fuente de alimentación, y el filtro paralelo es modelado como una fuente de corriente no sinusoidal que compensa los problemas de corriente provenientes de la carga [9], [10].

En [12], [13], [14], se propone un nuevo esquema de control del UPQC, donde la función de los filtros serie y paralelo han sido intercambiados. En este modelo, el filtro serie actúa como fuente de corriente sinusoidal que aísla la fuente de los problemas de la carga, y el filtro paralelo actúa como fuente de tensión sinusoidal, aislando la carga de los problemas de la fuente. El anterior modelo de control es llamado *Acondicionador Unificado de Calidad de la Potencia en Topología dual iUPQC*.

La principal ventaja de este esquema de compensación del iUPQC es que las señales que deben generar los inversores de potencia que componen el UPQC son sinusoidales puras, exigiendo menos esfuerzo computacional y permitiendo frecuencias de conmutación menores.

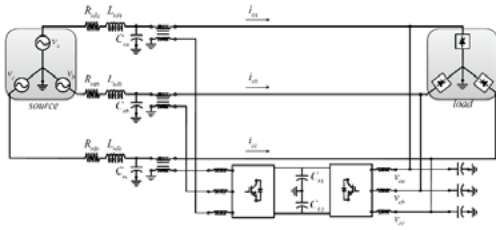


Fig. 1. Diagrama circuital del UPQC

El esquema general del UPQC se presenta en la Fig. 1. Está compuesto por dos inversores de potencia trifásicos de tres ramas conectados a un único bus DC de dos capacitores con punto medio conectado a tierra (inversor TLSC). La fuente está representada por un sistema en Y con su impedancia representada por R_{rd} y L_{rd} para cada una de las fases.

La carga se representa como una carga no lineal que genera corrientes armónicas y se puede controlar para generar un desfase entre la corriente y la tensión para controlar el factor de potencia.

B. Esquema de control

El control de lazo en el iUPQC es necesario para garantizar que los inversores de los filtros activos serie y paralelo generen de forma eficiente las señales de referencia que se les exigen. La estructura de capacitor partido de los inversores, permite realizar el análisis de control del compensador paralelo desacoplado del control del compensador de serie.

El control del compensador de serie está compuesto de 3 lazos. A partir del modelo de compensación dual se propone en este documento el esquema de control de lazo de corriente que se ilustra en la Fig. 2. El lazo de control interno es el control de la corriente sinusoidal en la fuente. El lazo de control intermedio es el control de desequilibrio de la tensión en los capacitores del bus DC. Este lazo garantiza que la tensión en los capacitores esté al mismo valor para poder compensar tanto los semiciclos positivos como negativos de la forma de onda; este actúa como un valor DC de corriente que se le aplica para cargar o descargar los capacitores según el valor de diferencia de tensión entre ellos.

Finalmente, el lazo externo de control es el control de tensión del bus DC. Este controlador se encarga de mantener la tensión de referencia entre los terminales de CC de los inversores que garantice la capacidad del UPQC de corregir los problemas de calidad de la potencia en estado estable y transitorio.

El modelo en espacio de estados del lazo de corriente de la fuente se obtiene a partir del modelo promediado [15], que permite llevar el circuito del compensador serie al circuito simplificado referenciado al primario del transformador de acople de la Fig. 3. La ecuación (1) representa el modelo en espacio de estados del circuito.

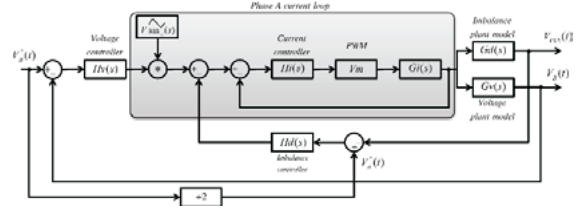


Fig. 2. Esquema de compensación dual del UPQC.

$$\begin{bmatrix} V_B D(s) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_p + sL_{eq_p} + Z_m) & Z_m \\ Z_m & sL_{eq_s} + R_{eq_s} + Z_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

El control del compensador paralelo tiene como objetivo proveer a la carga de tensión sinusoidal, balanceada y a valor nominal; éste solo consta del lazo de control de tensión de la carga.

Los controladores son diseñados en la frecuencia siguiendo la metodología presentada en [14]. Posteriormente, las funciones de transferencia son discretizadas para aplicarle controladores tipo PID.

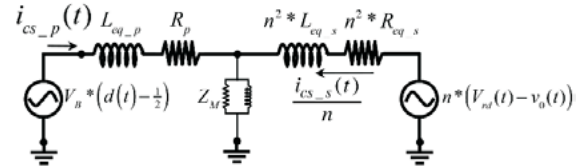


Fig. 3. Esquema de compensación dual del UPQC.

III. TEORÍA DE LA POTENCIA REACTIVA GENERALIZADA APLICADA AL IUPQC

En 2007 fue presentada la formulación de la potencia reactiva generalizada a sistemas de polifásicos [16], [17], la cual fue definida posteriormente, en 2010, como *teoría tensorial de la potencia instantánea* [18], [19]. Esta formulación está basada en interpretar los vectores instantáneos de tensión y corriente como tensores de primer orden y definir las componentes de potencia a partir de la aplicación de operaciones con producto diádico o producto tensorial.

Formulando los vectores instantáneos de tensión y corriente como $\vec{u} = u = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_n]$ e $\vec{i} = i = [i_1 \ i_2 \ \dots \ i_n]$ en [16], [17], la potencia activa instantánea y la potencia imaginaria instantánea son definidas según las ecuaciones (2) y (3).

$$p(t) = u \cdot i \quad (2)$$

$$q(t) = \vec{i}(t) \wedge \vec{u}(t) \quad (3)$$

donde los operadores \cdot y \wedge denotan el producto punto y el producto exterior, respectivamente. El producto exterior es una antisimetrización del producto diádico que se denota con el operador \otimes de forma tal que la ecuación 3 puede ser escrita como en (4).

$$q(t) = \vec{i} \wedge \vec{u} = (\vec{i} \otimes \vec{u}) - (\vec{u} \otimes \vec{i}) \quad (4)$$

Por otro lado, la componente activa de la corriente se define en (5).

$$\vec{i}_p = \frac{p(t)}{\vec{u}^T \vec{u}} \vec{u} = \frac{(u_1 i_1 \quad u_2 i_2 \dots \quad u_n i_n)}{\vec{u} \vec{u}} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

La corriente total demandada por la carga está definida como (6).

$$\begin{aligned} \vec{i} &= \frac{(\vec{i} \otimes \vec{u})}{\vec{u} \cdot \vec{u}} \vec{u} = \frac{(\vec{u} \otimes \vec{i}) + (\vec{i} \otimes \vec{u}) - (\vec{u} \otimes \vec{i})}{\vec{u} \cdot \vec{u}} \vec{u} = \\ &= \frac{(\vec{u} \otimes \vec{i})}{\vec{u} \cdot \vec{u}} \vec{u} + \frac{(\vec{i} \otimes \vec{u}) - (\vec{u} \otimes \vec{i})}{\vec{u} \cdot \vec{u}} \vec{u} = \\ &= \frac{(\vec{u} \otimes \vec{i})}{\vec{u} \cdot \vec{u}} \vec{u} + \frac{p(t)}{\vec{u} \cdot \vec{u}} \vec{u} + \frac{q(t)}{\vec{u} \cdot \vec{u}} \vec{u} \end{aligned} \quad (6)$$

Dando como resultado final, que la corriente puede ser descompuesta en dos componentes, una componente activa y una componente imaginaria, como en la ecuación (7).

$$\vec{i} = \vec{i}_p + \vec{i}_q \quad (7)$$

A partir de esta formulación, se ha propuesto la estimación de la referencia de corriente para compensadores paralelo denominada *cancelación perfecta de armónicos* (PHC, por sus siglas en inglés) dada por la ecuación (8).

$$\vec{i}_{ref} = \vec{i} - \vec{i}_{p,f}^+ \quad (8)$$

En 8, $\vec{i}_{p,f}^+$ es el vector de corriente instantáneo de frecuencia fundamental y secuencia directa, definido en la ecuación (9).

$$\vec{i}_{p,f}^+ = \frac{tr(\psi)}{\int_0^T (\vec{v}_\gamma^+ \cdot \vec{v}_\gamma^+)} \vec{v}_\gamma^+ \quad (9)$$

La expresión (9) es el vector instantáneo de referencia en corriente para el iUPQC, ya que representa la corriente instantánea de secuencia directa y frecuencia fundamental de la carga y se encuentra en fase con la tensión fundamental de la fuente, sin embargo, el término \vec{v}_γ^+ , denominado vector de tensión de secuencia directa y frecuencia fundamental calculado en [18] por medio de la transformación de Fortescue y series de Fourier es inadecuado en los eventos de huecos o elevaciones de tensión (SAG y SWELL). Lo anterior se debe a que, en esos eventos, la magnitud de referencia de $\vec{i}_{p,f}^+$ se ve afectada igualmente en magnitud, siendo una referencia incorrecta. Con el anterior inconveniente, se hace necesario replantear el cálculo de \vec{v}_γ^+ .

En este trabajo se propone el mencionado cálculo por medio del vector unitario de secuencia directa y frecuencia fundamental $\vec{v}_{f,u}^+$. Para la extracción de este vector se hace uso de un PLL (lazo de seguimiento de fase) en el marco de referencia sincrónico SRF-PLL [20], con el cual se determinan las tres señales sinusoidales con un desfase de entre ellas y de amplitud unitaria para luego obtener (10).

$$\begin{aligned} \vec{v}_{f,u,a}^+ &= \sqrt{2} V_{RMS,ref} \sin(\theta) \\ \vec{v}_{f,u,b}^+ &= \sqrt{2} V_{RMS,ref} \sin(\theta - 120) \end{aligned} \quad (10)$$

En la ecuación (10), $V_{RMS,ref}$ es el valor de tensión eficaz nominal del sistema. El algoritmo para obtener θ se presenta en el diagrama de la Figura 4.

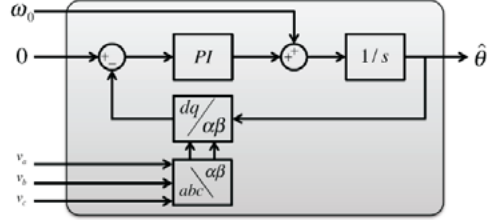


Fig. 4. Esquema del PLL.

Las expresiones dadas en la ecuación (10) son la referencia de tensión que se busca para el UPQC en topología dual, a partir de esta expresión, la ecuación (9) puede ser formulada como en la ecuación (11).

$$\vec{i}_{p,f,u}^+ = \frac{P}{U^2} \vec{v}_{f,u}^+ \quad (11)$$

En la ecuación (11), U es la norma promedio del vector instantáneo de tensión fundamental y P es definida como la potencia activa promedio a tensión fundamental, y está dada por la ecuación (12).

$$P = \vec{v}_{f,u}^+ \cdot \vec{i} \quad (12)$$

El vector $\vec{i}_{p,f,u}^+$ expresa las tres referencias de corriente para el compensador unificado dual, de esta forma, el algoritmo para la estimación de las referencias de tensión y corriente del iUPQC queda completamente desarrollado en el esquema de la Figura 5.

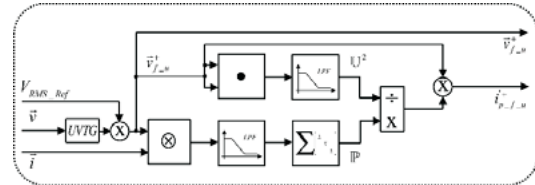


Fig. 5. Algoritmo para estimación de las señales de referencia del UPQC en topología dual.

IV. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

El iUPQC simulado está compuesto por un bus DC a capacitores partidos. Los pulsos son generados por las salidas de controladores discretos PID comparadas con señales triangulares de 20 kHz de frecuencia. Los compensadores serie y paralelo tienen la función de compensar corriente y tensión, respectivamente (enfoque dual de compensación), además, por medio del compensador de serie se compensa la tensión en el bus DC y el desequilibrio de tensión de los capacitores del bus DC.

A. Parámetros del sistema

Fuente de tensión. Fuente de tensión: 115 VRMS, 60 Hz; los parámetros de contaminación armónica de la fuente se resumen en la Tabla I. La impedancia de la fuente está dada por la resistencia $R_{fd} = 0.04\Omega$ y $L_{rd} = 107\mu\text{H}$. Además, en la fuente de alimentación se genera un transitorio oscilatorio a los 4.16 ms.

Tabla I. DISTORSIÓN ARMÓNICA DE LA FUENTE DE TENSIÓN POR FASES

	v_{fRMS}	$v5th_{RMS}$	$v7th_{RMS}$	$v11th_{RMS}$	$v13th_{RMS}$
Va	115 V	15 V	0 V	5.7 V	5.7 V
Vb	115 V	15 V	15 V	0 V	5.7 V
Vc	108 V	12 V	12 V	5.4 V	0 V

Carga. Compuesta por un puente rectificador trifásico completamente controlado a thyristores, con un ángulo de fase de 40° , la impedancia del lado DC está compuesta por una carga paralelo RC en serie con un inductor, sus valores son $R = 75\Omega$, $C = 10\mu\text{F}$ y $L = 100\text{mH}$.

Inversor serie. El compensador serie está conectado por medio de inductores con inductancia $L = 20\text{mH}$ y transformadores monofásicos con relación de transformación unitaria de 1 KVA. Los parámetros fueron determinados por medio de pruebas en vacío y circuito abierto del lado de la fuente. Se agrega un capacitor para eliminar la conmutación de alta frecuencia del inversor de valor $C_s = 100\mu\text{F}$.

Inversor paralelo. Conectado por medio de inductores de $L_p = 650\text{mH}$; el filtro de alta frecuencia LC se completa con un capacitor de $C = 10\mu\text{F}$.

Bus DC. Compuesto por dos capacitores en serie con conexión intermedia a tierra; cada uno tiene un valor de 6 mF para una capacitancia total de 3 mF.

B. Resultados de compensación

En la Figura 6 se presentan los resultados de compensación de la tensión de la carga. En las tres fases del sistema se genera un transitorio oscilatorio que corresponde a la conexión asincrónica de un banco de capacitores [21], pero éste no llega a la carga.

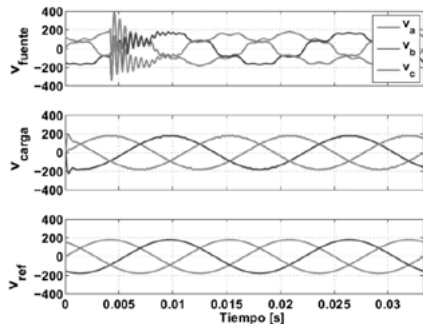


Fig. 6. Formas de onda de tensión antes y después de la compensación y señal de referencia.

Tabla II. DISTORSIÓN ARMÓNICA THDV Y THDI ANTES Y DESPUÉS DE LA COMPENSACIÓN.

	THD Antes de la compensación con sobretensión	THD Después de la compensación sin sobretensión	THD Después de la compensación
U_a	40.39%	14.96%	1.24%
U_b	41.88%	19.29%	1.10%
U_c	42.32%	16.51%	1.08%
i_a	NA	30.26%	3.45%
i_b	NA	30.26%	4.46%
i_c	NA	30.26%	3.43%

Los resultados de la compensación en la frecuencia se resumen en la Tabla II. Se toman los índices de distorsión armónica por fase en el ciclo del transitorio y un ciclo después para la tensión antes de la compensación, y el THD para la corriente en estado estable. También se presentan los valores de THD después de la compensación para evaluar los resultados de aplicar el compensador.

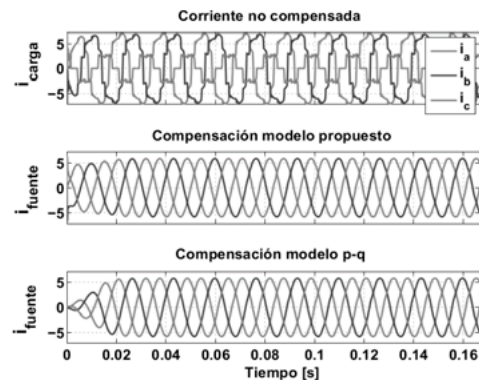


Fig. 7. Formas de onda de corriente para un caso particular de carga desequilibrada antes y después de la compensación, comparación de respuesta del algoritmo propuesto en [12].

Finalmente, en la Figura 7 se muestra la comparación de la estimación de referencia de corriente para el UPQC en un caso particular usando la teoría de la potencia reactiva generalizada por medio del algoritmo propuesto en este documento y la comparación con los resultados reportados en [12] con la teoría de la potencia reactiva instantánea.

III. CONCLUSIONES

En este documento, se ha propuesto un algoritmo de estimación de referencia para UPQC en topología dual usando la teoría de la potencia reactiva generalizada y basado en el funcionamiento de los compensadores como fuentes sinusoidales de tensión y corriente para la compensación, contrario al enfoque tradicional donde las fuentes de corriente y de tensión son altamente distorsionadas.

Los resultados de simulación muestran que el UPQC con este algoritmo es capaz de compensar corrientes de carga altamente distorsionadas y desequilibradas con el compensador de serie, al tiempo que puede compensar armónicos en tensión, SAG, SWELL y desbalance de la fuente con el compensador paralelo. El enfoque de control propuesto para el UPQC tiene mejoras en el funcionamiento al adicionar la capacidad de compensar transitorios oscilatorios de tensión. Finalmente, el algoritmo propuesto es comparado con la estimación de referencia por medio de la teoría de la potencia reactiva instantánea, mostrando que el nuevo algoritmo tiene una respuesta transitoria mejorada, alcanzando así el estado estable de referencia en menos tiempo.

IV. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado y soportado por la Universidad Católica de Manizales con el Grupo de Investigación en Desarrollos Tecnológicos y Ambientales GIDTA; la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, con el Grupo de Investigación en Recursos Energéticos (GIRE-COL0144229); y la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, con los proyectos de investigación HERMES-34671 y HERMES-36911.

REFERENCIAS

- [1] A. Mokhtarpour, H. Shayanfar, and S. Mohammad Taghi Bathaee, "Reference Generation of Custom Power Devices (CPs)," *An Update on Power Quality*, D. Dah-Chuan Lu (Ed.), InTech Open Access Publisher, March 3, 2013. <https://doi.org/10.5772/54680>
- [2] J. L. Strack, J. A. Suárez, G. F. Di Mauro, and S. B. Jacob, "Impact of Efficient Residential Lighting on Power Quality of a Distribution Network," *Inge Cuc*, vol. 10, n° 2, pp. 9-19, Dec, 2014.
- [3] J. L. Dura'n-Gómez and P. N. Enjeti. A new approach to mitigate nuisance tripping of PWM ASDs due to utility capacitor switching transients (CSTs), *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 17, no. 5, pp. 799-806, 2002. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2002.802198>
- [4] D. A. Acevedo, G. G. Chacón, and F. Santamaría, "Methodology for Measuring Transient Overvoltage Parameters in 11.4 kV Distribution Networks," *Inge Cuc*, vol. 12, N° 1, pp. 65-72, June, 2016.
- [5] J. Fei, T. Li, F. Wang, and W. Juan, "A Novel Sliding Mode Control Technique for Indirect Current Controlled Active Power Filter," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2012, Article ID 549782, 18 pages, 2012.
- [6] J. Fei and S. Hou, "Adaptive Fuzzy Control with Supervisory Compensator for Three-Phase Active Power Filter," *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2012, Article ID 654937, 13 pages, 2012.
- [7] S. S. Patnaik and A. Kumar Panda, "Particle Swarm Optimization and Bacterial Foraging Optimization Techniques for Optimal Current Harmonic Mitigation by Employing Active Power Filter," *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, vol. 2012, Article ID 897127, 10 pages, 2012.
- [8] Z. Chelli, R. Toufouti, A. Omeiri, and S. Saad, "Hysteresis Control for Shunt Active Power Filter under Unbalanced Three-Phase Load Conditions," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2015, Article ID 391040, 9 pages, 2015.
- [9] S. Abbas Taher and S. Ahmadsreza Afsari, "Optimal Location and Sizing of UPQC in Distribution Networks Using Differential Evolution Algorithm," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2012, Article ID 838629, 20 pages, 2012.
- [10] Rajasekaran Dharmalingam, Subhransu Sekhar Dash, Karthikrajan Senthilnathan, Arun Bhaskar Mayilvaganan, and Subramani Chinnamuthu, "Power Quality Improvement by Unified Power Quality Conditioner Based on CSC Topology Using Synchronous Reference Frame Theory," *The Scientific World Journal*, vol. 2014, Article ID 391975, 7 pages, 2014.
- [11] J. C. Das, *Transients in electrical systems: analysis, recognition, and mitigation*. McGraw Hill Professional, 2010.
- [12] M. Aredes and R. M. Fernandes, "A unified power quality conditioner with voltage SAG/SWELL compensation capability," *Power Electronics Conference*, 2009, COBEP, pp. 218-224, Sept. 27, 2009-Oct. 1, 2009.
- [13] B.W. Franca and M. Aredes, "Comparisons between the UPQC and its dual topology (iUPQC) in dynamic response and steady-state," *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1232-1237, 7-10 Nov. 2011.
- [14] R. J. Millnitz dos Santos, M. Mezaroba, and J. C. da Cunha, "A dual unified power quality conditioner using a simplified control technique," *Power Electronics Conference (COBEP)*, pp. 486-493, 11-15 Sept., 2011. <https://doi.org/10.1109/COBEP.2011.6085271>
- [15] N. Mohan. *First course on power electronics and drives*, Mn-pere, 2003.
- [16] P. Salmerón and R. S. Herrera, "Instantaneous reactive power theory—A general approach to poly-phase systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 9, pp. 1263-1270, September 2009, ISSN 0378-7796.
- [17] R.S. Herrera, P. Salmeron, J. R. Vazquez, and S.P. Litran, "Instantaneous Reactive Power Theory to N Wire Systems," *ISIE 2007. IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 2457-2462, 4-7 June, 2007.
- [18] A. J. Ustariz, E. Cano Plata, and H. E. Tacca, "Instantaneous power tensor theory: improvement and assessment of the electric power quality," *14th on International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, pp. 1-6, 26-29 Sept., 2010.
- [19] A. J. Ustariz, E. A. Cano, and H. E. Tacca, "Tensor analysis of the instantaneous power in electrical networks," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 7, pp. 788-798, July 2010, ISSN 0378-7796.
- [20] Guo Xiao-Qiang, Wei-Yang Wu, and He-Rong Gu, "Phase locked loop and synchronization methods for grid-interfaced converters: a review," *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 87, no. 4, pp. 182-187, 2011.
- [21] M. F. Izzary-Silvestrini and T. E. Vélez-Sepúlveda, "Mitigation of Back-to-Back Capacitor Switching Transients on Distribution Circuits," in Department of Electrical and Computer Engineering, University of Puerto Rico, 2006.