

Análisis y Simulación de un Rectificador Trifásico Semicontrolado con SCRs para una Carga Resistiva

Erick Christopher Dávalos González

Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica

Universidad de Guadalajara

Guadalajara, Jalisco, México

erick.davalos2937@alumnos.udg.mx

Resumen—El análisis del rectificador se realiza mediante el método de estados asumidos para determinar las combinaciones válidas de encendido/apagado de los SCR y sus condiciones de polarización. Además, se estudia el impacto del ángulo de disparo en la forma de onda y contenido armónico del voltaje de salida, representándolo mediante su serie de Fourier. Los resultados teóricos se validan con simulaciones en PSIM, verificando el comportamiento del circuito y la relación entre el ángulo de disparo y los armónicos.

I. INTRODUCCIÓN

Los rectificadores controlados con SCR son dispositivos que permiten transformar la corriente alterna en corriente continua de forma controlada, regulando la potencia suministrada a la carga mediante el ajuste del ángulo de disparo de los SCRs.

El funcionamiento de estos rectificadores se basa en la conmutación de los tiristores (SCRs), que se activan y desactivan en momentos específicos del ciclo de la señal de entrada. Esta conmutación produce transiciones que generan componentes armónicas. La generación de armónicas es una consecuencia inherente a la técnica de control, por lo que resulta indispensable un análisis detallado para mitigar sus efectos.

Para analizar el circuito, se emplearán dos herramientas. La primera consiste en el método de estados asumidos, el cual permite determinar las combinaciones válidas de encendido y apagado de los SCR, estableciendo las condiciones de polarización directa e inversa y determinando los rangos de conducción en función del ángulo de disparo. La segunda herramienta es la representación en serie de Fourier, que facilita la descomposición del voltaje de salida en sus componentes fundamentales en el dominio de la frecuencia, permitiendo identificar cómo el ángulo de disparo afecta la distorsión armónica.

Se utilizará el simulador PSIM para corroborar los resultados teóricos mediante la visualización de las formas de onda en el dominio del tiempo.

II. CASO DE ESTUDIO: ANÁLISIS Y METODOLOGÍA

En un rectificador de onda completa no controlado (con diodos), los estados de conducción dependen únicamente de los voltajes instantáneos. En el caso de los SCR, se introduce el ángulo de disparo α , que retrasa el inicio de la conducción.

Se parte de un circuito trifásico con tres fuentes conectadas en estrella, denominadas v_a con ángulo de 0° , v_b con ángulo

de -120° y v_c con ángulo de 120° , las formas de onda y sus intersecciones se pueden observar en la Fig. 1. El circuito consta de seis SCR y una carga resistiva R como se muestra en la Fig. 2.

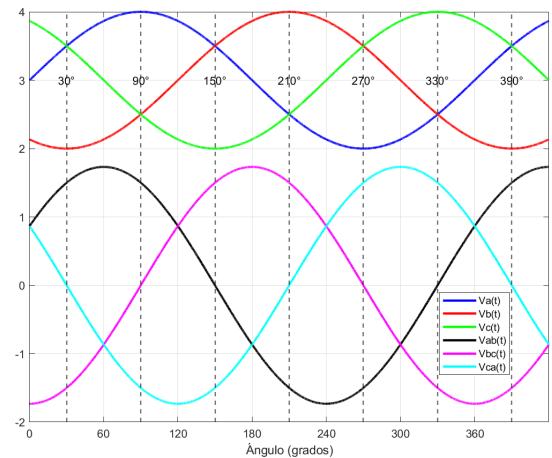


Fig. 1. Formas de onda e Intersecciones de las Fuentes de Alimentación.

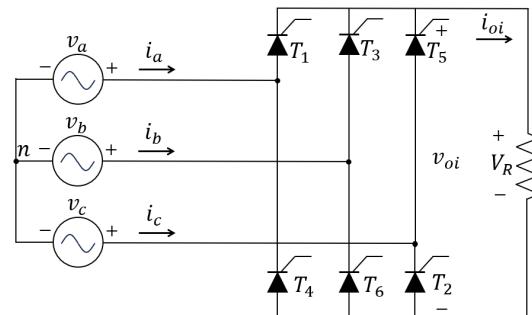


Fig. 2. Circuito Rectificador Bajo Estudio.

A. Estados Asumidos del Circuito

En el análisis del rectificador trifásico controlado se asume que el circuito opera en estados bien definidos durante cada intervalo de conducción, se identifican 6 intervalos de conducción como se muestra en la Fig. 1. Cada intervalo es de 60° eléctricos, únicamente dos SCRs conducen simultáneamente, siguiendo la secuencia determinada por sus ángulos de disparo. Esto implica que no se activan simultáneamente SCRs pertenecientes al mismo grupo. La conmutación se realiza de

forma natural cuando se dispara el siguiente SCR, generando una trayectoria de menor impedancia y redirigiendo la corriente de manera controlada.

A continuación, en la Tabla I se muestran los rangos de disparos y conducción, en la que se detallan los 6 intervalos identificados del ciclo

TABLA I
TABLA DE RANGOS DE DISPAROS Y CONDUCCIÓN

	Rango de ωt	SCRs	V_o
1	($30^\circ + \alpha$) a ($90^\circ + \alpha$)	T_1 y T_6	$v_{ab} = v_{an} - v_{bn}$
2	($90^\circ + \alpha$) a ($150^\circ + \alpha$)	T_1 y T_2	$v_{ac} = v_{an} - v_{cn}$
3	($150^\circ + \alpha$) a ($210^\circ + \alpha$)	T_2 y T_3	$v_{bc} = v_{bn} - v_{cn}$
4	($210^\circ + \alpha$) a ($270^\circ + \alpha$)	T_3 y T_4	$v_{ba} = v_{bn} - v_{an}$
5	($270^\circ + \alpha$) a ($330^\circ + \alpha$)	T_4 y T_5	$v_{ca} = v_{cn} - v_{an}$
6	($330^\circ + \alpha$) a ($390^\circ + \alpha$)	T_5 y T_6	$v_{cb} = v_{cn} - v_{bn}$

B. Parámetros del Sistema y Voltaje Eficaz de la Carga

Para el análisis en PSIM se eligen los siguientes parámetros:

- **Amplitud de las fuentes:** $1V_{pk}$.
- **Frecuencia:** 60 Hz.
- **Resistencia de carga:** $R = 1\Omega$.
- **Ángulo de disparo:** $\alpha = 60^\circ$.

C. Análisis de Fourier

Al usar funciones trigonométricas, los ángulos en grados se convierten a radianes. La señal completa tiene un período total de 360° pero cada segmento de conducción tiene un período de 60° . Para simplificar el análisis de cada segmento, se introduce la variable auxiliar

$$\theta = \omega t - \theta_0, \quad (1)$$

donde θ_0 es el ángulo de inicio del intervalo de conducción. Por ejemplo, para $\alpha = 60^\circ$ se tiene que $\theta_0 = 30^\circ + \alpha = 90^\circ$. Con este cambio, el intervalo de integración se estandariza a $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$. Esto simplifica el análisis al evitar trabajar con límites variables que dependen de θ_0 .

Para la descomposición en serie de Fourier del voltaje en la resistencia, se considera un período de 360° , sumando las contribuciones de los 6 intervalos de conducción.

$$a_n = \frac{2}{2\pi} \sum_{k=1}^6 \int_0^{\pi/3} v_o(\theta) \cos(n\theta) d\theta \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{2\pi} \sum_{k=1}^6 \int_0^{\pi/3} v_o(\theta) \sin(n\theta) d\theta \quad (3)$$

$$v_o(\theta) = V_{LL_{pk}} \sin(\theta). \quad (4)$$

El valor medio V_{dc} se determina mediante la integración sobre un ciclo completo:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\alpha). \quad (5)$$

La ecuación 5 tiene como restricción $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$. La corriente promedio, debido a la carga resistiva R , se determina simplemente dividiendo V_{dc} entre R :

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi R} \cos(\alpha). \quad (6)$$

Al evaluar la función coseno en 60° , se obtiene:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}(1V)}{\pi} \cos(60^\circ) = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \approx 0.827V. \quad (7)$$

Asimismo, la corriente promedio en la carga es:

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{0.827V}{1\Omega} \approx 0.827A. \quad (8)$$

En la Tabla II se muestran los valores de THD obtenidos para diferentes ángulos de disparo.

TABLA II
THD PARA DIFERENTES ÁNGULOS DE DISPARO

Ángulo de disparo	THD
15°	12.52%
30°	24.50 %
60°	71.57%

III. RESULTADOS

En la Fig. 3 se muestra una comparación de formas de onda entre MATLAB y PSIM. Además, se muestran las formas de onda de las tensiones y los ángulos importantes en este análisis.

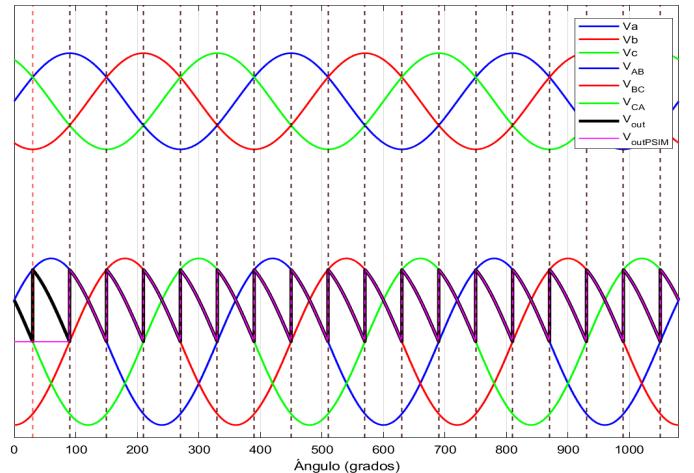


Fig. 3. Comparación de las Formas de Onda.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en MATLAB y PSIM se relacionan adecuadamente, esto valida el análisis del rectificador mediante el método de estados asumidos y Fourier. Sin embargo, se observó una ligera discrepancia en el inicio del ciclo en PSIM, atribuida a la configuración de los disparos de los SCR según los estados asumidos.

REFERENCIAS

- [1] M. H. Rashid, Electrónica de Potencia - Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Prentice Hall, 1999.
- [2] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd ed. John Wiley Sons, Inc., 2002.