

Convertidor Dual-Active-Bridge para Almacenamiento de Energía en Supercondensador

Coronado-Vázquez J.* Cárdenas V.* Aganza-Torres A.*
 Álvarez-Salas R.* Alcalá J.**

* Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P. 78290 (e-mail: juancarlos.corvaz@gmail.com, vcardena@uaslp.mx, alejandro.aganza@gmail.com, ralvarez@uaslp.mx)

** Facultad de Ingeniería Electromecánica, Universidad de Colima, Colima-México (e-mail: janethalcala@ucol.mx)

Resumen: Este artículo se enfoca al estudio del convertidor de doble puente activo (Dual-Active-Bridge, DAB por sus siglas en inglés) para una aplicación de almacenamiento de energía eléctrica, controlando la carga y descarga de un supercondensador. El proceso de carga y descarga está basado en la de transferencia de potencia del convertidor en operación de estado estable, así como la interacción con el supercondensador desde el punto de vista de energía almacenada en dicho elemento. El perfil de carga propuesto tiene el objetivo de poder suministrar/extraer energía durante un tiempo específico a potencia constante. Se presentan resultados de simulación del convertidor.

Keywords: Convertidor DAB, supercondensador, almacenamiento de energía.

1. INTRODUCCIÓN

Las fuentes convencionales de energía basadas en petróleo, carbón y gas natural han sido parte importante del progreso económico global. Sin embargo, debido a su impacto ambiental y a la creciente demanda de energía, se ha impulsado la búsqueda de alternativas energéticas basadas en fuentes renovables. Con el desarrollo tecnológico de los últimos años se han obtenido nuevas técnicas y métodos que tienen como objetivos la generación de energía eléctrica y el cuidado del medio ambiente. Tecnologías basadas en sistemas eólicos y solar fotovoltaicos se han desarrollado rápidamente siendo una solución viable para la diversificación de la matriz energética. Se prevé que la generación mundial de electricidad a partir de fuentes de energía renovable crezca 2.7 veces entre 2010 y 2035 (Ellabban et al., 2014).

La Electrónica de Potencia es una parte esencial en la tecnología moderna para fuentes de energías renovables, proporcionando las herramientas necesarias para poder aprovechar nuevos esquemas de generación de energía eléctrica. Los convertidores de electrónica de potencia se emplean para procesar la energía eléctrica generada y permiten acoplar sistemas de corriente directa a sistemas de corriente alterna y viceversa (convertidores *CD/CA* y *CA/CD* respectivamente), estos convertidores deben ser capaces de operar ante diferentes condiciones en el sistema eléctrico fuera de sus parámetros ideales, tales como tensión, frecuencia, potencia entre otros. La Figura 1 muestra diferentes acoplamientos de sistemas eléctricos a través de convertidores.

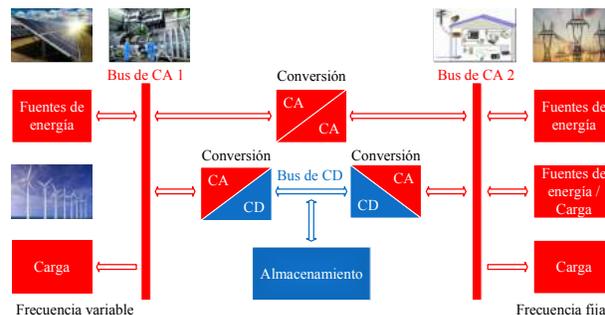


Figura 1. Interconexión de los sistemas eléctricos mediante convertidores.

1.1 Sistemas para almacenamiento de energía

Un tópico central de la investigación actual en energías renovables es el almacenamiento de energía eléctrica para dar soporte de operación a la red eléctrica. Se han propuesto numerosas soluciones, tanto con almacenamiento en otras formas de energía como soluciones de almacenamiento directo. En (Khaligh and Li, 2010) se presenta una revisión y comparativa de los principales sistemas de almacenamiento de energía en convertidores de electrónica de potencia para vehículos eléctricos y sistemas híbridos, donde las baterías y los *ultracondensadores* (también conocidos como *supercondensadores* (Ribeiro et al., 2001)) son las opciones más desarrolladas. Las características más importantes que se consideran en dichos sistemas son la densidad de energía, densidad de potencia, vida útil, costo y mantenimiento. Las baterías generalmente presentan altas densidades de energía mientras que los



Figura 2. Esquema general del SST.

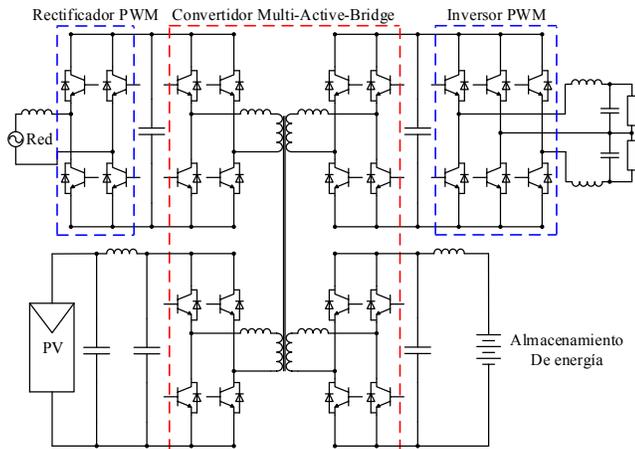


Figura 3. Topología del SST basado en un convertidor DAB.

supercondensadores tienen altas densidades de potencia. Además los supercondensadores presentan un ciclo de vida largo con alta eficiencia y una respuesta rápida para carga o descarga. La aplicación de supercondensadores como sistemas de almacenamiento se debe principalmente a dos de sus características: a la alta densidad de potencia y alta eficiencia debido a su baja resistencia interna. Esta última característica permite al supercondensador suministrar un pico de corriente alto durante la descarga, pero también puede generar un transitorio de corriente durante el proceso de carga inicial, puesto que este fenómeno se refleja como un corto circuito (Khaligh and Li, 2010), (Ribeiro et al., 2001). Una característica a resaltar en estos sistemas es que la tensión es directamente proporcional al estado de carga, y en conjunto con una interfaz de electrónica de potencia permite que el supercondensador funcione en un amplio rango de tensión. Existen aplicaciones de almacenamiento de energía basadas en la topología del transformadores de estado sólido (SST, por sus siglas en inglés) (Figura 2), que utilizan como elemento principal de procesamiento de energía el convertidor Dual-Active-Bridge (DAB) así como una variante de este, el Multi-Active-Bridge (MAB), donde se incluyen puertos derivados con acoplamiento magnético para integrar ya sea sistemas de generación renovable o sistemas para almacenamiento de energía (Figura 3) (She et al., 2013), (Falcones et al., 2013).

Este trabajo presenta el análisis de un convertidor DAB para una aplicación de almacenamiento de energía en banco de supercondensadores. El análisis parte de la

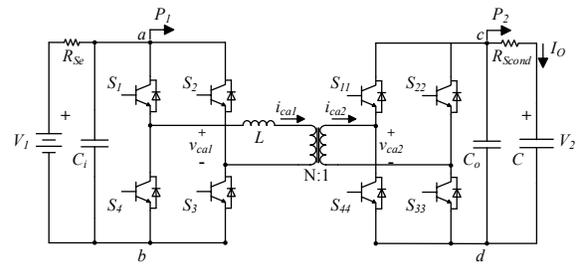


Figura 4. Topología del convertidor Dual-Active-Bridge.

condición de transferencia de potencia en el convertidor en estado estable, para después relacionar el nivel de tensión de salida del convertidor con el estado de carga del supercondensador. El objetivo principal es mantener una transferencia de potencia constante en el convertidor durante un lapso y un determinado rango de tensión de operación del supercondensador. Los casos de estudio considerados son la carga y descarga del supercondensador con un perfil de inyección/extracción de potencia basado en la cantidad de energía almacenada en el supercondensador ($\Delta E = PT$), aprovechando así la bidireccionalidad de transferencia de potencia que presenta el convertidor DAB. También se presenta una estrategia para el proceso inicial de carga del supercondensador, limitando el pico de corriente al valor máximo nominal de operación del convertidor. Se presentan resultados de simulación para un sistema operando a una potencia nominal de 500 W, con un rango de tensión de 20-55 V.

2. CONVERTIDOR DUAL-ACTIVE-BRIDGE

La topología DAB fue presentada en (De Doncker et al., 1991) como una solución en el proceso de conmutación para aplicaciones aeroespaciales donde se requería altas densidades de potencia en los convertidores. Otras aplicaciones donde el uso del DAB destaca son: la implementación de fuentes de alimentación ininterrumpida, vehículos eléctricos, sistemas de energía regenerativa (celdas combustibles) y SST entre otras. Algunas de las ventajas que ofrece la topología son: alta densidad de potencia, flujo bidireccional de potencia, aislamiento galvánico, número reducido de componentes pasivos, y posibilidad de operación de conmutación suave (ZVS, zero-voltage switching). (She et al., 2013), (Jiang et al., 2014). La topología DAB (Figura 4) consiste en dos convertidores fuentes de tensión (VSC) puente completo conectados a través de un inductor de acoplamiento L y un transformador de media o alta frecuencia. La fuente alimentación V_1 puede ser cualquier fuente de CD (panel fotovoltaico, rectificador en línea etc.); la tensión de salida V_2 es la tensión del supercondensador C . La inductancia externa L tiene dos funciones principales: como elemento para limitar la cantidad de energía transferida y para ayudar en las condiciones que permiten la conmutación suave. Los condensadores de entrada y salida, C_i y C_o respectivamente, son dimensionados para mantener el rizo de tensión, así como para filtrar componentes de alta frecuencia. (De Doncker

et al., 1991), (Zhao et al., 2013), (Qin, 2012), (Krismer, 2010), (Mi et al., 2008), (Seyezhai, 2011). Cada puente se controla para generar una señal de tensión cuadrada de media o alta frecuencia que en conjunto con la inductancia externa y un control de la fase de una respecto a la otra, regula la transferencia de potencia entre las fuentes de CD. El desplazamiento controla directamente los niveles de tensión a través del inductor externo L regulando la corriente a través de dicho elemento, controlando así la dirección y la cantidad de potencia transferida. El flujo de potencia toma la dirección del puente que está adelantado en fase.

2.1 Operación en estado estable del convertidor DAB

Para poder plantear el análisis en estado estable del convertidor, los circuitos de puente completo de lado primario y secundario del transformador pueden reemplazarse por el circuito equivalente como fuentes de tensión variantes en el tiempo, $v_{ca1}(t)$ y $v_{ca2}(t)$ respectivamente (Figura 5c). Dichas fuentes son interconectadas a través del inductor L , que representa el arreglo serie equivalente entre la inductancia auxiliar externa y la inductancia de dispersión del transformador (el valor del inductor externo es considerablemente mayor que el valor de la inductancia de dispersión); se considera la relación de transformación para poder referir el circuito a uno de los lados del transformador, en este caso se refiere el circuito hacia el lado de v_{ca1} . Para el análisis del circuito eléctrico equivalente se toma las siguientes consideraciones: la tensión de alimentación V_1 es de valor constante, el supercondensador es lo suficientemente grande en valor, por lo que durante varios períodos de conmutación se puede considerar como una fuente de tensión constante V_2 ; las pérdidas en el circuito, al igual que las capacitancias parásitas son despreciadas; la inductancia de magnetización equivalente en paralelo es considerablemente mayor que la inductancia externa L por lo que se desprecia en el análisis. Las formas de onda características mostradas en las Figuras 5a y 5b representan la transferencia de potencia desde $v_{ca1}(t)$ a $v_{ca2}(t)$ y de $v_{ca2}(t)$ a $v_{ca1}(t)$ respectivamente. Durante la operación en estado estable, las tensiones $v_{ca1}(t)$ y $v_{ca2}(t)$ toman valores de $\pm V_1$ y $\pm V_2$ respectivamente; la corriente en el inductor así como las tensiones mencionadas se repiten cada medio ciclo de conmutación.

La corriente en el primer semiciclo está dada por (1) y (2); la tensión V_2' es la tensión del puente secundario reflejada al lado primario del transformador ($V_2' = nV_2$).

$$i_L(t) = i_L(t_0) + \frac{(V_1 + V_2')}{L}(t) \quad \forall \quad 0 < t < t_\phi \quad (1)$$

$$i_L(t) = i_L(t_\phi) + \frac{(V_1 - V_2')}{L}(t - t_1) \quad \forall \quad t_\phi < t < \frac{T_s}{2} \quad (2)$$

Dada la simetría de la corriente a través del inductor y con $t_\phi = \phi/2\pi f_s$, se obtienen las expresiones (3) y (4) que

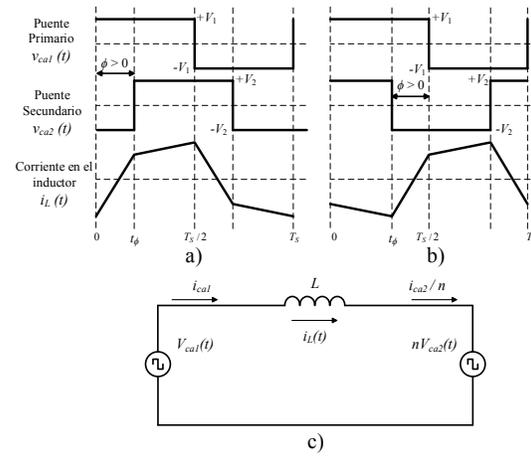


Figura 5. Formas de onda y circuito equivalente del convertidor DAB.

son las corrientes en los instantes t_0 y t_ϕ respectivamente. La corriente en el instante $T_s/2$ es de signo contrario al del instante inicial t_0 , dicha expresión corresponde valor máximo de la corriente y se muestra en (5), por lo que se aprecia que el desfase entre las fuentes de tensión afecta directamente en la magnitud de dicha corriente.

$$i_L(t_0) = \frac{(V_2' - V_1)\pi - 2\phi V_2'}{4\pi f_s L} \quad (3)$$

$$i_L(t_\phi) = \frac{(V_2' - V_1)\pi + 2\phi V_1}{4\pi f_s L} \quad (4)$$

$$i_L(max) = \frac{(V_1 - V_2')\pi + 2\phi V_1}{4\pi f_s L} \quad (5)$$

La fuente de tensión $v_{ca1}(t)$ y la tensión equivalente en el supercondensador, son las que transfieren o reciben potencia instantánea, la cual se puede calcular mediante las expresiones (6) y (7) para dichas fuentes respectivamente, donde $i_L'(t) = ni_L(t)$ es la corriente referida hacia el lado secundario del transformador.

$$p_1(t) = v_{ca1}(t)i_L(t) \quad (6)$$

$$p_2(t) = v_{ca2}(t)i_L'(t) \quad (7)$$

Aprovechando la simetría de la forma de onda de la corriente la potencia promedio se puede calcular con (8) y (9).

$$P_1 = \frac{2}{T_s} \int_{t_0}^{\frac{T_s}{2} + t_0} v_{ca1}(t)i_L(t) \cdot dt \quad (8)$$

$$P_2 = \frac{2}{T_s} \int_{t_0}^{\frac{T_s}{2} + t_0} v_{ca2}(t)i_L'(t) \cdot dt \quad (9)$$

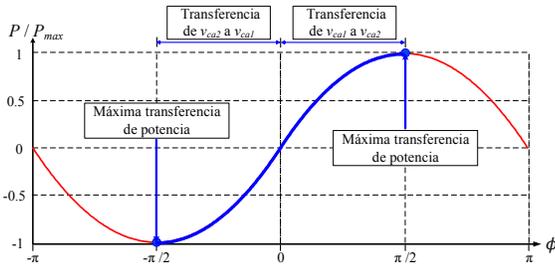


Figura 6. Curva normalizada de transferencia de potencia.

Dado que el análisis del convertidor se realiza despreciando las pérdidas, se observa que $P_1 = P_2$. Este resultado se obtiene para un desplazamiento de fase positivo $0 < \phi < \pi$, y de manera similar se obtiene para un desplazamiento negativo $-\pi < \phi < 0$, por lo que la potencia promedio transferida hacia/desde las terminales (a,b) y (c,d) (Figura 4) en todo el rango de desfaseamiento $-\pi < \phi < \pi$ se expresa como:

$$P(\phi) = P_1(\phi) = P_2(\phi) = \frac{V_1 V_2' \phi (\pi - |\phi|)}{2\pi^2 f_s L} \quad (10)$$

La máxima transferencia de potencia se puede derivar en términos de los parámetros de diseño del convertidor, donde las tensiones V_1 y V_2' , el inductor L y la frecuencia de conmutación f_s , son valores constantes, por lo que la potencia máxima es función del desfaseamiento ϕ . Tomando a $K = \frac{\pi \omega L}{V_1 V_2'}$ se obtiene la expresión:

$$\frac{P}{K} = \phi(\pi - |\phi|) \quad (11)$$

La máxima transferencia de potencia se da en $\pi/2$. Evaluando la expresión (10) en su máximo punto se obtiene la condición de potencia máxima para el convertidor DAB.

$$P_{max} = \frac{V_1 V_2'}{8f_s L} \quad (12)$$

Normalizando las expresiones para transferencia de potencia y máxima transferencia se obtiene la expresión (13), y a partir de ésta se puede obtener el comportamiento de la transferencia de potencia respecto al desfaseamiento como se muestra en la Figura 6.

$$\frac{P}{P_{max}} = \frac{4}{\pi^2} \phi(\pi - |\phi|) \quad (13)$$

2.2 Análisis para carga y descarga de supercondensador

Las expresiones (14) y (15) muestran el nivel de energía en el supercondensador respecto a las tensiones V_{O1} y V_{O2} , que son las de tensiones máxima y mínima de operación del supercondensador respectivamente. Dichos niveles alternan cuando el supercondensador está totalmente cargado o bien cuando se encuentra a un nivel mínimo de

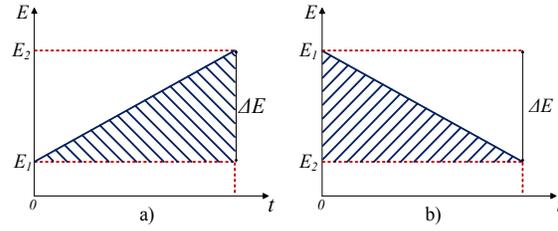


Figura 7. Energía almacenada en el supercondensador durante los procesos de carga (a) y descarga (b).

carga; el cambio de energía se expresa en (16) y puede observarse en la Figura 7.

$$E_1 = \frac{1}{2} C (V_{O1})^2 \quad (14)$$

$$E_2 = \frac{1}{2} C (V_{O2})^2 \quad (15)$$

$$\Delta E_{1,2} = \frac{1}{2} C [(V_{O1})^2 \pm (V_{O2})^2] \quad (16)$$

La energía almacenada ΔE se representa por la potencia por unidad de tiempo $\Delta E = PT$, y se deriva la expresión (17).

$$PT = \Delta E_{1,2} = \frac{1}{2} C [(V_{O1})^2 \pm (V_{O2})^2] \quad (17)$$

De la expresión (17) se desea que los parámetros de potencia en el convertidor como la tensión de entrada y el valor del supercondensador sean constantes, por lo que la tensión de salida evolucionará de acuerdo al nivel de energía del supercondensador; dicha relación se muestra en (18), donde V_{osc} es la tensión inicial del supercondensador.

$$v_2(t) = \sqrt{(V_{osc})^2 - \frac{2P}{C}(t)} \quad (18)$$

De un análisis similar se puede obtener la expresión para el proceso de carga.

$$v_2(t) = \sqrt{\frac{2P}{C}(t) - (V_{osc})^2} \quad (19)$$

La tensión en el supercondensador es la tensión de salida del convertidor, y para lograr el nivel tensión necesaria para transferir un nivel de energía específico se debe variar el ángulo de desfase entre los puentes del convertidor. De la expresión (10) e introduciendo la variación de la tensión de salida se puede encontrar el ángulo para controlar el proceso de carga/descarga a potencia constante.

$$\phi(t) = \pm \left(\frac{\pi}{2}\right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{8f_s LP}{nv_2(t) V_1}} \right] \quad (20)$$

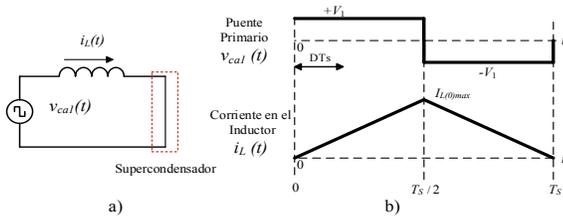


Figura 8. Circuito equivalente en condiciones iniciales cero.

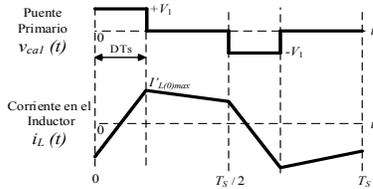


Figura 9. Formas de onda del proceso de arranque suave.

Se debe garantizar la solución real de la ecuación (20), por lo que el valor del inductor L es un parámetro crítico; un signo positivo en (20) indica inyección de potencia hacia el supercondensador y el signo negativo indica extracción del supercondensador hacia el convertidor.

2.3 Carga inicial del supercondensador

Un punto crítico de la aplicación presentada, es el pico de corriente en condiciones iniciales, debido a que éste se refleja como un corto circuito, siendo la inductancia L el único elemento para limitar la magnitud de dicho transitorio. La Figuras 8a y 8b muestran el circuito equivalente y las formas de onda respectivamente, durante un periodo de conmutación en condiciones iniciales con el supercondensador descargado; es posible obtener la expresión (21) para determinar la magnitud del pico de corriente.

$$I_{L(0)max} = \frac{T_s}{2L} V_1 \quad (21)$$

Una estrategia adecuada para limitar el pico de corriente es realizar un proceso de precarga (Inoue and Akagi, 2007), el cual consiste en variar el ciclo de trabajo del puente primario mientras los interruptores del puente secundario se apagan, dejando operar en forma libre los diodos de libre circulación del puente completo, trabajando como un puente rectificador convencional. El proceso mencionado se conoce como procedimiento de *arranque suave* y la expresión que describe la magnitud del pico de corriente en función del ciclo de trabajo durante dicho proceso (22); las formas de onda características se muestran en la Figura 9.

$$I'_{L(0)max} = \frac{DT_s}{2L} V_1 \quad (22)$$

Tabla 1. Parámetros del Sistema

Parámetro	Valor
Potencia nominal,	500 W
Tensión entrada, V_1	120 V
Tensión máxima de salida, V_{2max}	55 V
Tensión mínima de salida, V_{2min}	20 V
Frecuencia de conmutación, f_s	25 kHz
Inductancia, L	45 μ H
Supercondensador C	0.3 F

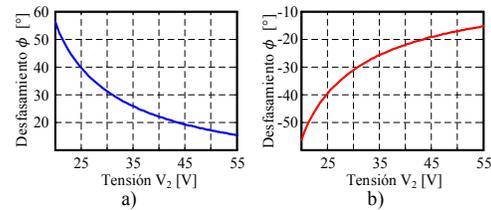


Figura 10. Desfasamiento contra tensión, a) Proceso de carga, b) Proceso de descarga.

3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Para verificar y obtener resultados acerca del análisis de transferencia de potencia se presenta el caso de simulación con los parámetros de la Tabla 1. El convertidor se diseñó para que el supercondensador sea capaz de almacenar/entregar 500 W (500 J/seg) durante un lapso de 0.78 Seg. La transferencia de energía durante el proceso de carga y descarga será de 39 kJ. La Figura 10 muestra los perfiles de tensión en el supercondensador en función de la señal de desfasamiento ϕ , la cual garantiza una transferencia de energía de 500 W durante todo el proceso de carga y descarga. La Figura 11 muestra las magnitudes de tensión y corriente en el supercondensador, durante el proceso de carga y descarga. En un inicio se inyecta potencia al condensador y posteriormente se extrae, dichos flujos se muestran en la Figura 12. El comportamiento de la corriente a través del inductor se muestra en la Figura 13, donde se observa una pendiente negativa en el proceso de carga, debido a que el supercondensador incrementa su nivel de tensión, mientras que en el proceso de descarga la pendiente crece puesto que la tensión en el supercondensador disminuye. Estas pendientes son una respuesta para mantener la transferencia de potencia constante; la variación en las formas de onda de la corriente a través del inductor corresponden al desfase entre los puentes del convertidor; un mayor desfase produce un incremento en la pendiente y por consecuencia una mayor magnitud de corriente. En esta aplicación el valor pico máximo de corriente es de 23.03 A (Figura 13), por lo que el valor de ciclo útil D para que no sobrepase el valor máximo de corriente en condiciones iniciales se deriva de (22). La Figura 14 muestra los resultados para el proceso de precarga.

$$D = \frac{2L I'_{L(0)max}}{V_1 T_s} = \frac{(23.03A)(2)(45\mu H)}{(120V)(40\mu S)} = 0.43 \quad (23)$$

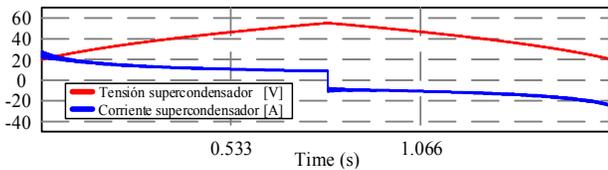


Figura 11. Carga y descarga de supercondensador.

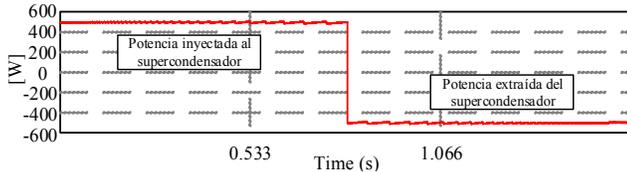


Figura 12. Inyección y extracción de potencia en el supercondensador.

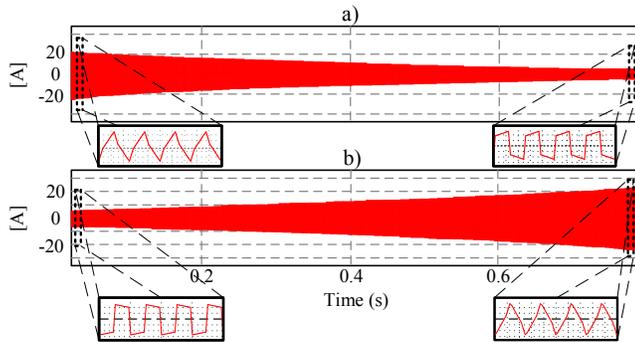


Figura 13. Corriente a través del inductor L , a) Proceso de carga, b) Proceso de descarga

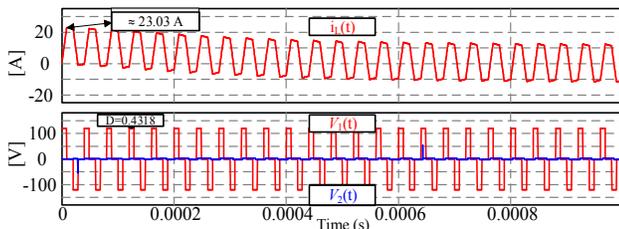


Figura 14. Procedimiento de precarga

4. CONCLUSIONES

A partir de los análisis presentados, se verificó la idea planteada para la transferencia de potencia en el convertidor DAB, hacia y desde el supercondensador. El perfil propuesto de carga y descarga que relaciona el nivel de energía con la tensión del supercondensador, cumple en todo el rango de operación con las condiciones del sistema en estado estable.

El proceso de operación de transferencia de potencia constante implica un ajuste continuo del ángulo de desfase, y tiene éste una relación no lineal con la tasa de energía, dicha relación presenta un comportamiento similar a la dinámica de la tensión en un condensador. También se determina que la condición inicial de ope-

ración donde el supercondensador está descargado es un punto crítico, siendo necesario operar un ciclo de arranque suave, evitando saturación magnética y fallas por sobrecarga en los semiconductores.

REFERENCIAS

- De Doncker, R.W., Divan, D.M., and Kheraluwala, M.H. (1991). A three-phase soft-switched high-power-density dc/dc converter for high-power applications. *IEEE transactions on industry applications*, 27(1), 63–73.
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., and Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748–764.
- Falcones, S., Ayyanar, R., and Mao, X. (2013). A dc–dc multiport-converter-based solid-state transformer integrating distributed generation and storage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(5), 2192–2203.
- Inoue, S. and Akagi, H. (2007). A bidirectional dc–dc converter for an energy storage system with galvanic isolation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(6), 2299–2306.
- Jiang, J., Bao, Y., and Wang, L.Y. (2014). Topology of a bidirectional converter for energy interaction between electric vehicles and the grid. *Energies*, 7(8), 4858–4894.
- Khaligh, A. and Li, Z. (2010). Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, 59(6), 2806–2814.
- Krismer, F. (2010). *Modeling and optimization of bidirectional dual active bridge DC-DC converter topologies*. Ph.D. thesis, ETH Zurich.
- Mi, C., Bai, H., Wang, C., and Gargies, S. (2008). Operation, design and control of dual h-bridge-based isolated bidirectional dc–dc converter. *IET Power Electronics*, 1(4), 507–517.
- Qin, H. (2012). *Dual active bridge converters in solid state transformers*. Missouri University of Science and Technology.
- Ribeiro, P.F., Johnson, B.K., Crow, M.L., Arsoy, A., and Liu, Y. (2001). Energy storage systems for advanced power applications. *Proceedings of the IEEE*, 89(12), 1744–1756.
- Seyezhai, R. (2011). Performance evaluation of modulation strategies for dual active bridge multiport dc–dc converters. *IOSR Journal of Engineering*, 1(1), 077–083.
- She, X., Huang, A.Q., and Burgos, R. (2013). Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1(3), 186–198.
- Zhao, T., Wang, G., Bhattacharya, S., and Huang, A.Q. (2013). Voltage and power balance control for a cascaded h-bridge converter-based solid-state transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(4), 1523–1532.