

## DISEÑO DEL CONTROLADOR PI DE UN FILTRO ACTIVO DE POTENCIA EN DERIVACIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DE LA ENERGÍA DE LA RED ELÉCTRICA EN CONEXIÓN CON UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

López Flores David R.<sup>1</sup>, Baray Arana Rogelio E.<sup>2</sup>, Castro Díaz Armando J.<sup>3</sup>, Lozoya Ponce Ricardo E.<sup>4</sup>

Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Chihuahua

División de Posgrado e Investigación

Av. Tecnológico 2902

Tel., (52) 614 201 2000

david.lf@chihuahua.tecnm.mx<sup>1</sup>, rogelio.ba@chihuahua.tecnm.mx<sup>2</sup>

m22061146@chihuahua.tecnm.mx<sup>2</sup>, ricardo.lp@chihuahua.tecnm.mx<sup>4</sup>

### RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño del controlador Proporcional Integral (PI) de un Filtro Activo de Potencia (FAP) en derivación para mejorar la calidad de la energía de la red eléctrica en conexión con un inversor fotovoltaico. El diseño del controlador PI se llevó a cabo con un método basado en la compensación de corrientes armónicas, el modelo de FAP que considera el bus de CD y un inversor en fuente de voltaje, así como la respuesta dinámica de un sistema de segundo orden en su forma estándar. A pesar de que en la red eléctrica se consideraron cargas no lineales, inductivas y desbalanceadas, el método utilizado permitió una corrección efectiva de los armónicos de corriente, reduciéndolos a menos del 4%, y garantizar un factor de potencia unitario. Además, este método contribuye a una mejor comprensión del proceso de diseño del controlador PI. La efectividad del FAP en derivación con controlador PI fue validada mediante simulaciones exhaustivas en el entorno de MATLAB/Simulink.

**Palabras Clave:** Filtro activo de potencia en derivación, controlador Proporcional Integral, calidad de la energía.

### ABSTRACT

This paper presents the design of the Proportional Integral (PI) controller of a shunt Active Power Filter (APF) to enhance the power quality of the power grid in connection with a photovoltaic inverter. The PI controller design was performed using a method based on harmonic current compensation, the FAP model considering the DC bus and a voltage source inverter, and the dynamic response of a second-order system in its standard form. Although non-linear, inductive, and unbalanced loads were considered in the electrical network, the method effectively corrected the current harmonics, reducing them to less than 4% and guaranteeing a unity power factor. In addition, this method contributes to a better comprehension of the PI controller design process. The effectiveness of the shunt FAP with PI controller was validated by extensive simulations in MATLAB/Simulink environment.

**Keywords:** shunt active power filter, integral proportional controller, power quality.

### 1. INTRODUCCIÓN

Un Sistema Fotovoltaico (FV) conectado a la red eléctrica (RE) se diseña para suministrar voltaje y corriente sinusoidales puros a una frecuencia de 60 Hz, con el propósito de contribuir a la calidad de la energía (PQ, por sus siglas en inglés, *Power*

*Quality*) [1]. Sin embargo, la presencia de cargas no lineales, como los cargadores de vehículos eléctricos, cargas inductivas como los motores eléctricos, y cargas desbalanceadas en la RE, genera armónicos de corriente que se inyectan en la red eléctrica. Estos armónicos aumentan cuando el sistema FV, las cargas y la RE interactúan entre sí en el Punto de Acoplamiento Común (PCC, por sus siglas en inglés, *Point of Common Coupling*), provocando efectos adversos como mayor consumo energético, una distorsión armónica total alta (THD, por sus siglas en inglés, *Total Harmonic Distortion*) generando disminución del factor de potencia (FP) y distorsión en el voltaje sinusoidal en el punto PCC [2]. El Filtro Activo de Potencia (FAP) en derivación con controlador PI es el enfoque más utilizado para mitigar los problemas de armónicos [3]. Sin embargo, la mayoría de los esfuerzos de investigación presentan este filtro sin adentrarse en el método de diseño del controlador PI [4]-[14]. Un diseño adecuado del controlador PI contribuye a una operación efectiva del FAP en la mitigación de armónicos, así como garantizar un FP unitario durante eventos transitorios y estacionarios causados por las cargas no lineales, inductivas y desbalanceadas. Por lo tanto, en este trabajo se presenta un método pormenorizado para el diseño del controlador PI. Este método se basa en la compensación de corrientes armónicas, el modelo del FAP que considera el bus de CD y un Inversor en Fuente de Voltaje (VSI, por sus siglas en inglés, *Voltage Source Inverter*), así como la respuesta dinámica de un sistema de segundo orden en su forma estándar. El método utilizado en el diseño del controlador PI permite una corrección efectiva de los armónicos de corriente en la RE, reduciéndolos a menos del 4%, así como alcanzar un factor de potencia unitario, incluso considerando cargas no lineales, inductivas y desbalanceadas en la red eléctrica. Además, este método contribuye a una mejor comprensión del proceso de diseño del controlador PI.

El presente trabajo está organizado como sigue. En la sección 2, se describe la configuración de la red eléctrica en conexión con el sistema FV y el FAP en derivación, así como el diseño pormenorizado del controlador PI del FAP. En la sección 3 se presentan los resultados de simulación y sus discusiones. Por último, en la sección 4 se presentan las conclusiones.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Configuración de la Red Eléctrica

La Fig. 1 muestra la configuración de la red eléctrica, en conexión con el sistema FV y el FAP con controlador PI, utilizada para mitigar los armónicos de corriente y garantizar un FP unitario. A continuación, se describe cómo interactúan entre sí los bloques de esta figura.

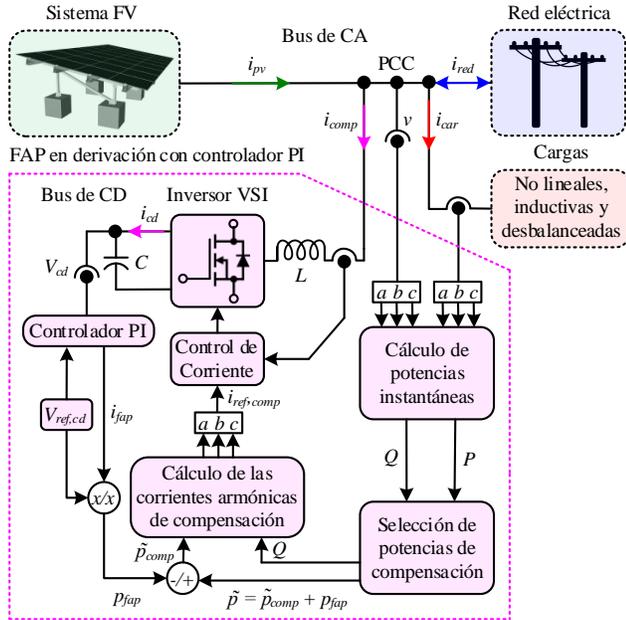


Figura 1. Configuración de la red eléctrica en conexión con el sistema FV y FAP con controlador PI.

De acuerdo con la Fig. 1, primero se toman las lecturas de las corrientes de carga  $i_{car}$  y los voltajes de la red eléctrica  $v$  en el PCC. Con base en estas mediciones y en la teoría de la potencia instantánea [4], se calculan las potencias activa  $P$  y reactiva  $Q$  instantáneas, las cuales contienen componentes directos y oscilantes. Posteriormente, un selector de potencias de compensación, basado en un filtro paso bajo [13], procesa la potencia  $P$  para determinar la potencia activa oscilante  $\tilde{p}$ . Esta potencia contiene la potencia de compensación  $\tilde{p}_{comp}$ , la cual está vinculada con la potencia que requiere el FAP para operar,  $p_{fap}$ . La potencia  $\tilde{p}_{comp}$  contiene información relacionada con los armónicos de corriente a compensar y, para separarla de  $p_{fap}$ , se requiere del controlador PI (ver Fig. 1). Lograr una separación adecuada de  $p_{fap}$  de  $\tilde{p}_{comp}$  implica mantener constante el voltaje  $V_{dc}$  en el capacitor  $C$ , garantizando así un intercambio adecuado de  $\tilde{p}_{comp}$  entre el PCC y el resto del sistema eléctrico. Esto contribuye inherentemente a una compensación adecuada de los armónicos de corriente y un FP mejorado. De ahí la necesidad de un diseño apropiado del controlador PI. Luego de seleccionar las potencias  $\tilde{p}_{comp}$  y  $Q$ , se calculan las corrientes de referencia de compensación  $i_{ref,comp}$  utilizando la transformada inversa de Clarke [7]. Las corrientes  $i_{ref,comp}$  son las corrientes armónicas de

compensación derivadas por las cargas no lineales, inductivas y desbalanceadas. Finalmente, un control de histéresis de corriente de alta velocidad procesa la diferencia entre las corrientes  $i_{ref,comp}$  y las corrientes de compensación  $i_{comp}$  que inyecta el FAP en el PCC [12]. Como resultado de este procesamiento se obtienen los pulsos de activación del inversor VSI que contribuyen tanto a la mitigación de armónicos como a la compensación de potencia reactiva para obtener un FP mejorado en la red eléctrica. La siguiente sección aborda el método pormenorizado del diseño del controlador PI. Debido a la vinculación de  $\tilde{p}_{comp}$  con  $p_{fap}$ , este método implica adentrarse en cada uno de los bloques de FAP que se muestran en la Fig. 1.

### 2.2. Diseño del Controlador PI

El bloque relacionado con el cálculo de las potencias instantáneas se resuelve de la siguiente manera. Suponiendo una red eléctrica balanceada, los voltajes en el PCC y las corrientes de carga pueden expresarse en los componentes  $\alpha$  y  $\beta$  mediante la transformada de Clarke [13]:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{car,\alpha} \\ i_{car,\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{car,a} \\ i_{car,b} \\ i_{car,c} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Utilizando el lado izquierdo de (1) y (2), los voltajes en el PCC y las corrientes de carga se pueden escribir en forma compleja de la siguiente manera:

$$v = v_\alpha + jv_\beta \quad (3)$$

$$i_{car} = i_{car,\alpha} + ji_{car,\beta} \quad (4)$$

El producto de (3) y (4) resulta en la potencia compleja instantánea de la red eléctrica:

$$S = (v_\alpha i_{car,\alpha} + v_\beta i_{car,\beta}) + j(v_\beta i_{car,\alpha} - v_\alpha i_{car,\beta}) \quad (5)$$

De (5), las potencias activa y reactiva instantáneas son:

$$P = v_\alpha i_{car,\alpha} + v_\beta i_{car,\beta} \quad (6)$$

$$Q = v_\beta i_{car,\alpha} - v_\alpha i_{car,\beta} \quad (7)$$

Las potencias  $P$  y  $Q$  pueden visualizarse mejor en forma matricial, como sigue:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{car,\alpha} \\ i_{car,\beta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

El lado izquierdo de (8) puede escribirse en términos de componentes de directa, oscilante, de compensación y  $p_{fap}$ , como sigue:

$$P = \bar{p} + \tilde{p}_{comp} + p_{fap} \quad (9)$$

$$Q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (10)$$

El bloque relacionado con el cálculo de las corrientes armónicas de compensación procesa la potencia  $Q$  de (10) y  $\tilde{p}_{comp}$  de (9) para determinar a  $i_{ref,comp}$ . De ahí la necesidad de un filtro paso bajo para separar a  $\bar{p}$  de  $\tilde{p}_{comp}$  y  $p_{fap}$  dentro del bloque de selección de potencias de compensación, como se muestra en Fig. 2 [13], así como de un controlador PI para separar a  $p_{fap}$  de  $\tilde{p}_{comp}$  como se indica en la Fig. 1 [3]-[5], [8], [9],[11] [14].

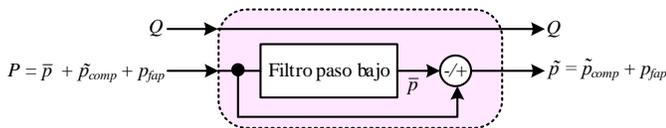


Figura 2. Selector de potencias de compensación.

Reemplazando  $P$  por  $\tilde{p}_{comp}$  en (8) y resolviendo para las corrientes, se obtiene el cálculo de las corrientes de referencia de compensación en los ejes  $\alpha$  y  $\beta$ :

$$\begin{bmatrix} i_{ref,comp,\alpha} \\ i_{ref,comp,\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (11)$$

Utilizando la transformada inversa de Clarke [7], las corrientes de (11) se convierten en las corrientes de referencia de compensación  $i_{ref,comp}$  en los ejes  $a$ ,  $b$  y  $c$ , como sigue:

$$\begin{bmatrix} i_{ref,comp,a} \\ i_{ref,comp,b} \\ i_{ref,comp,c} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref,comp,\alpha} \\ i_{ref,comp,\beta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

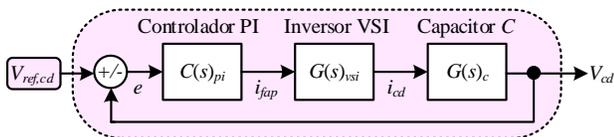


Figura 3. Diagrama a bloques de lazo cerrado del FAP con controlador PI.

El bloque de control de corriente procesa la diferencia entre  $i_{ref,comp}$  e  $i_{comp}$  basándose en un enfoque de control por histéresis de alta velocidad para determinar los pulsos de activación del inversor VSI [12]. Como resultado, se contribuye tanto a la mitigación de armónicos como a la compensación de potencia reactiva, mejorando el FP en la red eléctrica. Para diseñar el bloque relacionado con el controlador PI, se requiere el diagrama de bloques de lazo cerrado del FAP mostrado en la Fig. 3. Este diagrama, que considera a  $\tilde{p}$  como una perturbación ( $i_{comp} \approx i_{fap}$ ),

se compone de la función de transferencia del capacitor  $C$  del lado CD, la del inversor VSI y la del controlador PI. A continuación, se describe cómo se obtienen cada una de estas funciones de transferencia. La corriente  $i_{cd}$  del capacitor  $C$ , mostrada en Fig. 1, puede encontrarse de la siguiente manera:

$$i_{cd} = C \frac{dv_{cd}}{dt} \quad (13)$$

Aplicando la transformada de Laplace a (13), se obtiene la función de transferencia del capacitor  $C$  del lado CD:

$$G(s)_c = \frac{v_{cd}}{i_{cd}} = \frac{1}{Cs} \quad (14)$$

Si la transferencia de potencia desde el lado CD al lado de CA del inversor VSI es constante y se desprecia la respuesta dinámica del inductor de acoplamiento  $L$  debido a la alta velocidad del controlador de corriente del inversor VSI, entonces:

$$V_{cd}i_{cd} = vi_{fap} \quad (15)$$

Considerando que el índice de modulación del inversor VSI es  $m = (2\sqrt{2}v)/(\sqrt{3}V_{cd})$ , la ecuación (15) puede reescribirse como:

$$V_{cd}i_{cd} = \frac{\sqrt{3}mV_{cd}}{2\sqrt{2}} i_{fap} \quad (16)$$

La función de transferencia del inversor VSI se puede deducir de (16) de la siguiente manera:

$$G(s)_{vsi} = \frac{i_{cd}}{i_{fap}} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m \quad (17)$$

De acuerdo con la Fig. 5, el controlador PI calcula el error  $e$  como la diferencia entre el valor de voltaje deseado en el capacitor  $C$  y su valor actual:

$$e = V_{cd,ref} - V_{cd} \quad (18)$$

El  $e$  se procesa por (19) para determinar la corriente que FAP necesita para operar,  $i_{fap}$ . Al realizar el producto entre esta corriente y  $V_{cd,ref}$ , se obtiene la potencia  $p_{fap}$ , la cual se utiliza para determinar  $\tilde{p}_{comp}$  como se indica en la Fig. 1.

$$i_{fap} = K_p e + \frac{1}{T_i} \int edt \quad (19)$$

Donde el parámetro  $K_p$  es la ganancia proporcional y el parámetro  $T_i$  es el tiempo de integración. Aplicando la transformada de Laplace en (19), se puede determinar la función de transferencia del controlador PI de la siguiente manera:

$$C(s)_{pi} = \frac{i_{fap}}{e} = K_p + \frac{K_p}{T_i s} \quad (20)$$

La separación adecuada de  $p_{fap}$  de  $\tilde{p}_{comp}$ , implica un desempeño efectivo del controlador PI. Este desempeño se puede alcanzar determinando adecuadamente los parámetros  $K_p$  y  $T_i$  del controlador. Estos parámetros pueden determinarse con base en la respuesta dinámica de un sistema de segundo orden en su forma estándar. A continuación, se describe el procedimiento para obtener los parámetros  $K_p$  y  $T_i$ . Considerando las funciones de transferencia (14), (17) y (20), la solución del diagrama a bloques de lazo cerrado del FAP es la siguiente:

$$TF(s)_{fap} = K \frac{(s + c_1)}{1} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (21)$$

$$K = T_i \quad (22)$$

$$c_1 = \frac{1}{T_i} \quad (23)$$

$$2\xi\omega_n = \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}K_p m}{4C} \quad (24)$$

$$\omega_n^2 = \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}K_p m}{4CT_i} \quad (25)$$

Donde  $K$ ,  $c_1$ ,  $\omega_n$  y  $\xi$  representan la ganancia del FAP, el cero debido a  $T_i$ , la frecuencia natural no amortiguada y el factor de amortiguamiento, respectivamente. Es fácil notar que de (24) y (25) se pueden calcular los parámetros  $K_p$  y  $T_i$  del controlador PI:

$$K_p = \frac{4\sqrt{2}\sqrt{3}C\xi\omega_n}{3m} \quad (26)$$

$$T_i = \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}K_p m}{4C\omega_n^2} \quad (27)$$

Finalmente, el factor  $\xi$  y la frecuencia  $\omega_n$  se pueden determinar a partir del tiempo de asentamiento  $t_a$  y el sobrepaso máximo  $M_p$  establecidos por el diseñador mediante las siguientes ecuaciones:

$$\xi = \frac{\ln(M_p)}{\sqrt{\ln(M_p)^2 + \pi^2}} \quad (28)$$

$$\omega_n = -\frac{\ln(\epsilon)}{\xi t_a} \quad (29)$$

Donde  $\epsilon$  es el porcentaje de error permitido en el tiempo  $t_a$ . Es importante establecer un  $t_a$  que permita operar al controlador PI más lentamente que el controlador de corriente del inversor VSI para contribuir a una operación estable entre ambos controladores. El establecimiento adecuado de  $t_a$  y  $M_p$  garantiza que el cero  $c_1$  definido por (23), se ubique significativamente a la izquierda de los polos dominantes de (21), minimizando así un impacto negativo en la respuesta de FAP con respecto a los parámetros de diseño establecidos. En este trabajo se estableció un  $t_a$  de 500 ms y un  $M_p$  del 20%, lo que resultó en un  $K_p$  de 0.0698 y  $T_i$  de 0.0531 s. La Tabla 1 resume los parámetros del controlador PI de FAP y de la red eléctrica, mostrada en la Fig. 1, utilizados para desarrollar las simulaciones en el entorno de MATLAB/Simulink.

Tabla 1. Parámetros de simulación del sistema FV, red eléctrica y FAP.

Sistema FV	
Potencia	10 kW
Irradiancia	1000 W/m <sup>2</sup>
Red eléctrica	
Frecuencia	60 Hz
Voltaje de fases	110 V <sub>rms</sub>
Corriente de corto circuito $I_{cc}$	400 MA
Cargas	
No lineales	20 kW
Reactivas (inductivas)	1 kW
Desbalanceadas por fase	1 Ω, 3 Ω y 5 Ω
FAP	
Capacitor $C$	1000 μf
Inductor $L$	1 mH
$T_{corriente}^1$	5 μs
Voltaje del bus de CD	850 V
Voltaje de fases	110 V <sub>rms</sub>
$T_{pi}^2$	50 μs
$KP^3$	0.0698
$KI^3$	$6.5685 e^{-5}$

<sup>1</sup> Tiempo de muestreo del controlador de corriente

<sup>2</sup> Tiempo de muestreo del controlador PI

<sup>3</sup> El controlador fue implementado digitalmente, por lo tanto  $KI = (K_p/T_i)T_{pi}$  y  $KP = K_p - KI/2$

### 3. SIMULACIONES Y DISCUSIONES

Considerando los parámetros de la Tabla 1 en Fig. 1, la Fig. 4 muestra el desempeño del controlador PI de FAP en la red eléctrica tras la activación de cargas no lineales, inductivas y desbalanceadas. En la Fig. 5 se presenta el desempeño del controlador PI durante la activación de las cargas. La discusión de los resultados de las Figs. 4 y 5 se presenta a continuación.

La Fig. 4 (a) muestra que los voltajes de la RE se mantienen estables durante todos los intervalos (Int. 1 = sin carga, Int. 2 = cargas no lineales, Int. 3 = cargas no lineales e inductivas, Int. 4 = cargas no lineales, inductivas y desbalanceadas, Int. 5 = activación de FAP). Esto se debe principalmente a que la RE se comporta como un bus de potencia infinito ( $I_{cc} = 400$  MA). Durante el intervalo 1, las corrientes  $i_{red}$  mostradas en la Fig. 4 (b) son sinusoidales y provienen del sistema FV, lo que resultó en un FP unitario y negativo, como se indica en la Fig. 4 (c).

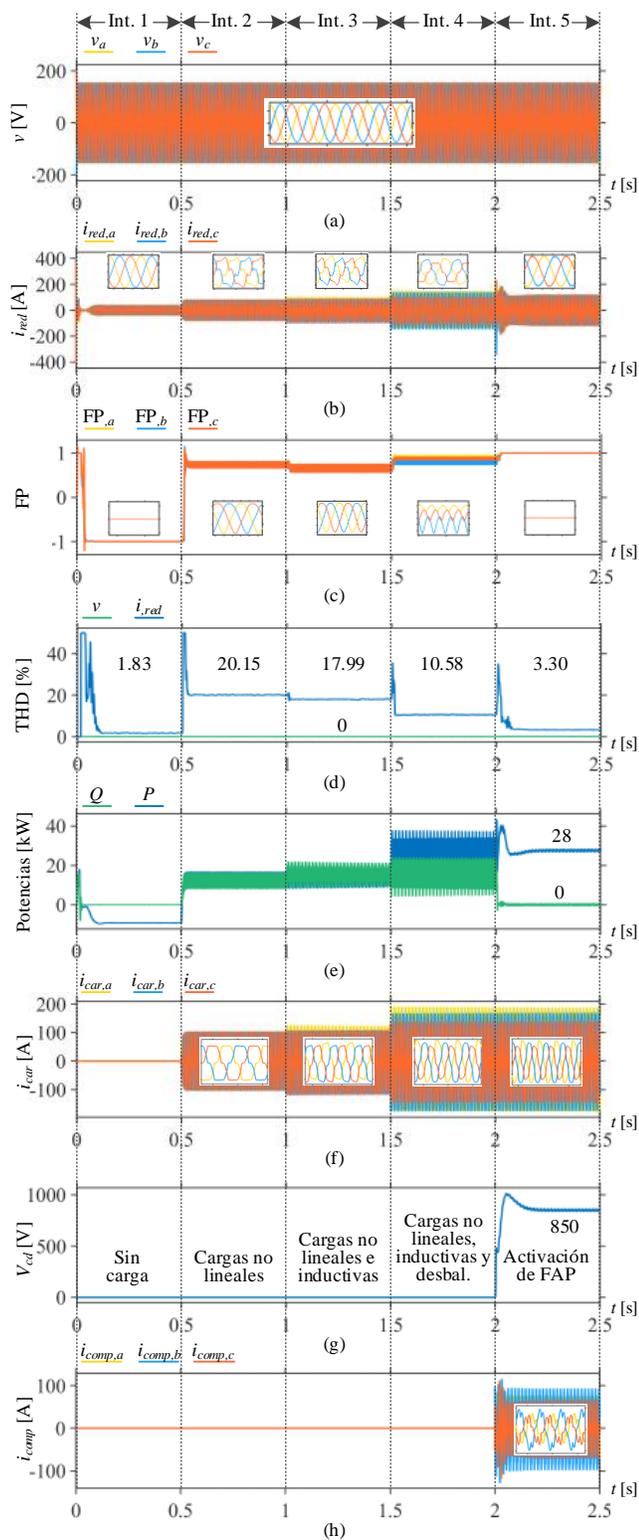


Fig. 4. Desempeño del controlador PI de FAP en la red eléctrica después de activar las cargas: (a) voltajes, (b) corrientes, (c) el FP, (d) THD de voltaje y corriente, (e) potencia activa y reactiva, (f) corrientes de carga, (g) voltaje del bus de CD y (h) corrientes de compensación.

Un FP unitario implica un bajo THD de voltaje (0%) y corriente (1.83%), como se observa en Fig. 4 (d), así como una nula potencia reactiva y una potencia activa de 10 kW, ver Fig. 4 (e), debido a que el sistema FV inyecta su potencia a la red eléctrica. Las corrientes de carga  $i_{car}$  son nulas debido a la ausencia de cargas en el primer intervalo, como se muestra en Fig. 4 (f). El voltaje  $V_{cd}$ , así como las corrientes  $i_{comp}$ , son cero debido a que el FAP está desactivado durante este intervalo, ver Figs. 4 (g) y (h), respectivamente. Del intervalo 2 al 4 se activan diferentes tipos de cargas, como se indica en Fig. 4 (g). Durante estos intervalos, las corrientes de carga  $i_{car}$ , indicadas en la Fig. 4 (f), al interactuar con las corrientes del sistema FV, afectan negativamente a las corrientes  $i_{red}$ , como se muestra en la Fig. 4 (b). Esto resulta en valores de FP por debajo de 1, como se indica en Fig. 4 (c), y cambios en el THD de corriente del 20.15% al 10.58%, como se muestra en Fig. 4 (d). Además, de un impacto negativo en el intercambio de potencia reactiva y activa en la RE como se indica en la Fig. 4 (e). Durante estos intervalos, el voltaje  $V_{cd}$  y las corrientes  $i_{comp}$  son cero debido a que el FAP está desactivado, como se muestra en las Figs. 4 (g) y (h), respectivamente. Finalmente, en el intervalo 5, el controlador PI de FAP se activa. Como resultado, las corrientes  $i_{red}$  son sinusoidales, el FP es unitario, el THD de corriente se mantiene por debajo del 4%, la potencia reactiva es nula y la potencia activa de 28 kW para cubrir la demanda. Además, el voltaje  $V_{dc}$  se mantiene en  $V_{ref,cd}$  y FAP inyecta las corrientes de compensación  $i_{comp}$  para mitigar los armónicos de corriente causados por las cargas, como se indica en Figs. 4 (b), (c), (d), (e), (g) y (h), respectivamente.

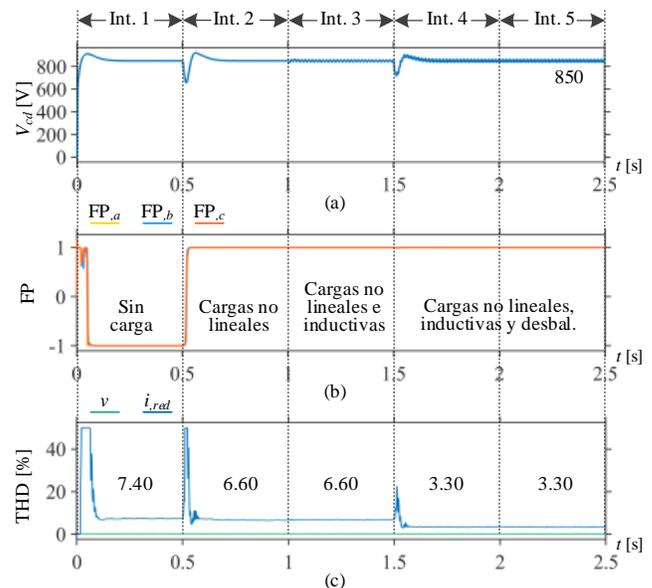


Fig. 5. Desempeño del controlador PI de FAP en la RE durante la activación de las cargas: (a) voltaje del bus de CD, (b) el FP (c) THD de voltaje y corriente.

Note en la Fig. 4 (f) que las corrientes de las cargas no lineales, inductivas y desbalanceadas no son sinusoidales, ya que el FAP solo compensa los armónicos de la red la red eléctrica.

En la Fig. 5 (a), se puede apreciar que, a pesar de la activación de las cargas no lineales que ocurre de los intervalos 2 al 4, el controlador PI de FAP mantiene el voltaje del bus de CD alrededor de  $V_{ref,cd}$  durante los estados estacionarios, mientras que en las transiciones de los intervalos, el voltaje fluctúa y se estabiliza de acuerdo a los parámetros de diseño de  $MP$  y  $t_a$  establecidos. Esto conduce inherentemente a un FP de potencia unitario y THD de corriente aceptable durante los estados transitorios y estacionarios, como se muestra en las Figs. 5 (b) y (c), respectivamente.

De acuerdo con los resultados anteriores y la metodología presentada, se contribuye a una mejor comprensión del diseño de controlador PI de FAP, así como de reducir efectivamente los armónicos de corriente por debajo del 4% en la RE a pesar de la presencia de cargas no lineales, inductivas y desbalanceadas. Además, de garantizar un FP de potencia unitario.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una metodología pormenorizada para contribuir a una mejor comprensión del diseño del controlador PI de FAP. Además, esta metodología permitió controlar el voltaje del bus de CD alrededor del valor deseado de 850 V, alcanzar corrientes sinusoidales en la RE y mantener un intercambio potencias reactiva y activa aceptables durante eventos transitorios y estacionarios causados por las cargas no lineales, inductivas y desbalanceadas. Como resultado, se logró una reducción efectiva de armónicos por debajo del 4% y se garantizó un factor de potencia unitario en la red eléctrica.

La metodología presentada puede extenderse o adaptarse a otras configuraciones de redes eléctricas con otros tipos de fuentes renovables como los sistemas eólicos. Esta extensión o adaptación heredaría las mismas aportaciones presentadas en este trabajo: mejor comprensión del diseño del controlador PI, mitigación efectiva de armónicos y garantizar un FP unitario.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] S.M. Ahsan, H.A. Khan, A. Hussain, S. Tariq and N.A. Zaffar, "Harmonic analysis of grid-connected solar PV systems with nonlinear household loads in low-voltage distribution networks," *Sustainability*, 13(7), 2021, 3709.
- [2] A.S. Abu Hasim, Z. Ibrahim, M.H. Nizam Talib, S.N. Mat Isa, J. Mat Lazi and Mohd. Yakop, "Photovoltaic system connected to three phase grid connected system incorporating with active power filter," *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, 6(7), 2012, 345-353.
- [3] A. Umadevi, L. Lakshminarasimman and A. Sakthivel, "Optimal design of shunt active power filter for mitigation of interharmonics in grid tied photovoltaic system," *Electr. Power Syst. Res.*, 220, 2023, 109232.
- [4] P. S. Sanjan, N. G. Yamini and N. Gowtham, "Performance comparison of single-phase SAPF using PQ theory and SRF theory," *2020 Int. Conference for Emerging Technology (INCET)*, Belgaum, India, 2020, 1-6.
- [5] A. H. Ukande, S. L. Tiwari, S. G. Kadwane and A. Kadu, "Generalise PQ theory with SPWM for single phase shunt active filter applications," *Communication and Information Technology Conference (PCITC)*, Bhubaneswar, India, 2015, 89-94.
- [6] H. F. Hashim, R. Omar and M. Rasheed, "Design and analysis of a three-phase series active power filter (SAPF) based on hysteresis controller," *4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016, 1-5.
- [7] S. A. Boulanouar, A. Benaissa, A. Kouzou and A. Teta, "Power quality enhancement of PMSG wind turbine system connected to SAPF," *2023 1st International Conference on Renewable Solutions for Ecosystems: Towards a Sustainable Energy Transition (ICRSEtoSET)*, Djelfa, Algeria, 2023, 1-5.
- [8] B. UdayaSri, P. A. M. Rao, D. K. Mohanta and M. P. C. Varma, "Improvement of power quality using PQ-theory shunt-active power filter," *2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs)*, Paralakhemundi, India, 2016, 2083-2088.
- [9] W. U. K. Tareen and S. Mekhief, "Three-phase transformerless Shunt active power filter with reduced switch count for harmonic compensation in grid-connected applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(6), 2018, 4868-4881.
- [10] N. Chaudhary, A. Ranjan, D. V. Bhaskar, M. Panda, A. Kumar and P. Kumar, "Harmonic reduction strategies for EV charging in power systems using shunt active power filter," *2023 3rd International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET)*, Patna, India, 2023, 1-6.
- [11] M. Hinduja, M. K. Rathi, S. T. Jaya Christa and N. R. Prabha, "PI control of multi level inverter based shunt active power filter for harmonic mitigation in three phase systems," *2015 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, Nagercoil, India, 2015, 1-8.
- [12] C.K. Najika, T. Krishnakumari and George Sijo, "Shunt active power filter based on SRF theory and hysteresis band current controller under different load conditions," *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, 2, 2017, 20-26.
- [13] A. V. Barva and Arkdev, "Analysis of SAPF based on p-q and SRF theory for different supply and load conditions," *2023 International Conference on Power, Instrumentation, Energy and Control (PIECON)*, Aligarh, India, 2023, 1-6.
- [14] R. Kumar, H. O. Bansal, A. R. Gautam, O. P. Mahela and B. Khan, "Experimental investigations on particle swarm optimization based control algorithm for shunt active power filter to enhance electric power quality," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54878-54890, 2022.