Ánalisis 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 Hernandez
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 planateado en el análisis. La Fig. 1 muestra el circuito convertidor.

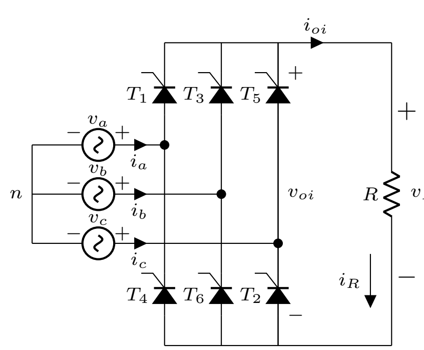

Fig. 1: Rectificador semicontrolado trifásico de onda completa con carga resistiva

Lo voltajes de línea a nueutro se definen como:

$$
\begin{aligned}
v_a(t) &= V_{max}\sin(\omega t)\\
v_b(t) &= V_{max}\sin(\omega t - 120^\circ)\\
v_c(t) &= V_{max}\sin(\omega t + 120^\circ)
\end{aligned}
$$

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 α) 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 $v_b \geq v_c \geq v_a$, T_3 y T_2 (ON), $v_{oi} = v_b - v_c \equiv v_{bc}$.
- S_4 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_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° eléctricos; el inicio efectivo de cada estado conductor queda retrasado por el ángulo de disparo α. 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:

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

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

Tabla I: Intervalos de los estados asumidos.

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	$[330^\circ + \alpha,\ 390^\circ + \alpha]$

En cada intervalo de 60° la secuencia de fases (desfasadas 120°) 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 α no altera el orden relativo de las fases: simplemente *desplaza* el inicio de cada sector (p. ej. S_1 comienza en $30° + \alpha$, S_2 en $90° + \alpha$, etc.). En un modelo ideal por tramos cada sector dura 60°.

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

$$V_{cd} = \frac{3\sqrt{3}\, V_m}{\pi} \cos\alpha \tag{1}$$

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

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

III. Simulación en PSIM

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

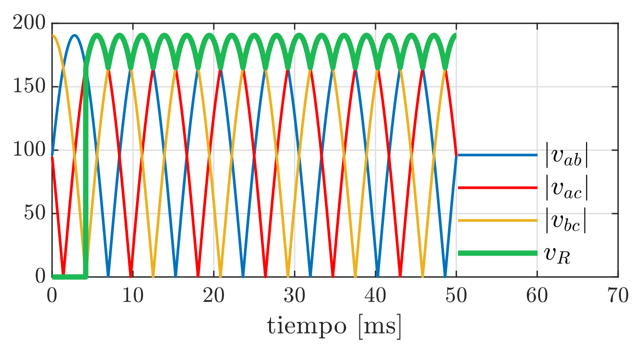

Fig. 2: Voltaje de salida del rectificador trifásico con $\alpha = 0°$

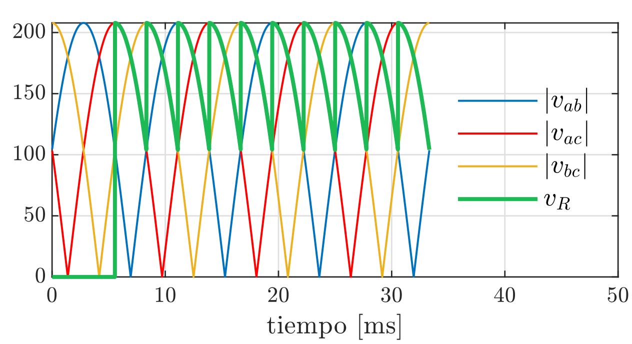

Fig. 3: Voltaje de salida del rectificador trifásico con $\alpha = 30°$

Para obtener este resultado se ajusto el tiempo de conducción para cada tiristor según la Tabla II

Tabla II: Tiempos de conducción para cada tiristor

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

IV. Ánalis de Fourier de la señal de salida

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

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

podemos obtener la magnitud de los armonicos a partir de los coeficientes a_n y b_n:

$$V_n(\alpha) = \frac{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}}{\sqrt{2}}$$

$$V_n(\alpha) = \frac{3\sqrt{3} V_m}{\sqrt{2}\pi} \sqrt{\frac{1}{(n-1)^2} + \frac{1}{(n+1)^2} - \frac{2\cos(2\alpha)}{n^2 - 1}}$$

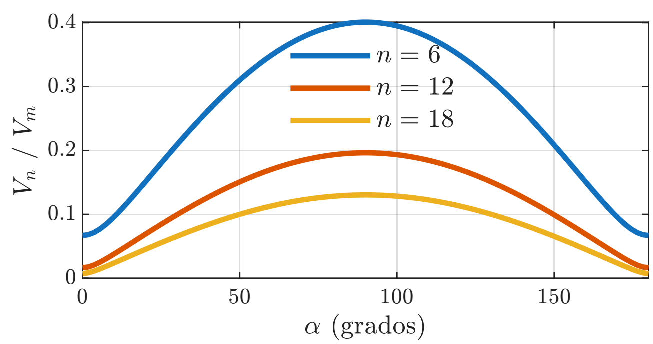

Fig. 4: Armónicos normalizados del voltaje de salida en funcion de α

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 α y el espectro de salida: el valor DC decrece inversamente con α, 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.