

# Ánalysis de un rectificador semicontrolado trifásico de onda completa con carga resistiva

Yosniel Agüero

Universidad de Guadalajara

MCIE

Guadalajara, México

yosniel.aguero9368@alumnos.udg.mx

Glader Hernández

Universidad de Guadalajara

MCIE

Guadalajara, México

glader.hernandez9367@alumnos.udg.mx

Gary Sosa

Universidad de Guadalajara

MCIE

Guadalajara, México

gary.sosa9369@alumnos.udg.mx

Ulrik Wong

Universidad de Guadalajara

MCIE

Guadalajara, México

ulrik.wong7998@alumnos.udg.mx

**Abstract**—El documento presenta un análisis de un rectificador semicontrolado trifásico con carga resistiva. Mediante el método de estados asumidos, se determinan las combinaciones válidas de operación, los rangos de polarización de los SCR y sus ángulos de conducción. Además, se analiza el contenido armónico del voltaje de salida mediante series de Fourier, caracterizando la dependencia de su componente DC y distorsión armónica con el ángulo de disparo. Los resultados obtenidos se comprueban mediante simulaciones en PSIM, confirmando la precisión del modelo teórico.

## I. INTRODUCCIÓN

Los rectificadores semicontrolados trifásicos representan una configuración clave en aplicaciones de conversión de potencia AC/DC. Este trabajo aborda su análisis desde una perspectiva de estados de conducción y calidad espectral de la salida. El método de estados asumidos proporciona un marco riguroso para predecir el comportamiento de conmutación, mientras que el análisis de Fourier cuantifica el rendimiento en términos de valor medio y distorsión. Mediante las simulaciones en PSIM se verifica la validez del comportamiento planteado en el análisis. La Fig. 1 muestra el circuito convertidor.

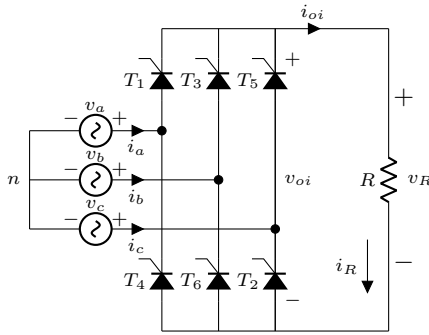


Fig. 1: Rectificador semicontrolado trifásico de onda completa con carga resistiva

Lo voltajes de línea a neutro se definen como:

$$v_a(t) = V_{max} \sin(\omega t)$$

$$v_b(t) = V_{max} \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$v_c(t) = V_{max} \sin(\omega t + 120^\circ)$$

## II. ESTADOS ASUMIDOS

En un instante dado las tres tensiones de fase  $v_a, v_b, v_c$  se ordenan por su valor instantáneo; con SCR ideales, siempre conducen dos dispositivos: el superior de la fase con mayor potencial y el inferior de la fase con menor potencial, de modo que el voltaje de salida es siempre un línea-a-línea  $v_{oi}(t) = v_{max}(t) - v_{min}(t)$ . Se considera además el estado sin conducción  $S_0$  cuando aún no se ha aplicado el pulso de compuerta (ángulo  $\alpha$ ) o la red no supera el umbral de disparo. Así, los siete estados son:

- $S_0$ : ningún SCR conduce,  $v_{oi} = 0$ .
- $S_1$  si  $v_a \geq v_b \geq v_c$ ,  $T_1$  y  $T_6$  (ON),  $v_{oi} = v_a - v_b \equiv v_{ab}$ .
- $S_2$  si  $v_a \geq v_c \geq v_b$ ,  $T_1$  y  $T_2$  (ON),  $v_{oi} = v_a - v_c \equiv v_{ac}$ .
- $S_3$  si  $v_b \geq v_a \geq v_c$ ,  $T_3$  y  $T_4$  (ON),  $v_{oi} = v_b - v_a \equiv v_{ba}$ .
- $S_4$  si  $v_b \geq v_c \geq v_a$ ,  $T_3$  y  $T_2$  (ON),  $v_{oi} = v_b - v_c \equiv v_{bc}$ .
- $S_5$  si  $v_c \geq v_a \geq v_b$ ,  $T_5$  y  $T_4$  (ON),  $v_{oi} = v_c - v_a \equiv v_{ca}$ .
- $S_6$  si  $v_c \geq v_b \geq v_a$ ,  $T_5$  y  $T_6$  (ON),  $v_{oi} = v_c - v_b \equiv v_{cb}$ .

Las transiciones entre estados ocurren cuando dos tensiones de fase se igualan (cruces  $v_a = v_b$ ,  $v_b = v_c$  o  $v_c = v_a$ ), lo que en el caso senoidal balanceado sucede cada  $60^\circ$  eléctricos; el inicio efectivo de cada estado conductor queda retrasado por el ángulo de disparo  $\alpha$ . Dado que la carga es estrictamente resistiva, no hay almacenamiento de energía ni memoria de estado: la corriente sigue instantáneamente a la tensión en cada tramo, descrita por:

$$i(t) = \frac{v_{oi}(t)}{R},$$

anulándose exactamente en los instantes de cambio de par, por lo que el apagado de los SCR es natural en cada frontera de  $60^\circ$ .

Estado	Intervalo (grados)
$S_1$	$[30^\circ + \alpha, 90^\circ + \alpha]$
$S_2$	$[90^\circ + \alpha, 150^\circ + \alpha]$
$S_3$	$[150^\circ + \alpha, 210^\circ + \alpha]$
$S_4$	$[210^\circ + \alpha, 270^\circ + \alpha]$
$S_5$	$[270^\circ + \alpha, 330^\circ + \alpha]$
$S_6$	$[330^\circ + \alpha, 390^\circ + \alpha]$

Tabla I: Intervalos de los estados asumidos.

En cada intervalo de  $60^\circ$  la secuencia de fases (desfasadas  $120^\circ$ ) produce una fase con mayor potencial y otra con menor potencial; el par de tiristores del sector conecta dicha fase máxima con la mínima, por lo que  $v_{oi}$  en ese tramo es la diferencia línea-a-línea entre ellas. El ángulo de disparo  $\alpha$  no altera el orden relativo de las fases: simplemente *desplaza* el inicio de cada sector (p. ej.  $S_1$  comienza en  $30^\circ + \alpha$ ,  $S_2$  en  $90^\circ + \alpha$ , etc.). En un modelo ideal por tramos cada sector dura  $60^\circ$ .

El voltaje promedio ( $V_{cd}$ ) en  $R$  se obtiene por (1), donde  $V_m$  es el voltaje máximo.

$$V_{cd} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos \alpha \quad (1)$$

Mientras el voltaje eficaz ( $V_{rms}$ ) se obtiene como:

$$V_{rms} = \sqrt{3}V_m \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \cos 2\alpha}$$

### III. SIMULACIÓN EN PSIM

La Fig.2 muestra el comportamiento del voltaje en la resistencia  $v_R$  para  $\alpha = 0^\circ$ , mientras la Fig. 3 es para  $\alpha = 30^\circ$

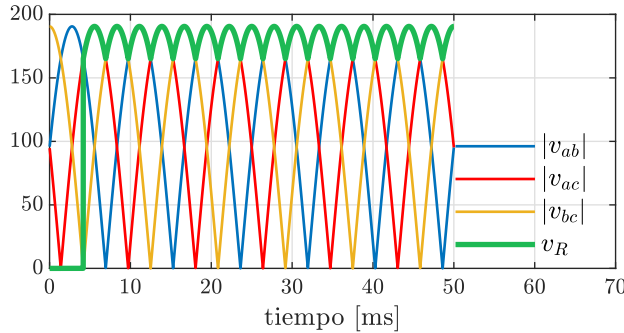


Fig. 2: Voltaje de salida del rectificador trifásico

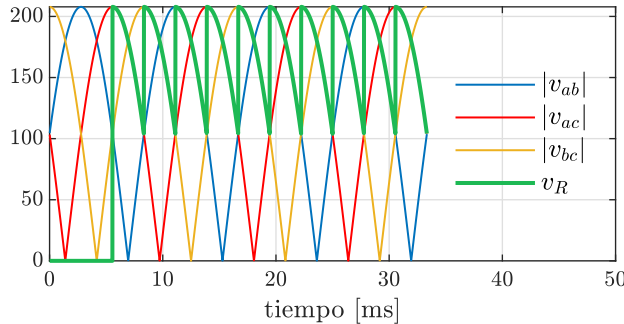


Fig. 3: Voltaje de salida del rectificador trifásico con  $\alpha = 30^\circ$

Para obtener este resultado se ajusto el ángulo de disparo de cada tiristor según la Tabla II

Estado	Intervalo (grados)
$T_1$	$[30^\circ + \alpha \rightarrow 150^\circ + \alpha]$
$T_2$	$[90^\circ + \alpha \rightarrow 210^\circ + \alpha]$
$T_3$	$[150^\circ + \alpha \rightarrow 270^\circ + \alpha]$
$T_4$	$[210^\circ + \alpha \rightarrow 330^\circ + \alpha]$
$T_5$	$[270^\circ + \alpha \rightarrow 390^\circ + \alpha]$
$T_6$	$[330^\circ + \alpha \rightarrow 450^\circ + \alpha]$

Tabla II: Ángulos de disparo para cada tiristor

### IV. ANÁLISIS DE FOURIER DE LA SEÑAL DE SALIDA

El voltaje de salida  $v_o(\omega t)$  puede expresarse mediante su serie de Fourier:

$$v_o(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)]$$

los coeficientes son:

$$a_0 = V_{cd}$$

$$a_n = \frac{6}{\pi} \sqrt{3} V_m \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \cos(n\omega t) d(\omega t)$$

$$b_n = \frac{6}{\pi} \sqrt{3} V_m \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \sin(n\omega t) d(\omega t)$$

Los coeficientes  $a_n$  y  $b_n$  representan los armónicos de la señal de salida. Los armónicos dominantes en el voltaje de salida son múltiplos de 6 ( $n = 6, 12, 18, \dots$ ) debido a la simetría de la señal, ya que la conmutación de los SCR ocurre cada  $60^\circ$  ( $\pi/3$  radianes). La señal se repite cada  $\pi/3$  radianes, por lo que la frecuencia de salida es  $6f_o$ . Al aumentar  $\alpha$ , los armónicos aumentan debido que los coeficientes  $a_n$  y  $b_n$  presentan una relación sinusoidal proporcional a  $\alpha$ , en  $0^\circ$  los armónicos son mínimos, en  $90^\circ$  se presenta el mayor contenido armónico, y en  $> 90^\circ$  el contenido armónico disminuye.

### V. CONCLUSIONES

El método de estados asumidos es una herramienta eficaz para identificar las configuraciones válidas en el circuito, definiendo los límites de polarización directa o inversa y los rangos de ángulo de disparo para los SCR.

El análisis de series de Fourier estableció una relación directa y cuantificable entre  $\alpha$  y el espectro de salida: el valor DC decrece inversamente con  $\alpha$ , mientras que el  $THD$  se modifica sustancialmente.

Las simulaciones en PSIM corroboran los resultados obtenidos analíticamente.

### REFERENCIAS

- [1] N. Mohan, T. M. Undeland y W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2003.