

Modelado de convertidores de electrónica de potencia basado en funciones continuas: Aplicación en el STATCOM

CONTRERAS-AGUILAR, Luis†*, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y CONCHA-SÁNCHEZ, Antonio

Universidad de Colima, campus Coquimatlán, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Km 9 carretera Colima-Coquimatlán, Coquimatlán, Colima, México, C.P. 28400

Recibido 11 de Julio, 2017; Aceptado 29 de Septiembre, 2017

Resumen

Actualmente, la flexibilización de la red eléctrica mediante convertidores basados en electrónica de potencia (FACTS, por sus siglas en inglés), ha permitido mejorar el control e incrementar la capacidad de transferencia de potencia en los sistemas eléctricos. Por otro lado, las simulaciones digitales en el dominio del tiempo son una herramienta indispensable para el análisis y diseño de dichos sistemas. De tal forma, que al incluir convertidores con altas frecuencias de conmutación dentro de las simulaciones, es necesario reducir significativamente el tiempo de muestreo para reducir el error computacional que se pueda acumular. La forma más simple para modelar estos dispositivos es mediante interruptores ideales. En este artículo se utilizan funciones continuas para modelar los interruptores del dispositivo. Las funciones son del tipo exponencial, cotangente hiperbólica y la ecuación Frolich modificada. Más allá, las funciones continuas permiten desarrollar simulaciones con mayor amplitud en el tiempo de muestreo y convenientemente reducir el error computacional durante el proceso. Finalmente, se realizan simulaciones en el dominio del tiempo donde se muestran las ventajas de la propuesta, y se comparan con las desarrolladas en software Simulink/MATLAB.

Funciones continuas, convertidores de electrónica de potencia, STATCOM, simulación en tiempo

Citación: CONTRERAS-AGUILAR, Luis, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y CONCHA-SÁNCHEZ, Antonio. Modelado de convertidores de electrónica de potencia basado en funciones continuas: Aplicación en el STATCOM. Revista de Ingeniería Tecnológica 2017. 1-3:38-45

Abstract

Nowadays, Flexible AC Transmission Systems (FACTS) based on power electronics devices allow enhance the control and increase the power transfer capability of the electrical networks. On the other hand, time-domain digital simulations are an essential tool for the analysis and design of electrical systems. In such way, when digital simulations are developed including power electronic converters with fast switching frequencies, it is required to decrease significantly the time step in order to reduce the computational error. Using ideal switches is the simplest way to model power electronic converters. This paper uses continuous functions in order to model the switches of the device. The functions are exponential type, hyperbolic cotangent and the modified Frolich equation. Furthermore, the continuous function allows carry-out simulations with greater time step and less computational error during the process. Finally, time-domain simulations are developed and compared with Simulink/MATLAB software in order to show the advantages of the proposal.

Continuous function, power electronics converters, STATCOM, time-domain simulation

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: luisc@uol.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El interés en resolver problemas asociados a la vida real por medio de modelos matemáticos es característico de la ciencia y la tecnología (Galbraith y Stillman, 2006). Además, los modelos matemáticos simplificados han favorecido la solución rápida, pero se ha sacrificado la precisión y/o ventajas que los modelos más sofisticados puedan brindar. Por otro lado, con el gran avance del procesamiento de cómputo se ha incrementado el uso y desarrollo de modelos matemáticos y algoritmos más complejos para representar y predecir los comportamientos de fenómenos físicos asociados a las nuevas tecnologías.

En el sentido anterior, en las últimas décadas la red eléctrica se ha favorecido con los sistemas flexibles de transmisión en corriente alterna (FACTS, por sus siglas en inglés) (Hingorani, 2000). Los dispositivos FACTS son convertidores basados en electrónica de potencia que permiten controlar y regular variables eléctricas del sistema de potencia. Dentro de la familia de los dispositivos FACTS, el compensador estático síncrono (STATCOM, por sus siglas en inglés), permite controlar el voltaje en el nodo de conexión por medio de la inyección de potencia reactiva (Sen, 1998). El STATCOM está basado en un convertidor de fuente de voltaje conmutada (VSC, por sus siglas en inglés), que utiliza técnicas de control por modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) en el control de la inyección de potencia reactiva.

En la simulación de dispositivos FACTS basados en VSC se requiere de modelos matemáticos apropiados para obtener resultados rápidos y precisos. En este sentido, existen varios dispositivos FACTS basados en modelos de VSC ideales (Acha y Madrigal, 2001).

El modelo ideal se utiliza recurrentemente debido a su simplicidad. Sin embargo, tiene la desventaja de discontinuidades y/o eventos discretos relacionados con el proceso de conmutación del VSC, el cual puede afectar al proceso continuo de simulación dinámica del sistema. Esas dificultades analíticas son comunes en todos los dispositivos FACTS que operan basados con interruptores semiconductores (Segundo-Ramírez y Medina, 2009). El modelado de los interruptores se puede realizar con diferentes niveles de complejidad, de tal forma, que los modelos más detallados pueden ser justificados y necesarios cuando son de interés los fenómenos asociados con el proceso de conmutación. Sin embargo, el costo computacional es alto debido a la rigidez del sistema que se introduce con las altas diferencias entre las constantes de tiempo del sistema (Contreras-Aguilar y García, 2007). La fuente de estos problemas numéricos, en el caso de los modelos ideales de VSC, son las discontinuidades del sistema y que no existe derivada para el instante del switcheo cuando se usa el modelo de interruptor ideal (Segundo-Ramírez y Medina, 2009). Un problema importante que surge con el modelo ideal de interruptores es que el error numérico introducido por las discontinuidades no permite calcular la solución con una precisión muy alta. De tal forma, que en este trabajo se utilizan modelos matemáticos continuos y diferenciables para representar los interruptores del VSC y utilizarlos para simulaciones rápidas y eficiente del convertidor STATCOM y otros dispositivos FACTS basados en VSC. Las funciones están basadas en tipo exponencial, cotangente hiperbólica y la ecuación Frolich modificada. Las cuales son una extensión al trabajo propuesto en (Segundo-Ramírez y Medina, 2009) usando la tangente hiperbólica.

Modelado del STATCOM

La Figura 1 muestra un STATCOM típico, que consiste en un convertidor de fuente de voltaje conmutada (VSC) y un transformador de acoplamiento conectado entre el nodo de voltaje de AC y el VSC. La conexión del transformador de potencia es estrella-Delta con la dirección de flujo de potencia hacia los interruptores del VSC. Además, el STATCOM tiene un capacitor del lado de corriente directa para suministro de potencia reactiva.

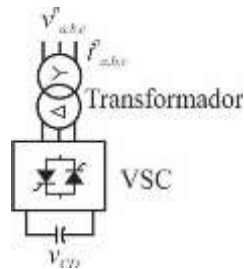


Figura 1 Circuito equivalente del STATCOM

Fuente: Elaboración propia

Modelo del transformador

El transformador estrella-delta es modelado como un banco de transformadores trifásico construido con tres transformadores lineales monofásicos. La impedancia se coloca en el lado primario y un transformador ideal con la relación de transformación de $a = N_p/N_s$. Aplicando las leyes de voltaje y de corriente de Kirchhoff al transformador lineal se puede obtener las siguientes tres ecuaciones diferenciales ordinarias,

$$L_p \frac{di_a^p}{dt} = [v_a^p - R_p i_a^p - a(v_a^s - v_b^s)] \quad (1)$$

$$L_p \frac{di_b^p}{dt} = [v_b^p - R_p i_b^p - a(v_b^s - v_c^s)] \quad (2)$$

$$L_p \frac{di_c^p}{dt} = [v_c^p - R_p i_c^p - a(v_c^s - v_a^s)] \quad (3)$$

p y s denotan primario y secundario respectivamente, v y i son los voltajes y corrientes. R_p y L_p es la resistencia e inductancia del transformador.

Modelo del VSC

La Figura 2 muestra el circuito del VSC. Un puente trifásico de seis pulsos con interruptores bidireccionales es usado para construir el VSC de dos niveles. Cada interruptor es un arreglo de un GTO, IGBT o MOSFET en anti-paralelo con un diodo. Además, se desprecian las pérdidas en los semiconductores. Se utiliza el modelo de conmutador ideal o función continua, según sea el caso, para este trabajo. Entonces, las funciones del interruptor bidireccional se identifican por S y S' para cada fase, que puede estar activada o desactivada, 1 o 0 respectivamente o con el modelo de la función continua. Además, S y S' en cada fase son complementarios, por lo que $S+S'=1$. El voltaje del VSC en el secundario del transformador es,

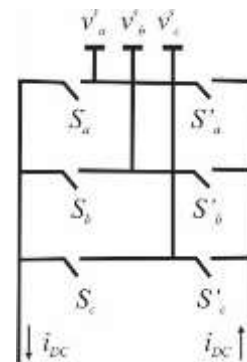


Figura 2 Circuito equivalente del VSC ideal

Fuente: Elaboración propia

$$v_a^s = \left[S_a - \frac{(S_a+S_b+S_c)}{3} \right] v_{CD} \quad (4)$$

$$v_b^s = \left[S_b - \frac{(S_a+S_b+S_c)}{3} \right] v_{CD} \quad (5)$$

$$v_c^s = \left[S_c - \frac{(S_a + S_b + S_c)}{3} \right] v_{CD} \quad (6)$$

donde v_{CD} es el voltaje del capacitor y $S_{a,b,c}$ depende de la técnica de control PWM.

Modelo del Capacitor

El comportamiento dinámico en el voltaje del capacitor del enlace de Corriente Directa (DC) es función de la sumatoria de las corrientes que ingresan al capacitor y se define como,

$$C \frac{dv_{CD}}{dt} = a \left[(i_a^p - i_c^p) S_a + (i_b^p - i_a^p) S_b + (i_c^p - i_b^p) S_c \right] \quad (7)$$

donde a es la relación de transformación, i denota las corrientes, el superíndice p indica que son las corrientes primarias a, b y c indican las fases.

Modelado del PWM-VSC mediante funciones continuas

El modelado de interruptores usando funciones de conmutación no es un problema nuevo, en (Lehn, 2002) se desarrolla un modelo de tiempo discreto lineal y variante en el tiempo del VSC trifásico. El procedimiento se basa en una solución exacta de forma cerrada de las ecuaciones del sistema y no se basa en técnicas iterativas. Además, generalmente los interruptores suelen ser modelados como un switch ideal usando una resistencia con valor infinito y cero para cuando el interruptor está abierto y cerrado, respectivamente. Bajo estos enfoques, los inconvenientes que se pueden tener son relacionados a problemas durante el proceso de solución en la simulación, tales como oscilaciones numéricas y necesidad de pasos de integración muy cortos para lograr una buena precisión.

De tal forma, que bajo el enfoque que se presenta en artículo se procura evitar estos problemas utilizando funciones continuas para representar los interruptores del VSC. Además, se puede utilizar pasos de integración más grandes durante el proceso de simulación.

Modulación por Ancho de Pulso (PWM) sinusoidal

En la técnica PWM se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica para controlar la cantidad de energía en los dispositivos FACTS. Extensos trabajos pueden ser referidos a la técnica PWM, entre las que destaca la técnica sinusoidal. Se basan en la comparación de una señal de referencia sinusoidal a modular y una señal portadora de forma triangular como se observa en la Figura 3 (a). La comparación generará un tren de pulsos de ancho específico que se utiliza como función durante el proceso de simulación de la conmutación los interruptores del VSC. La relación entre la amplitud de la señal portadora y la señal de referencia se llama índice de modulación de amplitud ma . El índice de modulación de amplitud permite obtener el voltaje variable del lado de AC. La relación entre la frecuencia de la señal portadora y la frecuencia de referencia se denomina índice de modulación de frecuencia y se representa por mf , en donde mf debe ser múltiplo de 3 de la frecuencia de la señal de referencia (Mohan y Undeland, 2007). El índice de modulación de frecuencia determina la distorsión armónica de la señal de salida la cual es una medida de su contenido armónico. La Figura 3 (b) muestra la función PWM requerida en el proceso de simulación para modelar los interruptores.

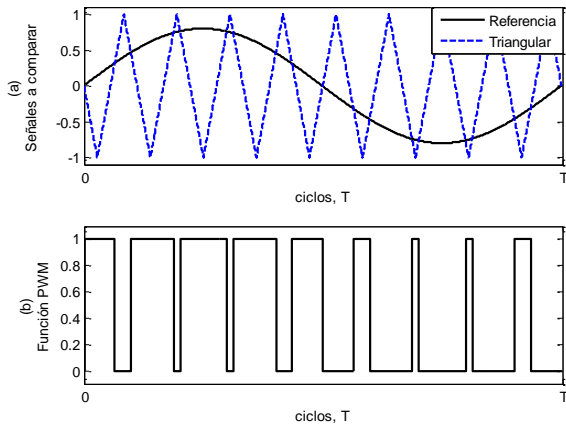


Gráfico 1 Función PWM

Fuente: Elaboración propia.

Funciones continuas PWM.

Basado en el trabajo de (Segundo-Ramírez y Medina, 2009), la función de conmutación PWM propuesta es del tipo tangente hiperbólica, la cual es una función continua, suave y diferenciable para todo tiempo,

$$S_i = \frac{\tanh(\alpha v_{com}) + 1}{2} \tag{8}$$

donde $i = a, b, c$, $v_{com} = (v_{ma} - v_{tri})$, v_{ma} es la señal de referencia, v_{tri} es la señal portadora y $\alpha = 7.5$, el cual está relacionado con la pendiente y la representación de los armónicos en el modelo. Las funciones propuestas en este trabajo para modelar la función PWM y que también son continuas, suaves y diferenciables, son: exponencial, la cual es una adaptación de la tangente hiperbólica,

$$S_i = \frac{1}{e^{-\beta v_{com}} + 1} \tag{9}$$

Función cotangente hiperbólica,

$$S_i = \frac{1}{2} \left[\coth\left(\frac{v_{com}}{a}\right) - \frac{a}{v_{com}} + 1 \right] \tag{10}$$

y la ecuación Frolich modificada,

$$S_i = \left[\frac{v_{com}}{a |v_{com}| + b \sqrt{|v_{com}|}} + \frac{1}{2} \right] \tag{11}$$

donde a y b son valores para ajustar la pendiente y el contenido armónico de la función PWM. Para todas las funciones anteriores la selección de la pendiente está basada como lo proponen en (Segundo-Ramírez y Medina, 2009), $\beta = 15$, $a = 3.75$ para la cotangente hiperbólica y $a = 2$ y $b = 0.01$ en la función de Frolich modificada.

La Figura 4 (a) muestra la Función PWM de referencia y las funciones continuas propuestas en este trabajo. La Figura 4 (b) muestra el contenido armónico de la Función PWM y las funciones continuas.

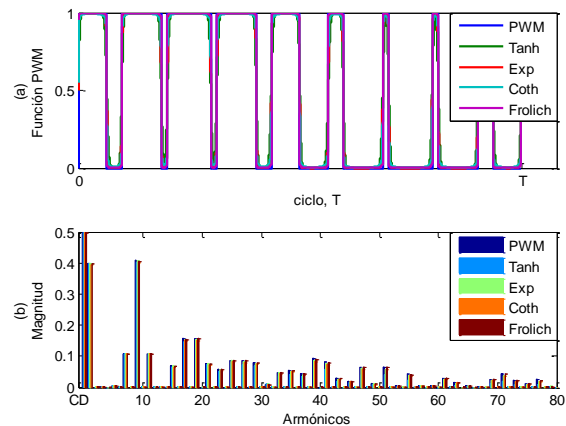


Gráfico 2 Funciones continuas PWM y su contenido armónico

Fuente: Elaboración propia

El gráfico 2 (b) muestra una muy buena caracterización de la función PWM y buena retención del contenido armónico, donde las más pequeñas discrepancias empiezan a partir del armónico 20.

Solución transitoria del STATCOM usando funciones continuas

El caso de prueba presentado en esta sección consiste en un STATCOM como el que se muestra en la Figura 1. El voltaje de primario del transformador es una fuente sinusoidal trifásica de 220 Vrms y 60 Hz. La resistencia del transformador es de 1.8929 ohms y la inductancia de 17.6 mH. El índice de modulación $ma = 0.8$ y el índice de modulación de frecuencia mf es de 15. Por practicidad, no se considera ningún sistema de control retroalimentado, tal que la simulación se tiene la respuesta en lazo abierto. El sistema es descrito por un conjunto de 4 ecuaciones diferenciales ordinarias y en todas las simulaciones las condiciones iniciales se seleccionan en cero. La solución en el dominio del tiempo del conjunto de ecuaciones es utilizando el algoritmo explícito Runge-Kutta de 4^{to} orden y un paso de tiempo de 1 μ s, para la simulación base o de referencia.

El gráfico 3 muestra la validación de la simulación en el dominio del tiempo del STATCOM. Las variables seleccionadas para mostrar son la corriente de la fase a del primario del transformador y el voltaje del capacitor en el lado CD. En esta figura se observa una buena correspondencia entre el modelo y Simulink de MATLAB®. Es importante remarcar que la solución base es utilizando el modelo de interruptores ideales con paso de integración de 1 μ s.

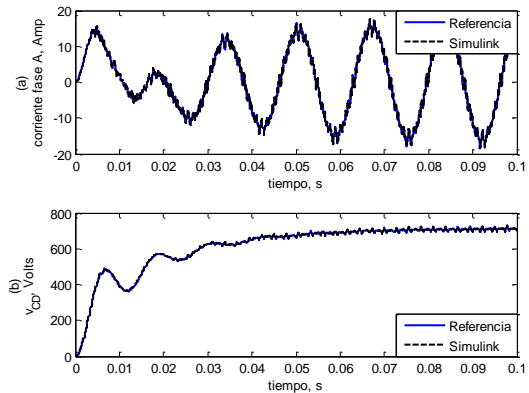


Gráfico 3 Simulación del STATCOM

Fuente: *Elaboración propia*

El gráfico 3 muestra los errores absolutos porcentuales entre la simulación base y las funciones continuas utilizando 1 μ s en las simulaciones. Por simplicidad se toma el voltaje del capacitor para comparar.

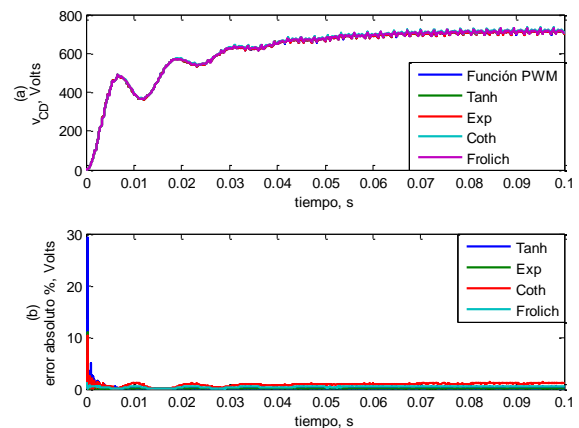


Gráfico 4 Simulación del STATCOM

Fuente: *Elaboración propia*

Los errores absolutos máximos son para la cotangente hiperbólica que están en alrededor del 1 % después del tercer ciclo. Mientras que el mínimo es la función tipo exponencial con cerca del 0.02 % del error absoluto. Al principio de la simulación se tiene los errores máximos porcentuales para la tangente hiperbólica, mientras de la de Frolich es la menor para el inicio de la simulación.

El gráfico 5 muestra los errores absolutos porcentuales máximos usando $100 \mu\text{s}$ en la simulación y comparado con la simulación de $1 \mu\text{s}$. Con base a los resultados se observa que la función PWM con modelo ideal y la de Frolich tienen los mayores errores porcentuales cercanos al 4 %. El error absoluto porcentual más pequeño es para la tangente hiperbólica y la exponencial con cerca del 0.5 %, mientras que la cotangente hiperbólica tienen un error máximo de aproximadamente de 2 %. Es evidente que la mejor aproximación se logra con la tangente hiperbólica y función exponencial.

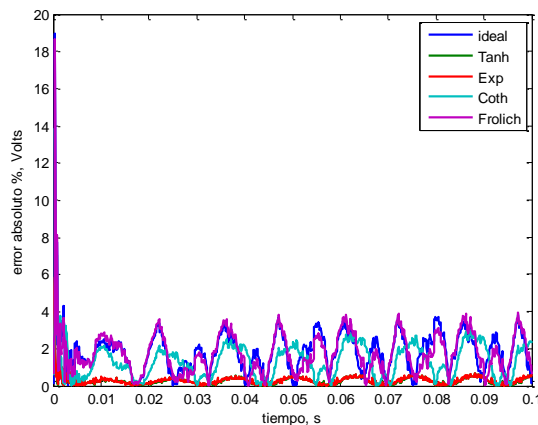


Gráfico 5 Simulación del STATCOM con un paso de integración de $100 \mu\text{s}$

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

En este trabajo se presentaron diferentes funciones continuas para simular la función PWM. Las funciones continuas son del tipo tangente hiperbólica, exponencial, cotangente hiperbólica y ecuación de Frolich modificada. Los resultados de las simulaciones muestran que la función continua tangente hiperbólica y exponencial tiene el menor error respecto a la simulación base de $1 \mu\text{s}$.

Se tiene un error absoluto porcentual máximo de 0.5 % utilizando funciones continuas en el modelado de la función PWM, lo cual indica que el uso de las funciones continuas permite incrementar el paso de integración ganando rapidez en la solución numérica de la simulación.

Algunas sugerencias para continuar con esta línea de investigación es experimentar dichas funciones dentro de algoritmos más robustos para la solución de sistemas eléctricos con el fin de cuantificar el tiempo de cómputo con respecto al software convencional de solución.

Agradecimiento

Los autores agradecen a la Universidad de Colima, PRODEP y CONACYT por el apoyo recibido para llevar a cabo esta investigación.

Referencias

- Galbraith, P. & Stillman, G. (2006). A Framework for Identifying Student Blockages During Transitions in the Modelling Process. *ZDM*, 38(2): 143-162.
- N. G. Hingorani & L. Gyugyi, *Understanding FACTS*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000.
- Sen, K. K. (1998). Static synchronous compensator-Theory modeling and applications. In *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting*.
- Acha, E., & Madrigal, M. (2001). *Power systems harmonics*. John Wiley & Sons, Inc.
- Segundo-Ramírez, J., & Medina, A. (2009). Modeling of FACTS devices based on SPWM VSCs. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(4), 1815-1823.

Contreras-Aguilar, L., & García, N. (2007). Periodic solutions of stiff systems using the limit cycle method and an implicit integration technique. In Power Engineering Conference, 2007. IPEC 2007. International (pp. 854-859). IEEE.

Lehn, P. W. (2002). Exact modeling of the voltage source converter. IEEE Transactions on Power Delivery, 17(1), 217-222.

Mohan, N., & Undeland, T. M. (2007). Power electronics: converters, applications, and design. John Wiley & Sons.