

LA SIMULACIÓN AVANZADA EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA

R. García-Gil, J. M. Espí, J. Castelló-Moreno

Dpto. Ingeniería Electrónica. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria
- Universidad de Valencia. e-mail: garciagi@uv.es

RESUMEN

En este artículo se presenta la simulación de un rectificador trifásico tipo Buck con técnica de modulación del vector espacio (SVM). La aplicación de esta técnica de modulación requiere de la implementación de dos máquinas de estado, que a nivel de simulación se implementa de forma simple mediante la herramienta de simulación SIMPLORER de Ansoft Co. Adicionalmente se analizan diferentes estrategias de modulación, que son evaluadas respecto a la distorsión armónica que producen en la corriente de entrada y el rizado de corriente en la bobina de salida.

1. INTRODUCCIÓN

El control digital se va incorporando cada vez con mayor intensidad en los sistemas de potencia, permitiendo implementar técnicas de control cada vez más sofisticadas. Uno de los ejemplos más claros corresponde al caso de los sistemas trifásicos que incorporan técnicas de control basadas en la modulación del vector de espacio (SVM) para la corrección del factor de potencia. Estos sistemas requieren potentes herramientas de simulación para poder estudiar su comportamiento previo a su implementación práctica, proceso que no sólo ahorra tiempo de desarrollo, sino que además favorece la comprensión del sistema.

De las diferentes herramientas de simulación existentes en el mercado, SIMPLORER de Ansoft Co. ofrece una solución ideal para este tipo de sistemas, evitando gran parte de los problemas de convergencia que ofrece otros sistemas de simulación más clásicos basados en la herramienta SPICE. Además, incorpora las ventajas de las herramientas de simulación basadas en diagramas de bloques tipo Matlab/Simulink. SIMPLORER permite incorporar a la simulación del circuito de potencia, diagramas de bloques y máquinas de estado. Este último

punto es realmente útil en la implementación de la modulación SVM, como veremos en los siguientes apartados.

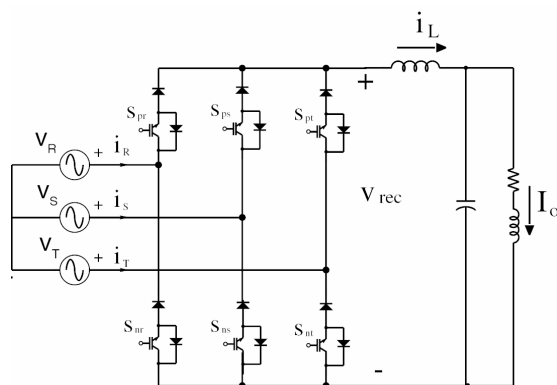


Fig. 1: Rectificador trifásico tipo Buck.

En lo que sigue presentaremos el estudio de simulación de un rectificador trifásico tipo Buck con corrección del factor de potencia, utilizando distintas técnicas de modulación basadas en la modulación SVM. Este trabajo forma parte de uno de los bloques de la asignatura de tercer ciclo “Fundamentos de Sistemas de Potencia” impartido por el departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Valencia.

2. EL RECTIFICADOR TRIFÁSICO TIPO BUCK Y LA MODULACIÓN SVM

La aplicación de la técnica SVM al rectificador trifásico de la Fig. 1, permite realizar la corrección del factor de potencia a la entrada, a la vez que se regula la tensión de salida. La técnica SVM se basa en la representación de las tensiones y corrientes trifásicas como fasores en el plano bidimensional α - β , para lo cual se utiliza la siguiente transformación,

$$x(t) = \frac{2}{3} \cdot \left(x_R(t) + x_S(t) \cdot e^{j2\pi/3} + x_T(t) \cdot e^{-j2\pi/3} \right) = X_m \cdot e^{j(\omega t + \varphi)} = X_\alpha(t) + jX_\beta(t) \quad (1)$$

donde x_R, x_S, x_T representan las tensiones o corrientes de un sistema trifásico equilibrado.

El resultado es un fasor en el plano complejo que gira con una frecuencia angular ω correspondiente a los 50 Hz de la frecuencia de red, cuyo módulo es igual al valor de pico (X_m) de la señal de entrada y con desplazamiento de fase φ .

Veamos a continuación cómo aplicar esta teoría al rectificador trifásico tipo Buck de la Fig. 1 para realizar la corrección del factor de potencia. Este convertidor presenta una fuente de tensión a la entrada que no debemos cortocircuitar y una fuente de corriente a la salida, que no podemos dejar en circuito abierto. Estas restricciones implican que únicamente 9 combinaciones de interruptores son posibles, de las cuales 3 dan lugar a una tensión nula de salida, tal y como se resume en la Tabla I. Si estas combinaciones se representan en el plano complejo mediante la transformación (1), el resultado son los 6 vectores fundamentales (más los vectores nulos que se sitúan en el origen), que se observan en la Fig. 2.

Para conseguir a la entrada una corriente sinusoidal y en fase con la tensión, debemos generar un fasor de corriente \mathbf{I} que gire solidario con el fasor de tensión que describen las tensiones trifásicas. Esto se realiza como combinación lineal de los vectores fundamentales.

Generalmente se utilizan los vectores adyacentes y los vectores nulos. Así, cuando el fasor a generar está en el sector II (Fig. 2), éste se construye mediante la modulación PWM de los

S_{pr}	1	0	0	0	0	1	1	0	0
S_{ps}	0	1	1	0	0	0	0	1	0
S_{pt}	0	0	0	1	1	0	0	0	1
S_{nr}	0	0	1	1	0	0	1	0	0
S_{ns}	0	0	0	0	1	1	0	1	0
S_{nt}	1	1	0	0	0	0	0	0	1
V_{pn}	$-V_{TR}$	V_{ST}	$-V_{RS}$	V_{TR}	$-V_{ST}$	V_{RS}	V_{RR}	V_{SS}	V_{TT}
i_r	I_o	0	$-I_o$	$-I_o$	0	I_o	0	0	0
i_s	0	I_o	I_o	0	$-I_o$	$-I_o$	0	0	0
i_t	$-I_o$	$-I_o$	0	I_o	I_o	0	0	0	0

Tabla I: Combinación de interruptores permitidas para el rectificador trifásico.

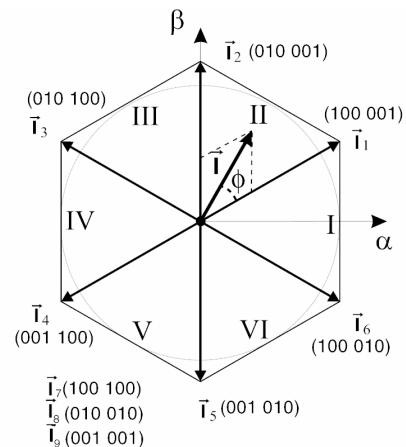


Fig. 2: Representación de los vectores fundamentales en el plano α - β . Números en paréntesis indican ON – ‘1’ u OFF – ‘0’ para la secuencia de interruptores ($S_{pr}, S_{ps}, S_{pt}, S_{nr}, S_{ns}, S_{nt}$). El área encerrada por dos vectores adyacentes recibe el nombre de sector. El vector de corriente \mathbf{I} a generar se encuentra en el sector II.

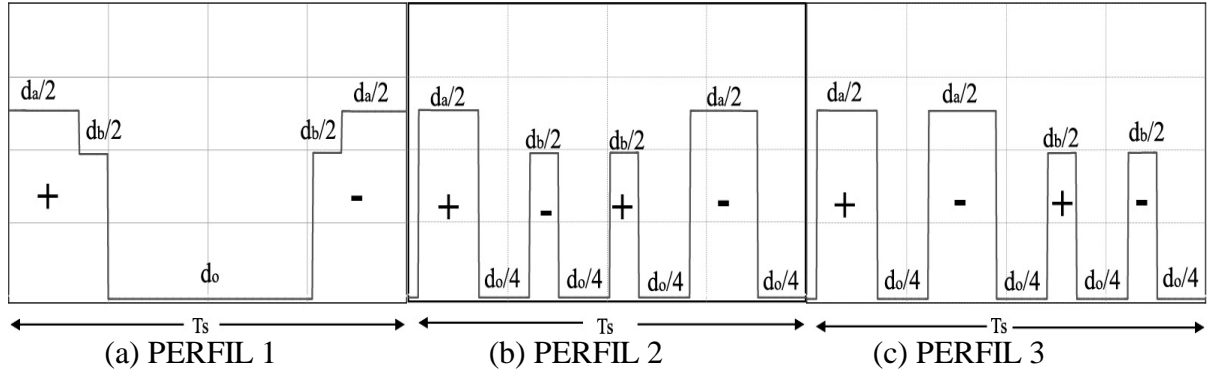


Fig. 3: Tensión de salida rectificada para tres distribuciones de los ciclos de trabajo en un periodo de conmutación.

vectores fundamentales $I_1 - I_2$ con ciclos de trabajo d_a y d_b , respectivamente, y el resto de tiempo se completa con los vectores nulos.

$$d_a \cdot I_1 + d_b \cdot I_2 = \mathbf{I} \quad (2)$$

$$d_a + d_b + d_o = 1$$

Siendo estos ciclos de trabajo proporcionales a las correspondientes proyecciones,

$$d_a = m \cdot \sin(\pi/3 - \varphi) \quad (3)$$

$$d_b = m \cdot \sin(\varphi)$$

m recibe el nombre de índice de modulación.

3. APLICACIÓN DE DIFERENTES TÉCNICAS DE MODULACIÓN

En la práctica existen diferentes posibilidades para combinar los vectores adyacentes y los vectores nulos. Generalmente se intercalan los vectores nulos para que en cada transición únicamente haya un interruptor que pase a ON y otro que pase a OFF y así reducir las pérdidas. Dependiendo de la distribución tendremos diferentes perfiles de tensión a la salida. La forma de evaluar la técnica de control seleccionada viene dada en función de:

- Distorsión armónica total (THD) de la corriente de entrada.
- Rizado de la corriente por la bobina de salida.
- Máximo número de interruptores que entran en juego en cada conmutación. Reducción de las pérdidas de conmutación.
- Facilidad de realización práctica.

En el presente trabajo vamos a analizar tres posibles perfiles de tensión de salida, que mostramos en la Fig. 3.

4. SIMULACIÓN DE LA MODULACIÓN SVM

Para generar el perfil de la Fig. 3(a) y suponiendo que el fasor de corriente \mathbf{I} a generar se encuentra en el sector I, las señales de disparo se muestran en la Fig. 4, de acuerdo con la distribución de vectores fundamentales $I_6 - I_1 - I_7 - I_1 - I_6$. La extrapolación al resto de sectores se realiza definiendo unas señales auxiliares x_1, x_2, y_1, y_2, z_1 y z_2 , que se distribuyen a cada interruptor particular en función del sector, de acuerdo con la Tabla II.

SECT.	I	II	III	IV	V	VI
S_{pr}	x_1	y_2	z_1	x_2	y_1	z_2
S_{ps}	y_1	z_2	x_1	y_2	z_1	x_2
S_{pt}	z_1	x_2	y_1	z_2	x_1	y_2
S_{nr}	x_2	y_1	z_2	x_1	y_2	z_1
S_{ns}	y_2	z_1	x_2	y_1	z_2	x_1
S_{nt}	z_2	x_1	y_2	z_1	x_2	y_1

Tabla II: Distribución de las señales de disparo para cada conmutador en función del sector.

En el proceso de simulación se requiere una máquina de estado que genera las señales auxiliares y otra máquina de estados que distribuya las señales auxiliares a cada interruptor particular en función del sector. Estas máquinas de estado son fácilmente implementables mediante la herramienta SIMPLORER y se representan, respectivamente, en las Fig. 5 y 6.

La ventaja de una implementación de esta forma, es que la codificación en lenguaje VHDL para su implementación en una FPGA es inmediata, pues la forma simple de implementación de estas secuencias es mediante sendas máquinas de estado.

4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Mediante la utilización de la herramienta SIMPLORER se han analizado los tres perfiles de simulación de la Fig. 3, de acuerdo con los dos primeros factores del apartado 3. Pasamos a presentar las principales conclusiones.

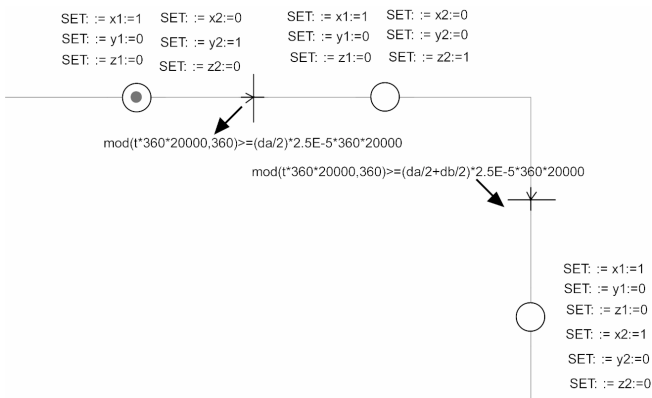


Fig. 5: Muestra de la máquina de estados implementada con SIMPLORER, que genera las señales auxiliares para el PERFIL 1.

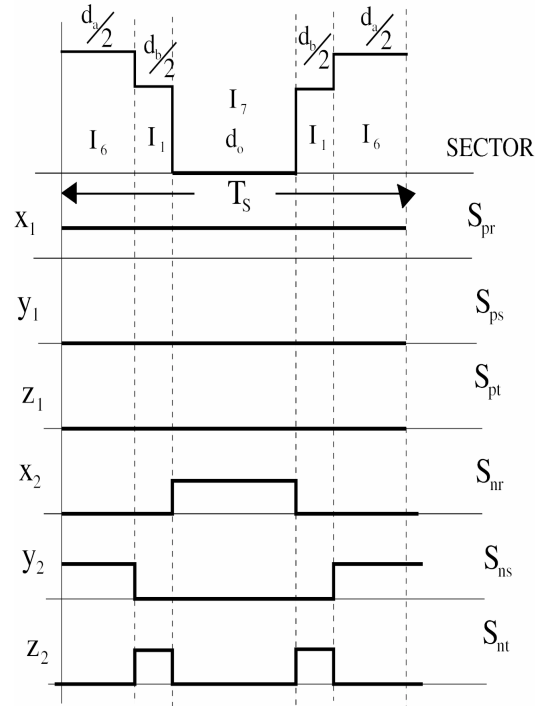


Fig. 4: Señales auxiliares para el PERFIL 1 y señales de disparo de los interruptores en el SECTOR I.

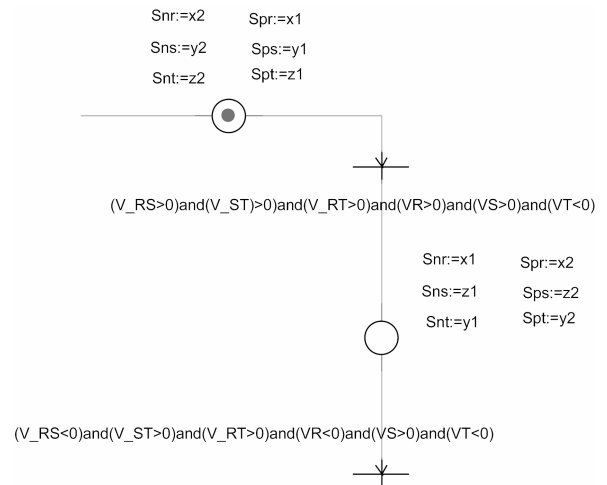


Fig. 6: Muestra de la máquina de estados implementada con SIMPLORER, que distribuye las señales auxiliares a cada interruptor en función del sector.

4.1. Contenido en armónicos de la corriente de entrada.

Obteniendo la corriente de entrada en una de las fases (que será pulsada), se puede realizar un análisis de Fourier para calcular su espectro. Se ha tomado una frecuencia de conmutación 20kHz y la frecuencia de modulación son los 50Hz de red.

La distorsión armónica total (THD) se ha calculado para los 1000 primeros armónicos. Además, es importante resaltar que en las simulaciones no se ha considerado el filtro de entrada, que debe eliminar gran parte de los armónicos por arriba de la frecuencia de modulación. Si el filtro de entrada diseñado atenúa todas las frecuencias por arriba de 5kHz, entonces la distorsión armónica calculada será,

	PERFIL 1	PERFIL 2	PERFIL 3
$THD_{f < 5 \text{ kHz}}$	7.93%	7.12%	11.50 %

Estos resultados han sido obtenidos con el post-procesador DAY que incluye la herramienta de simulación.

En los análisis, la distribución correspondiente al PERFIL 2 es la que reduce de forma más importante el contenido en armónicos de la corriente de entrada.

4.1. Rizado de corriente por la bobina de salida.

El siguiente aspecto a tener en cuenta en la elección de la distribución de los ciclos de trabajo es reducir el rizado de la corriente de salida. Observando la Fig. 3, se puede deducir que para reducir el rizado de corriente será conveniente distribuir el tiempo muerto (d_o) entre los tiempos correspondientes d_a y d_b . La distribución correspondiente a los PERFILES 2 y 3 ponen en práctica estas secuencias, mientras que la distribución PERFIL 1 no, con lo que este último presentará un mayor rizado, tal y como se aprecia en la Fig. 6.

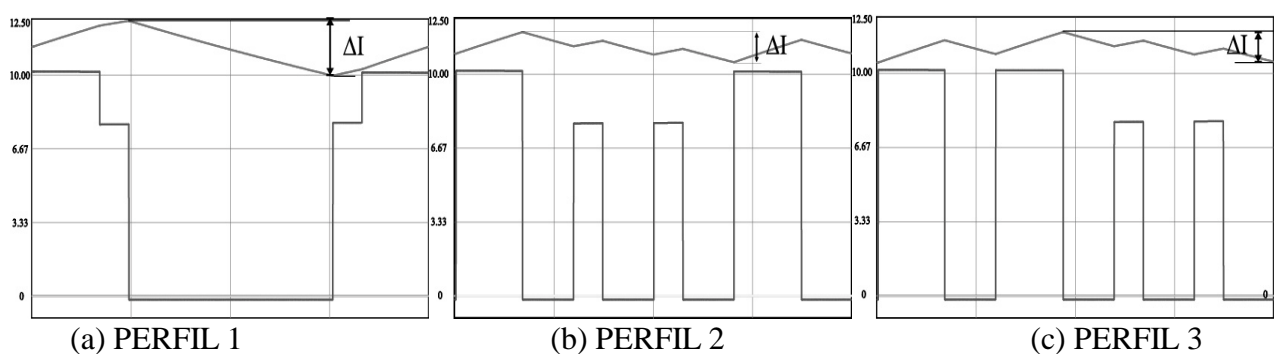


Fig. 6: Simulación SIMPLORER del rizado de corriente para las tres distribuciones de ciclo de trabajo.

5. CONCLUSIÓN

Se ha presentado la simulación de un rectificador trifásico tipo Buck utilizando la técnica de modulación SVM para la corrección del factor de potencia. La simulación se ha realizado mediante la herramienta SIMPLORER de Ansoft Co. Este simulador ha demostrado ser una buena herramienta de simulación en aquellos circuitos de potencia que incorporan control digital. Además, presenta tiempos de ejecución bajos y es numéricamente más robusto que la herramienta SPICE.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J.Rodríguez, A. Weinstein, P. Lezana, Modern Simulation Tools for Power Electronics." Sec-ond Online Symposium for Electronics Engineers OSEE 2001. www.techonline.com/osee/
- [2] P. Korondi, P. Bauer, P. J. van Duijsen, "Integrated Control and Circuit Simulation for a Motion Control System", 10th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE2003, CD-ROM, Toulouse, 2003.
- [3] U. Drofenik and J. W. Kolar, "Survey of Modern Approaches of Education in Power Electronics", Proceedings of the 17th IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC'2002), Dallas, Texas, USA, March 10-14, Vol.2, pp.749-755 (2002).
- [4] U. Drofenik and J. W. Kolar, "Modern and Intuitive Way of Teaching Space Vector Calculus and PWM in an Undergraduate Course", Proceedings of the 3rd IEEJ/IEEE Joint IAS Power Conversion Conference (PCC'2002), Osaka, Japan, April 2-5, Vol.1, pp.305-310 (2002).
- [4] N. Froehleke, H. D. Njiende, D. Hahm, and P. Wallmeier, "Integrative Scheme/Tool for Automated Development of Switched Mode Power Supplies based on SIMPLORER" 9th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'01), August 27-29 2001, Graz, Austria.
- [5] SIMPLORER Student Version <http://www.ansoft.com/products/em/simplorer/>