

## MODELADO DE UN RECTIFICADOR DE FRENTE ACTIVO

Héctor Bonilla Barranco, Gerardo Mino Aguilar, Edgar Peralta Sánchez, Ricardo Álvarez González, Selene Edith Maya Rueda.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
Laboratorio Avanzado de Electrónica de Potencia, Tracción Eléctrica y Modelado.  
Av. Sn. Claudio y 18 sur, Col. Jardines de Sn. Manuel, Puebla, Pue. C.P. 72590.  
+52 (222) 2295500 ext. 7405  
gmino44@ieee.org

### RESUMEN.

La conversión de energía CA/CD es un proceso común en las aplicaciones industriales. Hoy en día la utilización de rectificadores de frente activo (AFE) o rectificadores PWM ha ido ganando terreno al rectificador a diodos, debido a que permite un manejo bidireccional del flujo de potencia, corrientes de entrada casi sinusoidales con bajo contenido armónico y control del factor de potencia. Debido a esto, en este trabajo se presenta un modelo dinámico del convertidor de frente activo en el sistema de referencia síncrono, bajo condiciones de tensiones equilibradas. El valor deseado de la tensión de salida se consigue mediante la modulación de ancho de pulso (PWM) con la frecuencia de portadora en kHz.

**Palabras Clave:** Rectificadores de frente activo, SPWM, PLECS

### ABSTRACT.

AC / DC energy conversion is a common process in industrial applications. Today the use of active front rectifier (AFE) or PWM rectifier has been gaining popularity because it allows a bidirectional power flow driving, nearly sinusoidal input currents with low harmonic content and power factor control. This work presents a dynamic model of an active front converter in the synchronous reference system under conditions of balanced voltages. The desired value of output voltage is accomplished by pulse width modulation (PWM) with the carrier frequency in kHz.

**Keywords:** Active Front End Rectifier, SPWM, PLECS.

### 1. INTRODUCCIÓN

En la industria es muy común encontrarse convertidores CA-CD para la alimentación de un gran número de equipos. Estos convertidores se caracterizan por generar corrientes con distorsión armónica elevada, la cual es inyectada al sistema de potencia, degradando la calidad del servicio. En las últimas décadas, el crecimiento de este tipo de cargas ha impulsado la aplicación de normas y regulaciones sobre la distorsión armónica permisible en los sistemas de potencia. En los últimos años, los rectificadores con control por ancho de pulso (PWM), han sido introducidos con la finalidad de realizar los procesos de conversión de energía CA-CD [5]. Estos rectificadores no solo permiten reducir la inyección de armónicos al sistema, sino también, el control del factor de

potencia en el lado de la alimentación del rectificador [1, 2, 3]. El esquema de control de los rectificadores de frente activo permite adicionalmente, regular la magnitud de la tensión en la barra de corriente continua. En la Figura 1, se presenta el esquema de un rectificador de frente activo [6].

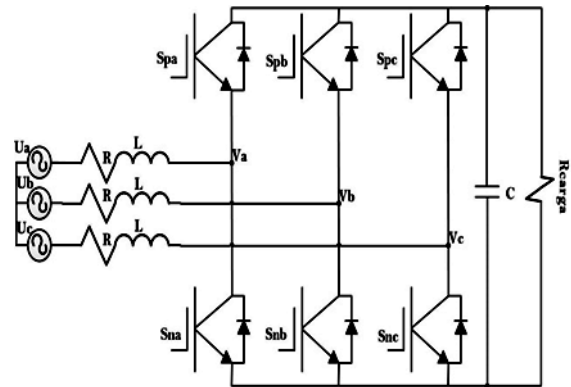


Figura 1. Esquema del rectificador PWM.

En este artículo se presenta el modelado de un rectificador de frente activo, posteriormente se presentan resultados de simulación en donde se confirma el correcto funcionamiento del sistema implementado, por último, en las conclusiones se detallan los alcances o limitaciones encontrados durante el trabajo.

### 2. MODELO DEL RECTIFICADOR

En esta parte se aborda el modelado del convertidor a partir de las ecuaciones matemáticas que lo rigen. Una vez obtenidas las ecuaciones correctas que describen el circuito se construye un modelo en el simulador.

#### 2.1. Ecuaciones del convertidor en el marco abc

Para comenzar el modelado, primero se obtienen las ecuaciones referenciadas al marco abc partiendo del circuito de la Figura 1. Todos los elementos del circuito de la Figura 1 se pueden modelar sin ningún tipo de problema salvo los transistores

IGBT's, para el modelado éstos serán sustituidos por interruptores como indica la Figura 2 [6].

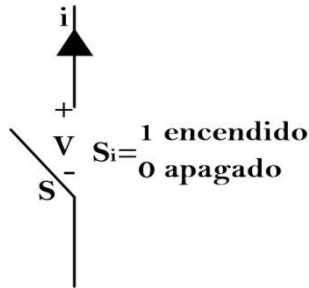


Figura 2. Posiciones posibles para los IGBT's.

El modelo consta de una fuente trifásica  $V_a, V_b, V_c$ , una inductancia y resistencia trifásicas en serie (RL) a la entrada del rectificador. El convertidor propiamente dicho, a su vez, consta de un puente de transistores IGBT's. A la salida, se utiliza un condensador (C) en paralelo para disminuir el rizado del voltaje directo en la salida y una resistencia (R) que hace las veces de carga.

Una vez modelados los transistores IGBT's se obtienen las ecuaciones del convertidor en ejes abc que se utilizarán en la construcción del modelo en el simulador. Para ello, se parte del circuito mostrado en la Figura 1.

Primero se describen las ecuaciones de voltaje y corriente de la línea trifásica de (1) a (6).

$$u_a = E_m \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$u_b = E_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2)$$

$$u_c = E_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3)$$

$$i_a = I_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

$$i_b = I_m \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5)$$

$$i_c = I_m \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (6)$$

$E_m, I_m$  son las amplitudes del voltaje y de las corrientes de línea, y  $\omega$  es la frecuencia angular.

## 2.2. Descripción del voltaje de entrada del rectificador.

Los voltajes de línea a línea del rectificador de frente activo se pueden describir con la ayuda de la Figura 3.

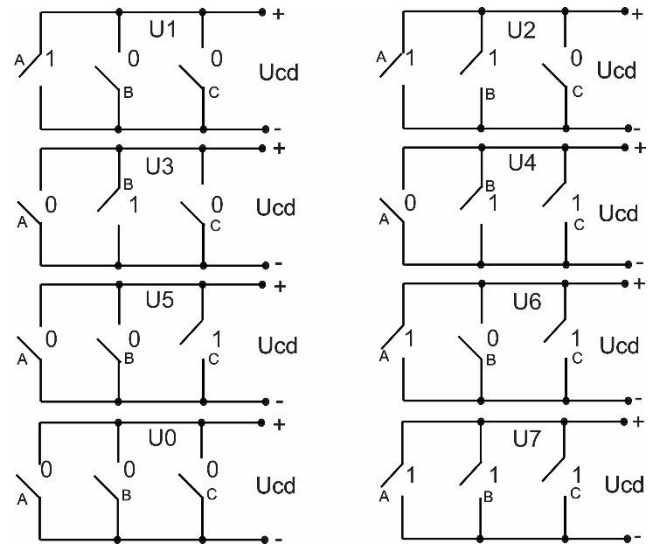


Figura 3. Estados de conmutación de un convertidor de frente activo.

La Figura 3, muestra que en cada rama deberá existir un interruptor cerrado y otro abierto. En otro caso, se cortocircuitaría la fuente de voltaje (ambos cerrados) o se abriría la fuente de corriente (ambos abiertos). Las ecuaciones (7) a (9), describen los voltajes entre fases:

$$u_{sab} = (S_a - S_b)u_{dc} \quad (7)$$

$$u_{sbc} = (S_b - S_c)u_{dc} \quad (8)$$

$$u_{sca} = (S_c - S_a)u_{dc} \quad (9)$$

los voltajes de cada fase son los siguientes de las ecuaciones (10) a (12):

$$u_{sa} = f_a(u_{dc}) \quad (10)$$

$$u_{sb} = f_b(u_{dc}) \quad (11)$$

$$u_{sc} = f_c(u_{dc}) \quad (12)$$

Donde las ecuaciones de conmutación se describen de la ecuación (13) a (15)

$$f_a = S_a - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) = \frac{2S_a - (S_b + S_c)}{3} \quad (13)$$

$$f_b = S_b - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) = \frac{2S_b - (S_a + S_c)}{3} \quad (14)$$

$$f_c = S_c - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) = \frac{2S_c - (S_a + S_b)}{3} \quad (15)$$

Las ecuaciones de voltaje para un sistema trifásico equilibrado sin una conexión neutral se pueden describir por cuatro ecuaciones, una para cada fase (voltaje) y uno para las corrientes (bus de CD).

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{load} \quad (17)$$

La combinación de las ecuaciones anteriores puede ser representada mediante un diagrama de bloques (ver Figura 4).

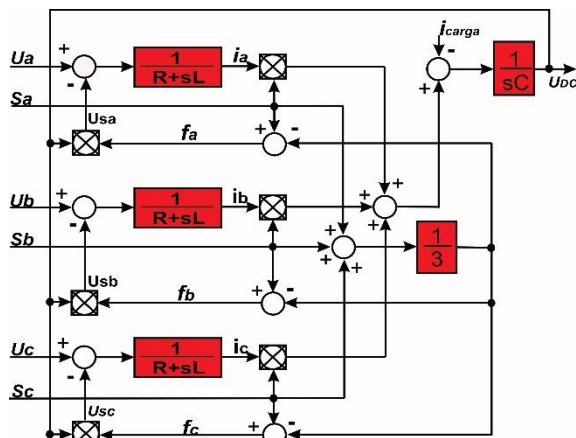


Figura 4. Diagrama de bloques del rectificador PWM.

### 2.3. PWM sinusoidal

La modulación sinusoidal se basa en una señal portadora triangular, la idea es comparar una onda triangular con los tres voltajes sinusoidales de referencia  $U_a^*$ ,  $U_b^*$  y  $U_c^*$ . Con la comparación, las señales lógicas  $S_a$ ,  $S_b$  y  $S_c$ , que definen instantes de conmutación del transistor de potencia son generadas [4]. La amplitud de la onda triangular debe ser  $V_{cc}/2$ . Pero  $V_{dc}$  no es constante en este caso. Entonces primero debe normalizarse al valor de referencia por  $V_{cc}/2$  y comparar este valor con una onda triangular con una amplitud de 1. La Figura 5 muestra el diagrama de bloques.

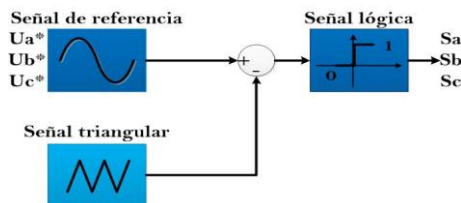


Figura 5. Comparación de la señal triangular y señal de referencial.

### 3. RESULTADOS.

Para comparar los resultados obtenidos del modelo matemático del rectificador de frente activo, primero se realiza una simulación del modelo eléctrico para posteriormente comparar estos resultados con el modelo matemático.

Se realiza la simulación de la técnica de modulación SPWM como se muestra en la Figura 6 y los resultados se pueden observar en la Figura 7.

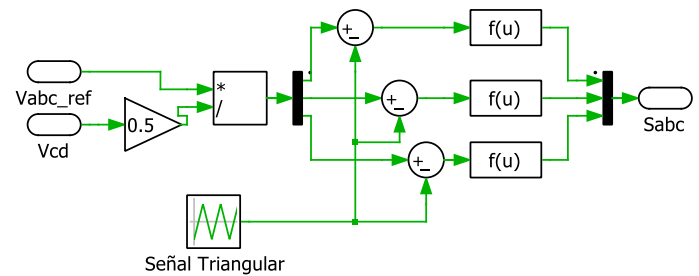


Figura 6. Simulación de la técnica de modulación SPWM.

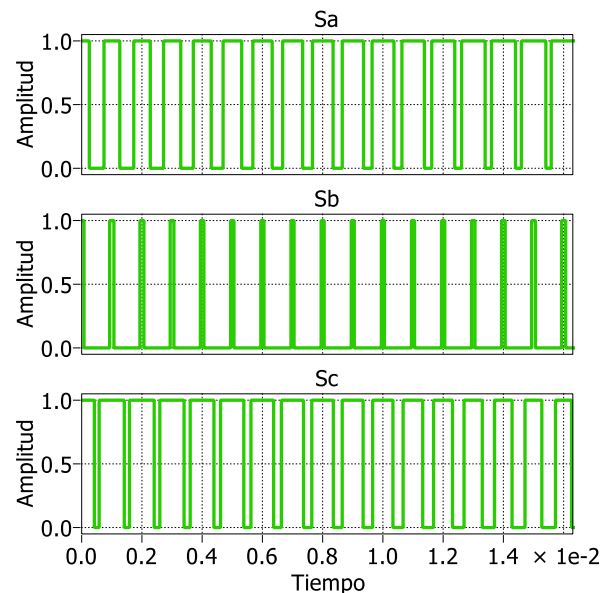


Figura 7. Señales lógicas  $S_a$ ,  $S_b$  y  $S_c$ .

Las señales lógicas generadas en la Figura 7 se utilizan para encender y apagar los transistores del rectificador. En la Figura 8 se presenta el diagrama eléctrico del rectificador de frente activo. Los valores que se utilizaron para las simulaciones del modelo matemático y eléctrico se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de los componentes utilizados en la simulación.

Componentes	Valor
Resistencia del lado CA	0.9 $\Omega$
Inductor	5 mH
Resistencia del lado CD	30 $\Omega$
Capacitor	1100 $\mu\text{F}$
Frecuencia de conmutación	10 KHz

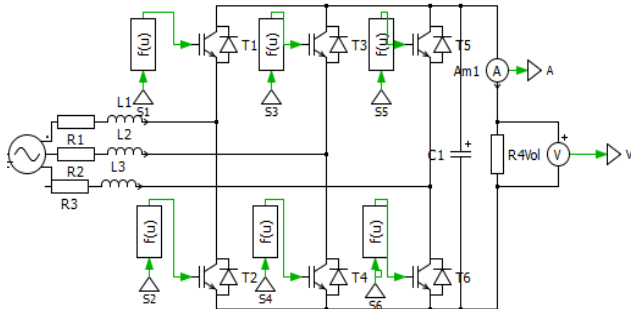


Figura 8. Simulación del diagrama eléctrico del rectificador.

La Figura 9 muestra los resultados que se obtuvieron en la simulación del modelo eléctrico del rectificador, esto sirve como base para poder comparar estos resultados con el modelo matemático.

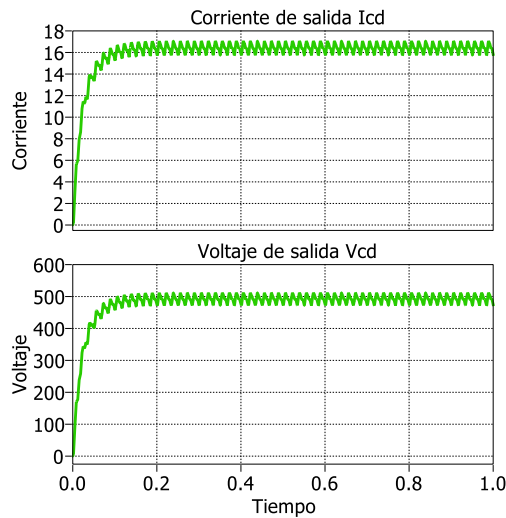


Figura 9. Voltaje y Corriente de salida del rectificador.

Para la simulación del modelo matemático del rectificador de frente activo se hace uso del diagrama de bloques que se obtuvo al hacer el análisis matemático del circuito de la Figura 1. El diagrama a bloques del modelo matemático simulado se puede observar en la Figura 10.

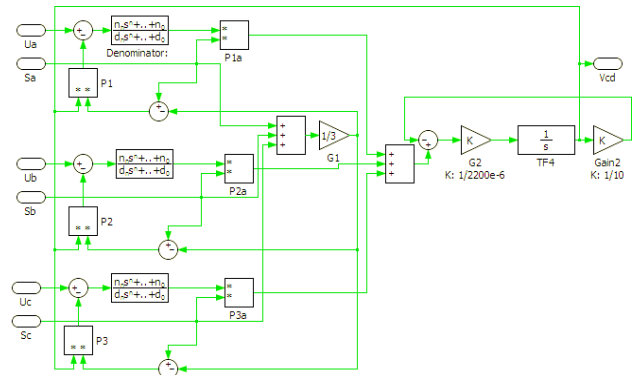


Figura 10. Modelo matemático del rectificador de frente activo.

Los valores que se utilizaron en la simulación del modelo matemático son los mismos que se utilizaron anteriormente en la Tabla 1. Los resultados en la simulación del modelo matemático del rectificador se muestran en la Figura 11.

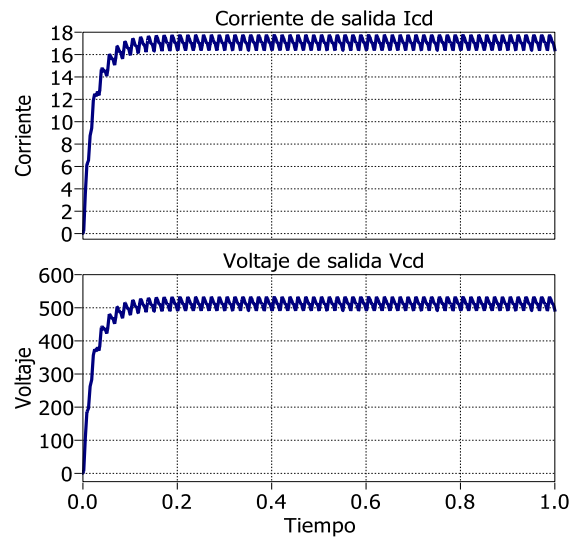


Figura 11. Voltaje y Corriente de salida del modelo del rectificador

Se realizó una comparación cuantitativa entre los resultados del modelo y el diagrama eléctrico del rectificador de frente activo, para realizar este análisis se utilizaron los valores de la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de los componentes utilizados en la comparación

Componentes	Valor
Resistencia del lado CA	0.9 $\Omega$
Inductor	5 mH
Resistencia del lado CD	10 $\Omega$
Capacitor	2200 $\mu$ F
Frecuencia de conmutación	10 KHz

Los voltajes de salida generados por el modelo y el diagrama eléctrico del rectificador se pueden ver en la Figura 12. El voltaje de color verde en la Figura 12 corresponde al modelo matemático del rectificador y el voltaje de color rojo corresponde al diagrama eléctrico del rectificador. La ondulación que se produce en el voltaje del diagrama eléctrico no se puede producir en el modelo matemático porque en el diseño del modelo se tomaron todos sus componentes como ideales.

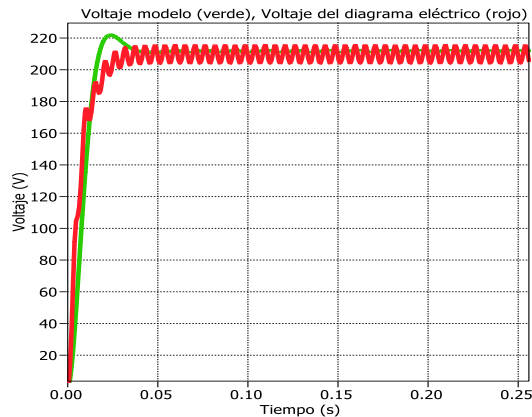


Figura 12. Comparación cuantitativa de los resultados del modelado y del diagrama eléctrico del rectificador.

#### 4. CONCLUSIONES.

La simulación del modelo matemático del rectificador de frente activo proporciona una comprensión amplia de su funcionamiento y permite apreciar la importancia de los elementos de potencia que lo conforman. Esto tiene especial importancia en las simulaciones que se realizan debido a que se hacen en un tiempo más corto.

Con estos resultados se puede tener otra opción para las simulaciones del rectificador utilizando el modelo matemático debido a que con este se puede tener mayor optimización a la hora de realizar las simulaciones sobre todo cuando se requieren simulaciones con un tiempo largo de procesamiento.

#### 5. REFERENCIAS.

- [1] A.D. le Roux, J. A. du Toit, J. H. Enslin, "Integrated Active Rectifier and Power Quality Compensator with Reduced Current Measurement", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.46, No. 3, June 1999.
- [2] B. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drivers", Prentice- Hall, Inc. 2002.
- [3] B. Singh, B. N. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, A. Pandey, and D. P. Kothari, "A review of three-phase improved power quality ac-dc converters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.51, no. 3, pp. 641-660, June 2004.
- [4] Muttalib, AZM Shahriar, "Design and simulation of an inverter with high frequency sinusoidal PWM switching technique for harmonic reduction in a standalone/utility grid synchronized photovoltaic system", Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), 2012 International Conference on. IEEE, 2012.
- [5] T. Paga, G. Pesse, J. Restrepo, J. M. Aller, "Active Filtering and Power Factor Correction Using A DSP controlled Rectifier Bridge", Eighth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, Conference Publication No. 475, IEEE 2000, pp. 382-385.
- [6] Yang Ye; Kazerani, M.; Quintana, V.H. "Modeling, control and implementation of three-phase PWM converters", Power Electronics, IEEE Transactions 2003, Volume: 18, Pages: 857-864.