

## CONTROL PI DIFUSO PARALELO PARA CORREGIR LA RESPUESTA DE UN CONTROL PI CLÁSICO DE CORRIENTE DE LÍNEA EN UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO

ALBERTO BERZOY<sup>1</sup>, MIGUEL STREFEZZA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Simon Bolívar, Depto. de Electrónica y Circuitos, e-mail: aberzoy@usb.ve

<sup>2</sup> Universidad Simon Bolívar, Depto. de Procesos y Sistemas, e-mail: strefeza@usb.ve

Recibido: diciembre 2010

Recibido en forma final revisado: octubre 2012

### RESUMEN

Este trabajo presenta la simulación de un sistema de control de corriente difuso conectado en paralelo con un control de corriente PI clásico desintonizado. El objetivo del sistema es corregir la corriente de la línea de alimentación en un rectificador trifásico. El control PI difuso es un sistema de inferencia difusa Takagi-Sugeno (SID T-S) de orden cero que se conecta en paralelo con el control PI clásico para compensar su respuesta y lograr que la corriente de la línea se sincronice en fase con el voltaje de alimentación. Las simulaciones se llevaron a cabo en un procesador digital de señales (DSP) de Analog Devices 21061.

*Palabras clave:* Rectificador trifásico, Control difuso, Sistema de inferencia difusa Takagi-Sugeno, Factor de potencia, Control proporcional integral.

### SHUNT FUZZY PI CONTROL COMPENSATING A LINE CURRENT PI CONTROL RESPONSE IN A THREE PHASE RECTIFIER

#### ABSTRACT

This work presents the simulation of a fuzzy PI control connected in shunt topology with a line current mistuned PI control. The goal of the system is to correct the line current in a three phase rectifier. The fuzzy PI control is a zero-order Takagi-Sugeno Fuzzy Inference System (FIS T-S) connected in parallel with a classical mistuned PI control to compensate its response and achieve power factor correction. The simulations were carried out in an Analog Devices 21061 digital signal processor (DSP).

*Keywords:* Three phase rectifier, Fuzzy control, Takagi-Sugeno Fuzzy inference system, Power Factor, Proportional-Integral control.

### INTRODUCCIÓN

El rectificador trifásico ha sido un tópico de investigación de gran interés dentro los sistemas electrónicos de potencia y tal motivación ha sido causada por sus aplicaciones en las áreas de control de motores (Malinowski et al. 2001), sistemas de alimentación (Wu et al. 2008) y sistemas de control de potencia reactiva (Moran et al. 1995; Restrepo et al. 2010). Se han desarrollado variadas y complejas técnicas para el rectificador trifásico en cada una de estas áreas con propósitos específicos (Bouafia et al. 2009; Rahmani et al. 2010; Valouch, 1997). Sin embargo, en el mundo comercial se mantiene el uso de sistemas de control PI clásicos sobre la corriente de línea en rectificadores trifásicos para evitar que el sistema de distribución de energía se contamine con la distorsión armónica del mismo.

La mayoría de las empresas que usan rectificadores trifásicos como sistemas de alimentación, por lo general no tienen ningún conocimiento sobre el sistema de control. Cuando su proveedor de servicios falla temporal o permanentemente, el cliente (empresa) depende de la confiabilidad del sistema de alimentación y del sistema de control comprado originalmente (control PI). Por lo general, estos sistemas de alimentación están embebidos junto a su sistema de control y si falla el control (se desintoniza), la única solución para el cliente es cambiar completamente el sistema de alimentación. Una falla común en los sistemas de control PI es que alguna variable del sistema cambie o se modifique y por lo tanto el sistema de control PI se desintonice.

Lo novedoso en este artículo es la manera cómo atacar este problema de una forma sencilla, económicamente rentable y confiable. Básicamente se plantea agregar un sistema de control que puede estar embebido en un microcontrolador y un par de sensores de tensión y de corriente. Adicionalmente se usa un control PI difuso, el cual es mucho más robusto que un PI clásico. La desventaja de la solución planteada es el acceso físico a las señales de la PWM para poder agregar las señales del control difuso.

Asumiendo que se tiene acceso a cualquier parte del sistema de control y reutilizando los elementos del sistema de control existente (sensores, PWM, entre otros), el tema de interés de este trabajo consiste en obtener un sistema de control sencillo y más robusto que un control PI. Adicionalmente se desea que el control en cuestión sea conectado al rectificador trifásico, sin necesidad de desconectar el control PI desintonizado, permitiendo al nuevo control operar como en un sistema que compensa el contenido armónico que no ha podido eliminar el control PI clásico.

Se realiza la simulación de un rectificador trifásico con un control PI de corriente desintonizado junto con un control PI difuso conectado en paralelo para corregir la respuesta del control PI clásico. El sistema de control difuso es un sistema de inferencia difusa Takagi-Sugeno (SID T-S) de orden cero que opera con una matriz de reglas definidas. Se llevaron a cabo simulaciones, tanto con el control PI clásico como con ambos controladores conectados en paralelo, utilizando un procesador digital de señales ADSP de Analog Devises 21061 para estudiar y evaluar el rendimiento del control PI difuso.

El artículo está organizado en 6 partes: en la sección 2 se muestra la descripción del sistema, la sección 3 presenta las estrategias de control, la sección 4 muestra el procedimiento experimental, en la sección 5 se muestran los resultados de las simulaciones y en la sección 6 se exponen las conclusiones.

## RECTIFICADOR TRIFÁSICO

El rectificador trifásico operando como fuente de voltaje se observa en la Figura 1 y está compuesto por tres estructuras bien definidas: un filtro que consiste en un inductor en serie con la fuente de CA, un puente de IGBTs trifásico y un bus de CC con su condensador asociado.

Para desarrollar el modelo matemático del rectificador de la Figura 1, se asume que cada fase del rectificador puede ser representada como se muestra en la Figura 2.

De la Figura 2 se deduce la ecuación que modela el circuito para su simulación:

$$\overline{\nu}_e = R_e \overline{i}_e + L_e \frac{d\overline{i}_e}{dt} + \overline{\nu}_{rect} \quad (1)$$

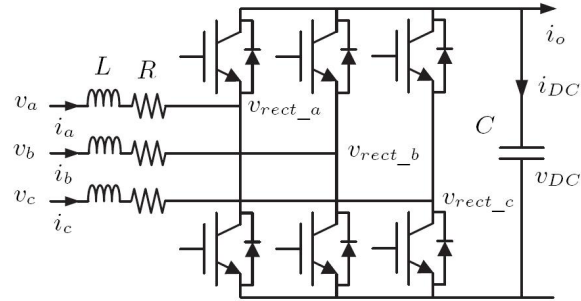


Figura 1. Rectificador Trifásico

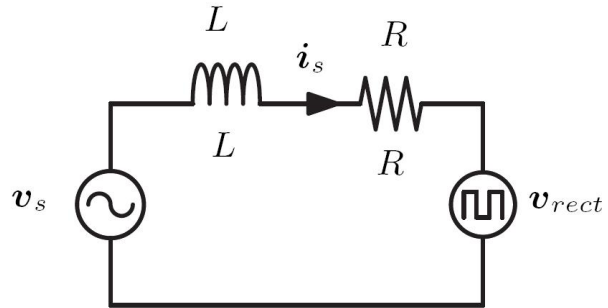


Figura 2. Representación del rectificador en su modelo unifilar

El modelo en coordenadas “abc” del puente rectificador se observa en (2) y (3) [1]:

$$\begin{bmatrix} \nu_a \\ \nu_b \\ \nu_c \end{bmatrix} = R_e \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_e \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nu_{rect\_a} \\ \nu_{rect\_b} \\ \nu_{rect\_c} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ecuación de carga del condensador es:

$$C \frac{dv_{cc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_o \quad (3)$$

donde:  $S_a$ ,  $S_b$  y  $S_c$  pueden adquirir el valor uno o cero. Estas variables representan la conectividad de los interruptores en el puente rectificador controlado.

Aplicando la Transformada de Clarke al sistema rectificador trifásico, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales como modelo para su simulación:

$$\begin{bmatrix} \nu_{ex} \\ \nu_{ey} \end{bmatrix} = R_e \begin{bmatrix} i_{ex} \\ i_{ey} \end{bmatrix} + L_e \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ex} \\ i_{ey} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nu_{rect\_ex} \\ \nu_{rect\_ey} \end{bmatrix} \quad (4)$$

La ecuación del capacitor en coordenadas “xy” es:

$$C \frac{d\nu_{cc}}{dt} = (S_x i_{ex} - S_y i_{ey}) - i_o \quad (5)$$

donde:

$$\begin{aligned} S_x &= \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c) \\ S_y &= \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c) \end{aligned} \quad (6)$$

## CONTROL PI DIFUSO

El sistema de inferencia difusa (SID), es un sistema de cómputo basado en la teoría de conjunto difusos, reglas si-entonces difusas y razonamiento difuso (Jang et al. 1997). El SID consta de tres partes básicas. La primera consiste de la etapa de fusificación. En esta etapa se asignan las funciones de pertenencia a los distintos universos de discurso, para cada una de las variables lingüísticas, que en este caso son el error y la derivada del error de corriente de línea. Comúnmente se definen funciones de pertenencia triangulares. La segunda etapa, “reglas básicas”, contiene una colección de reglas difusas de la forma si-entonces, que relacionan las variables de entrada con las de salida. Las reglas se desarrollan basándose en la experiencia humana o generadas numéricamente, empleando datos entrada/salida del sistema deseado. En el caso particular del PI difuso las reglas se definen por la matriz MacVicar-Whelan (Visioli, 1999) como se observa en la Tabla 1:

**Tabla 1.** Reglas base para el sistema difuso

| $e/\Delta e$ | NG | NP | Z  | PP | PG |
|--------------|----|----|----|----|----|
| NG           | Ng | Nm | Nm | Nm | Zz |
| NP           | Nm | Nm | Nm | Zz | Pm |
| Z            | Nm | Nm | Zz | Pm | Pm |
| PP           | Nm | Zz | Pm | Pm | Pm |
| PG           | Zz | Pm | Pm | Pm | Pg |

La salida del SID procede de los conjuntos difusos y es necesario un método de defusificación, que tome un valor representativo del conjunto difuso (Jang, 1997; Mann et al. 1999). En el caso particular de este trabajo utiliza un sistema de inferencia Takagi-Sugeno de orden cero en el cual las reglas son constantes.

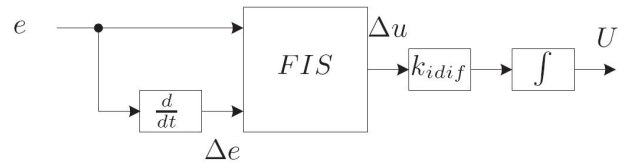
En la Tabla 1 se ha definido 5 funciones de pertenencia para cada entrada difusa. Donde las funciones de pertenencia se denominan: NG (negativo grande), NP (negativo pequeño), Z (cero), PP (positivo pequeño) y PG (positivo grande). Por otro lado, los valores de las reglas se definen por: Ng (negativo grande), Nm (negativo mediano), Zz (cero), Pm (positivo mediano) y Pg (positivo grande).

## DEFINICIÓN DE LA TÉCNICA CONTROL PI DIFUSO

Para la aplicación del control de corriente PI y PI difuso al rectificador síncrono trifásico, la corriente de línea inicialmente expresada en coordenadas “abc” es transformada a coordenadas “dq” (Park, 1929). Las componentes de corriente  $i_d$  e  $i_q$  tienen valores constantes en estado estacionario, ya que el sistema de referencia está rotando en sincronía con  $\omega t$ .

En la Figura 3 se observa el diagrama de bloque del control PI difuso a usar en el cual las entradas son el error y la derivada del error de corriente. En el bloque SID se definen las reglas usadas con los siguientes valores: Ng=-10.0, Nm=-1.0, Zz=0.0, Pm=1.0 y Pg=10.0. Adicionalmente la salida del sistema de control es integrada por medio de (7) y escalada por  $K_{idif}$ :

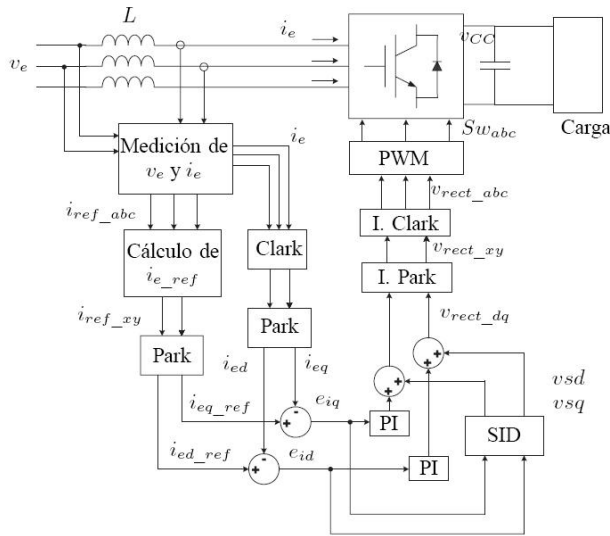
$$u(t+1) = (u(t) + \Delta u(t)) \cdot k_{idif} \quad (7)$$



**Figura 3.** Diagrama de bloque del control PI difuso

## DIAGRAMA DE BLOQUE DEL SISTEMA

La Figura 4 muestra el diagrama de bloque completo del sistema rectificador trifásico con control PI y control PI difuso en paralelo. El bloque SID es el sistema PI difuso que se muestra en la Figura 3.



**Figura 4.** Diagrama de bloque completo del sistema

## RESULTADOS SIMULADOS

Se realiza la simulación del sistema con los parámetros dados en la Tabla 2, el valor de la inductancia fue diseñado para máxima transferencia de potencia entre la red de alimentación y el rectificador. El valor de la capacitancia se escoge entre 2000 y 5000  $\mu F$  para evitar rizado elevado en el bus CC. El criterio para decidir el voltaje de la barra CC es: VCC igual a 2 veces la tensión de la barra CC cuando el rectificador no está controlado.

Se impone una amplitud para la referencia de corriente de  $K_{iref} = 15$  A con un cambio en  $t=0.1$ s a  $K_{iref} = 30$  A. Se realiza un cambio de referencia del 100% para forzar al sistema de control y observar su dinámica.

**Tabla 2.** Parámetros usados en la simulación

| Componentes | Valores      |
|-------------|--------------|
| $V_s$       | 100V         |
| $R_L$       | 100 $\Omega$ |
| $C$         | 4700 $\mu F$ |
| $L$         | 11.5mH       |

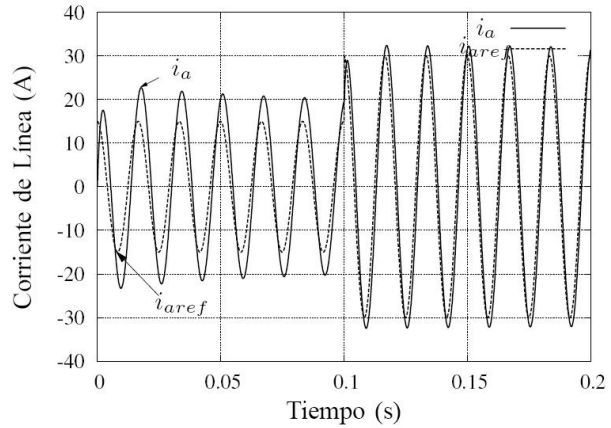
Por lo tanto:

$$\begin{aligned}
 i_{aref}(t) &= K_{iref} \sin(\omega t) \\
 i_{bref}(t) &= K_{iref} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 i_{cref}(t) &= K_{iref} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)
 \end{aligned} \quad (8)$$

Luego se calcula  $i_{ex}$  e  $i_{ey}$  por medio de la transformada de Clark y finalmente se calcula  $i_d$  e  $i_q$  por medio de la

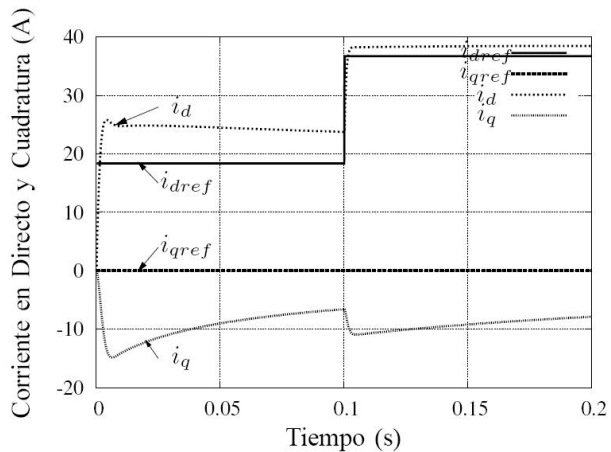
transforma de Park. Los valores de corriente en DQ en estado estacionario son  $i_d=18$ A e  $i_q=0$ A para  $K_{iref} = 15$  A. Para  $K_{iref} = 30$  A se tiene que  $i_d=37$ A e  $i_q=0$ A.

Se observa en la Figura 5 la corriente de línea y la corriente de referencia del sistema con un PI clásico desintonizado.



**Figura 5.** Corriente de línea y su referencia para el sistema de control PI desintonizado

Adicionalmente, se puede observar en la Figura 5 que la corriente referencia presenta un cambio y se demuestra que el sistema es incapaz de seguir la referencia. La respuesta está desfasada y también presenta un error en estado estacionario en la amplitud. Se puede observar las corrientes en directo y cuadratura de este mismo control en la Figura 6.

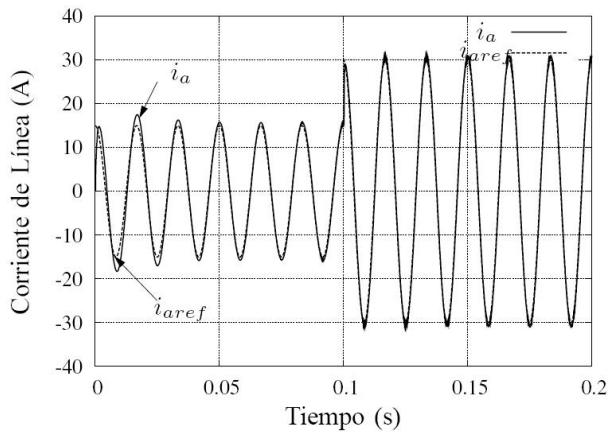


**Figura 6.** Componente en directo y cuadratura de la corriente de línea y su referencia para el control PI desintonizado

En la Figura 6 también se puede observar que la corriente  $i_d$  no sigue a la referencia presentando un error de estado estacionario de casi 5A y un sobrepico que sobrepasa los

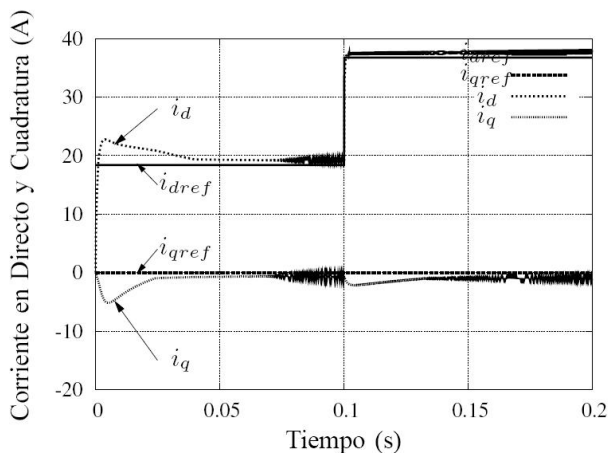
5A. Por otro lado, se observa que corriente  $i_q$  no sigue tampoco la referencia por lo tanto la corriente de línea en coordenadas “abc” no van a estar en fase. Se observa un sobrepico de aproximadamente 15A y un error de estado estacionario de más de 6A.

A continuación se muestran los resultados del sistema controlado con un PI difuso en paralelo con el PI clásico. En la Figura 7 se muestran la corriente de línea y la corriente de referencia.



**Figura 7.** Corriente de línea y su referencia para el PI difuso en paralelo con el PI clásico

En la Figura 8 se observan las variables controladas  $i_d$  e  $i_q$  que son las componente directa y cuadratura. También se muestran las referencias de ambas corrientes.



**Figura 8.** Componente en directo y cuadratura de la corriente de línea y su referencia para el control PI desintonizado

Se puede observar que la corriente sigue la referencia fielmente, sólo se tiene un pequeño sobrepico menor a 4A en la componente directa. También presenta un pequeño error en estado estacionario de 1A lo cual no es muy relevante ya que cuando se transforma la corriente en DQ en coordenadas “abc” el error en estado estacionario es menor. El tiempo de establecimiento es menor a 0.05s.

Con respecto a la componente en cuadratura, ésta sigue la referencia, con un pequeño error en estado estacionario menor a 1A y un sobrepico negativo menor que 5A. Observe también que en el cambio de referencia se nota un pequeño sobrepico menor a 3A.

## CONCLUSIONES

Se realizó la simulación del sistema rectificador trifásico con un control de corriente PI difuso en paralelo para corregir un control PI desintonizado debido a que éste se encuentra embebido con el sistema rectificador y no se puede ajustar. Se demostró que se pueden controlar las corrientes haciendo una transformación “dq” y controlando las componentes en directo y cuadratura como componentes independientes. Esto se logra debido a que son componentes ortogonales y la variación de la corriente en directo afecta suavemente a la corriente en cuadratura. Se realizó el cambio de referencia de la magnitud de la corriente  $K_{iref}$  del 100% y se observó que la corriente en directo siguió la referencia perfectamente y la corriente en cuadratura presentó un sobrepico negativo menor a 3 A, lo que demuestra que las componentes aunque son ortogonales no son completamente independientes.

Se demostró que colocando un control en paralelo con otro sistema de control existente se puede corregir la respuesta de la planta (sistema con PI clásico), en este caso en particular un rectificador trifásico. Se observó una mejora significativa de las variables controladas  $i_d$  e  $i_q$ , y se notó una mejora en el sobrepico y en el error de estado estacionario.

Se logró resolver el problema de compensar el contenido armónico en la corriente de línea (el cual el control PI clásico desintonizado no lograba corregir) mediante la conexión en paralelo de un controlador que usa inteligencia artificial (control difuso). Este último es más robusto porque no depende de los parámetros del sistema, solo de reglas lingüísticas.

Por último, se demostró que el sistema de control compensó el factor de desplazamiento a uno, ya que la corriente línea se logró mantener en fase con la tensión del sistema de alimentación. Adicionalmente se realizó el cambio de referencia de la corriente de línea demostrando la buena dinámica del control difuso.

## REFERENCIAS

- BOUAFIA, A., KRIM, F., GAUBERT, J-P. (2009). Fuzzy-Logic-Based Switching State Selection for Direct Power Control of Three-Phase PWM Rectifier. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 56 , pp. 1984-1992.
- JANG, J. S., SUN, C. T., MIZUTANI, E. (1997). Neuro-Fuzzy and Soft Computing. Prentice Hall, Toronto Canada. 81-84.
- MANN, G. K., HU, B. G., GOSINE, R. G. (1999). Analysis and Direct Action Fuzzy PID Controller Structures. IEEE Trans. on Systems, man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, vol 29, No. 3, pp. 371-387.
- MALINOWSKI, M., KAZMIERKOWSKI, M.P., HANSEN, S., BLAABJERG, F., MARQUES, G. D. (2001). Virtual flux-based direct power control of three-phase PWM rectifiers, IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 37, No. 4, pp. 1019-1027.
- MORÁN, L. A., DIXON, J. W., WALLACE, R. (1995). A Three-Phase Active power Filter Operating with Fixed Switching Frequency for Reactive Power and Current Harmonic Compensation. IEEE Trans. in Ind. Electronics, Vol. 42, No. 4, pp. 402-408.
- PARK, R. H. (1929). Two-reaction theory of synchronous machines. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 48, p. 716.
- RAHMANI, S., MENDELEK, N. K., AL-HADDAD. (2010). Experimental Design of a Nonlinear Control Technique for Three-Phase Shunt Active Power Filter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.57, No.10, pp. 3364-3375.
- RESTREPO, J., BUENO, A., ALLER, J. M., HABETLER, T. (2010). Harmonic and Balance Compensation using Instantaneous Active and Reactive Power Control on Electric Railway Systems. 25th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition, APEC 2010. Palm Springs, Estados Unidos de América.
- VALOUCH, V. (1997). Fuzzy power control in PWM voltage-type rectifier. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol.3, pp.1162-1167.
- VISIOLI, A. (1999) Fuzzy Logic Based Set-Point Weight Tuning of PID Controllers. IEEE Trans. on Systems, man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, vol. 29, No 6. pp. 587-592.
- WU, X. H., PANDA, S. K., XU, J. X. (2008). DC Link Voltage and Supply-Side Current Harmonics Minimization of Three Phase PWM Boost Rectifiers Using Frequency Domain Based Repetitive Current Controllers. IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 23, No. 4, pp. 1987-1997.