

MODELO PROMEDIO DE UN CONVERTIDOR CD-CD BIDIRECCIONAL.

Felix Quirino Morales¹, Edgar Peralta Sánchez^{1,2}, Pedro Celestino Castellanos Morales², Gerardo Mino Aguilar¹, Germán Ardul Muñoz Hernández¹, José Fermi Guerrero Castellanos¹.

¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Laboratorio Avanzado de Electrónica de Potencia, Tracción Eléctrica y Modelado
Av. Sn. Claudio y 18 sur, Col. Jardines de Sn. Manuel, Puebla, Pue. C.P. 72570
+52 (222) 2295500 ext 7419

felix.quirino@alumno.buap.mx, edgarps@hotmail.co.uk, gmino44@ieee.org, gmunoz64@yahoo.co.uk,
fguerrero@ece.buap.mx.

²Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Departamento de Ingeniería
Calle 21 Sur No. 1103, Barrio de Santiago, Puebla, Pue. C.P. 72410
+52 (222) 2299400
castellanos.649@gmail.com.

RESUMEN

El sistema de transporte colectivo METRO que circula actualmente en el DF cuenta con un Sistema de Tracción Eléctrica (STE) incapaz de reutilizar la energía regenerada a causa del frenado eléctrico; es por eso que se propone el uso de un Sistema de Recuperación Eléctrica (SRE) basado en supercapacitores (SC), con el cual es posible reducir el consumo energético requerido por los trenes en su fase de tracción.

El SRE propuesto cuenta con un convertidor CD-CD bidireccional de medio puente, gracias a él es posible almacenar la energía recuperada en un módulo de supercapacitores. Para determinar el correcto funcionamiento del SRE se precisó de una simulación en la cual se observa el funcionamiento de los sistemas interconectados (STE-SRE), debido a las características de dicha simulación se buscó la manera de agilizar el tiempo de cómputo, se optó por el desarrollo del modelo promedio del convertidor logrando así una mejora significativa en el tiempo de simulación.

Palabras Clave: Supercapacitores, Sistema de recuperación de energía, convertidor CD-CD, sistema de tracción eléctrica, vehículo eléctrico.

ABSTRACT

The public transport system METRO currently circulating in Mexico City has an Electric Traction System (ETS) than is unable to reuse the regenerated energy because of electric braking; that is why the use of an Energy Recovery System (ERS) based on supercapacitors (SC), with which it is possible to reduce the energy consumption required by trains in his pulling phase is proposed.

The proposed ERS counts with a bidirectional DC-DC converter half-bridge, because it is possible to store the energy recovered in a module of supercapacitors. To determine the correct operation of the ERS it is needed a simulation in which the operation of the interconnected systems (ETS-ERS) was observed, due to the characteristics of this simulation how to speed up the computation time was sought, he was chosen average development model converter achieving a significant improvement in simulation time.

Keywords: Supercapacitors, energy recovery system, DC-DC converter, electric drive system, electric vehicle drive

1. INTRODUCCIÓN

El METRO que circula en el DF funciona con un sistema de tracción basado en motores de corriente alterna o corriente directa. Las características eléctricas de estos motores hacen que durante el arranque y el frenado de los trenes las corrientes demandadas a su sistema de potencia sean altas; del orden de 3 a 6 veces de su valor nominal, provocando que sus fuentes de energía (subestaciones) estén sobredimensionadas y/o sometidas a fuertes descargas reduciendo su tiempo de vida útil.

Debido a la gran complejidad de los sistemas actuales se precisa del desarrollo de técnicas de modelado que permitan no sólo obtener resultados precisos si no también de forma rápida. Gracias a esto se propone el modelado promedio de un convertidor de medio puente bidireccional para su uso en sistema de recuperación de energía.

El convertidor de medio puente es ampliamente usado en el diseño de SRE, dicha topología se plantea en diferentes trabajos en los que normalmente funcionan conjuntamente con supercapacitores [1, 2, 3]. De igual manera es usado en el desarrollo de sistemas automotrices [4, 5], del mismo modo es aplicado a sistemas de tracción eléctrica de alta potencia como lo es el del METRO [6].

En este artículo se presenta el modelo promedio del convertidor CD-CD bidireccional de medio puente, por las condiciones de operación son mostradas las configuraciones reductor y elevador. Posteriormente, se presentan los resultados de la simulación gracias a ellos se confirma el correcto funcionamiento del sistema implementado. Por último, se presentan las conclusiones, alcances y/o limitaciones encontrados durante el desarrollo del trabajo.

2. MODELO DEL CONVERTIDOR

El convertidor de medio puente es un convertidor de CD-CD formado por una rama compuesta de dos interruptores y dos diodos en antiparalelo, así como un inductor y un capacitor (Figura 1).

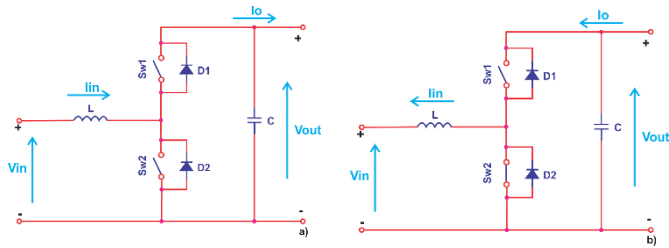


Figura 1. Topología del convertidor bidireccional, a) Operando como convertidor de bajada, b) Operando como convertidor de subida.

De acuerdo a la activación de los interruptores la corriente fluye de la fuente de entrada a la fuente de salida y viceversa, de este modo el flujo de la corriente a través del convertidor es bidireccional.

El funcionamiento de este convertidor depende en gran medida de la conmutación de los interruptores SW_1 y SW_2 y de los voltajes de entrada V_{in} y V_{out} . Puede ser utilizado como un convertidor elevador si se decide alimentar el circuito conectado a V_{in} y se conmuta el interruptor SW_2 y SW_1 se encuentra desactivado; de igual forma se utiliza como un convertidor reductor si se alimenta el circuito conectado a V_{out} conmutando SW_1 desactivando SW_2 , de este modo se busca disminuir las pérdidas en los diodos; sin embargo también puede ser doblemente alimentado por V_{in} y V_{out} y se puede decidir los lapsos en los que funciona como reductor o como elevador.

Para modelar el convertidor de medio puente se toma en cuenta sus dos modos de operación (reductor y elevador), siendo necesario el diseño de un convertidor de subida y uno de bajada con las mismas características de potencia. A continuación se muestra cada uno de estos convertidores.

2.1. Convertidor reductor

Como indica su nombre, produce un voltaje medio de salida más bajo que el voltaje de CD de entrada. En la Figura 2 se observa el diagrama esquemático de un convertidor reductor.

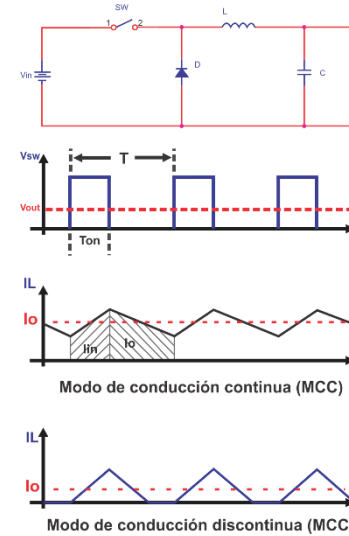


Figura 2. Configuración del convertidor reductor.

En el modo de conducción continua (MCC) el convertidor funciona de tal modo que la corriente en el inductor no cae a cero, mientras que funcionando en el modo de conducción discontinua (MCD) la corriente a través del inductor presenta intervalos en cero, en este modo de operación el capacitor debe ser capaz de suministrar la corriente que demanda la carga (Figura 2).

En la Figura 3 se muestra el comportamiento del convertidor dependiendo del estado del interruptor, cuando este se cierra durante el tiempo t_{on} el diodo se encuentra polarizado inversamente, provocando que el voltaje en las terminales del diodo sea igual al voltaje de la fuente de entrada y el voltaje en el inductor es positivo, por lo tanto habrá un incremento lineal en la corriente que pasa a través del inductor. Por otra parte cuando el interruptor se abre en t_{off} el voltaje en el inductor cambia de polaridad, ya que se desconecta la fuente de entrada provocando que el diodo sea polarizado directamente y la corriente fluya a través de él hacia la carga.

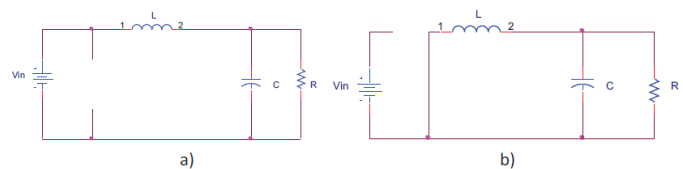


Figura 3. Estados de operación del convertidor reductor, a) interruptor cerrado, b) interruptor abierto.

La ecuación que relaciona el voltaje de salida con el voltaje de entrada en el convertidor reductor se muestra a continuación.

$$V_o = V_{in} D \quad (1)$$

Donde D es el ciclo de trabajo aplicado al interruptor.

Mientras que en la ecuación 2 se muestra la expresión que relaciona las corrientes de entrada y salida.

$$\frac{I_o}{I_{in}} = \frac{1}{D} \quad (2)$$

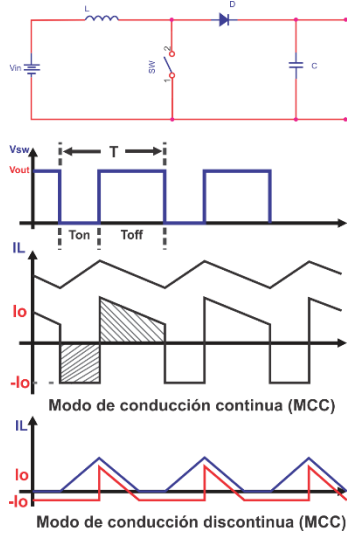


Figura 4. Configuración del convertidor elevador.

2.2. Convertidor elevador

En este tipo de convertidor la tensión en la salida es mayor a la de la entrada. La topología de este convertidor se muestra en la Figura 4.

La corriente en el inductor en modo continuo es mayor que cero. Cuando el interruptor se cierra durante el tiempo t_{on} el voltaje que fluye a través del inductor es igual al voltaje de la fuente ($V_L = V_{in}$) y el diodo se polariza inversamente, por lo que la corriente del inductor incrementa de forma lineal, la carga es alimentada por el capacitor. Cuando el interruptor se abre en t_{off} el voltaje en el inductor cambia de polaridad ya que se ha desconectado la fuente de entrada, esto provoca que se polarice el diodo directamente y que la corriente empiece a fluir hacia la carga, por lo que el voltaje en el inductor es igual a la diferencia de los voltajes de entrada-salida ($V_L = V_{in} - V_o$) (Figura 5).

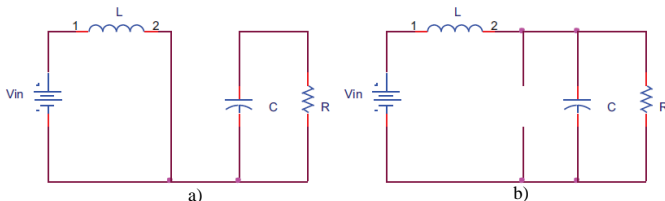


Figura 5: Estados de operación del convertidor elevador, a) interruptor cerrado, b) interruptor abierto.

La ecuación que relaciona el voltaje de salida con el voltaje de entrada en el convertidor reductor es mostrada a continuación.

$$\frac{V_{in}}{V_o} = 1 - D \quad (3)$$

Mientras que en la ecuación 4 se observa la expresión que relaciona las corrientes de entrada y salida.

$$\frac{I_o}{I_{in}} = 1 - D \quad (4)$$

3. SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR

El modelo promedio del convertidor desarrollado se muestra en la Figura 6, en este modelo se creó un bloque que toma la decisión para utilizar un modo u otro del convertidor mediante los interruptores SB y SS. El estado de los interruptores en modo reductor son: SB=on y SS=off, mientras que en modo elevador son: SB=off y SS=on.

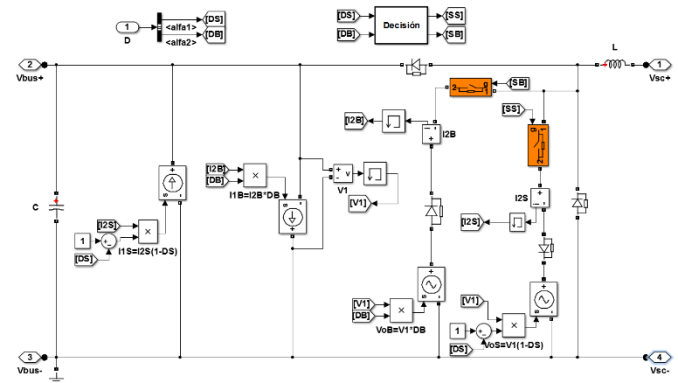


Figura 6: Diagrama de la simulación del convertidor bidireccional

Para la simulación se toma un ciclo de trabajo fijo para cada caso de funcionamiento del convertidor (reductor o elevador), además es conectado a una red de prueba conformada por un bus de CD conectado al lado izquierdo del convertidor y un capacitor conectado al otro extremo. El capacitor simula la conexión de este tipo de convertidores en sistemas de recuperación de energía, donde es necesario transferir carga de una fuente de alimentación a otra (Figura 7).

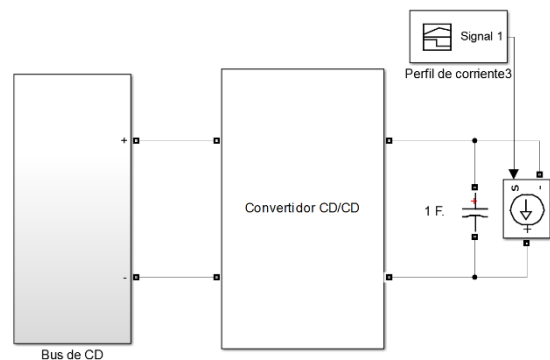


Figura 7: Simulación del convertidor CD-CD

4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

De las Figuras 8-11 se muestran las gráficas obtenidas al comparar el comportamiento del modelo promedio desarrollado y el modelo eléctrico del convertidor. La línea roja representa el comportamiento del modelo eléctrico, mientras que la línea punteada azul representa el comportamiento del modelo promedio.

En la Figura 8 se observa el comportamiento en corriente de la fuente de alimentación. Inicialmente el convertidor se encuentra apagado hasta 0.1 segundos donde comienza a funcionar en modo elevador, provocando que la corriente en la fuente sea positiva, ya que esta absorbe energía del capacitor de carga. A los 0.25 segundos de simulación el convertidor funciona en su modo reductor, logrando que la corriente en la fuente cambie de signo debido a que transfiere energía hacia el capacitor de carga.

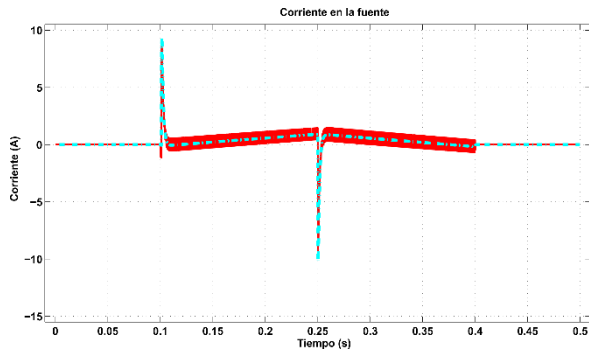


Figura 8: Comportamiento de la corriente en la Fuente de alimentación

En la Figura 9 se muestra el comportamiento de la corriente que circula a través del convertidor, de igual forma que en la gráfica anterior se tiene que el convertidor se comporta en modo subida de 0.1 a 0.25 segundos y en modo bajada de 0.25 a 0.5 segundos, como es de esperarse se observa un cambio de polaridad en la corriente debido al modo de operación del convertidor.

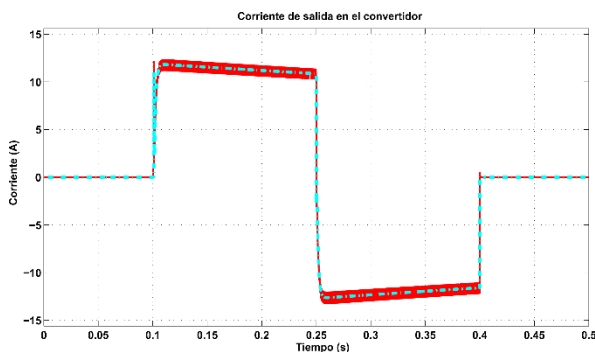


Figura 9: Comportamiento de la corriente en el convertidor de medio puente.

En la Figura 10 se muestra el comportamiento del voltaje en el bus de CD, cuando el convertidor se encuentra en modo subida la energía almacenada en el capacitor se transfiere al

bus de CD por lo que el voltaje de este tiende a estabilizarse alrededor del voltaje inicial del bus, del mismo modo cuando el convertidor funciona como reductor la energía excedente en el bus es absorbida por el capacitor, esto da como resultado que el nivel de voltaje en el bus de CD vuelva a estabilizarse alrededor del valor nominal de la fuente que en este caso es de 806V.

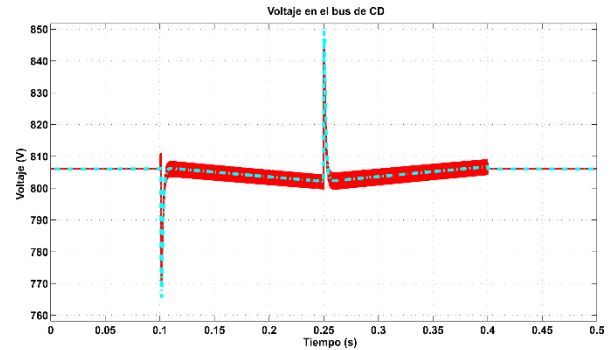


Figura 10: Comportamiento del voltaje en el bus de CD.

Por último en la Figura 11 se muestra el comportamiento de la corriente presente en el inductor del convertidor, se espera que la corriente en el inductor cambie de polaridad cuando el convertidor pase de un modo de operación al otro.

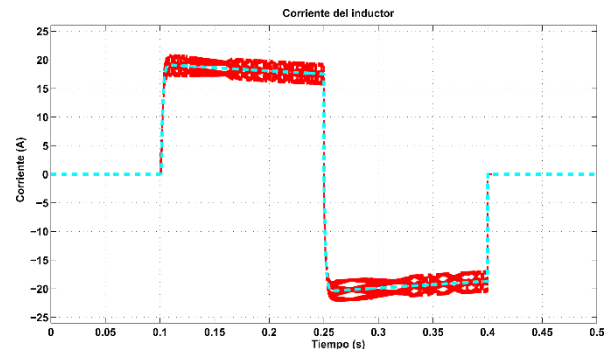


Figura 11: Comportamiento de la corriente en el inductor.

5. CONCLUSIONES

El diseño de Sistemas de Recuperación de Energía es un tema incipiente en México. Debido su complejidad de diseño se precisa de una forma de modelado que permita la agilización del proceso de desarrollo. Al utilizar el modelo promedio del convertidor CD-CD es posible eliminar las oscilaciones presentes en el modelo eléctrico del mismo, dando como resultado la disminución del tiempo de procesamiento en la simulación del SRE.

En este trabajo se abordó el modelo de un convertidor de medio puente, comprobando que el funcionamiento del modelo promedio y del modelo eléctrico es el mismo, al usar este modelo en una simulación más compleja se observa que el tiempo de procesamiento disminuye significativamente.

Esta forma de modelado puede ser utilizada en cualquier aplicación donde se precise del uso de un convertidor CD-CD

sin importar la potencia, frecuencia o dispositivo de conmutación a usar en la aplicación. De igual manera es posible utilizar este modelo para simular convertidores más complejos como lo es un convertidor interleaved.

6. REFERENCIAS

- [1] W. L.-l. Z. X.-j. L. H.-q. ZHANG Yi-cheng, «Desing of supercapacitor-based energy storage systems for metro vehicles and its control rapid implentation.,» de *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Harbin, China, septiembre 2008.
- [2] H. G. F. G. A. B. Mamadou Bailo Camara, «Design and new control of DC/DC converters to share energy between supercapacitors and batteries in hybrid vehicles.,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, nº 5, pp. 2721-2735, septiembre 2008.
- [3] G. Guidi, «Energy management system on board of electric vehicles, based on power electronics,» Trondheim, marzo 2009.
- [4] M. E. Ortúzar, «Design, implentation and evaluation of an auxiliary energy system for electric vehicles, based on ultracapacitors and buck.boost converter,» Santiago de Chile, julio 2005.
- [5] I. I. J. Hernández, «Simulación de un sistema de recuperación de energía basado en supercapacitores con aplicación en tracción eléctrica.,» Mexico, julio 2011.
- [6] W. L.-l. W. B. L. H.-q. ZHANG Yi-cheng, «Modeling and simulation of the 1500V METRO supply network and vehicles,» de *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Harbin, China, Septiembre 2008.