

Convertidores balanceadores de voltaje: Estado del arte

Fidel Alejandro Castro Espinosa

Instituto Tecnológico de Celaya, Dpto. de Ingeniería Electrónica, Av. Tecnológico y A. García-Cubas s/n,
Col. FOVISSSTE, C.P. 38010, Celaya, Gto., México, Teléfono: (+52) 461 662 5163 ó 64
fidel_alejandro_@hotmail.com

Elías José Juan Rodríguez Segura

Instituto Tecnológico de Celaya, Dpto. de Ingeniería Electrónica, Av. Tecnológico y A. García-Cubas s/n,
Col. FOVISSSTE, C.P. 38010, Celaya, Gto., México, Teléfono: (+52) 461 662 5163 ó 64
elias.rodriguez@itcelaya.edu.mx

Ciro Alberto Núñez Gutiérrez

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado Facultad de Ingeniería Dr. Manuel Nava #8, Zona
Universitaria, C.P. 78290, San Luis Potosí, S.L.P., México, Teléfono y Fax: (+52) 48 173381
calberto@uaslp.mx

Resumen

Las microredes han sido propuestas como una alternativa para la integración de módulos de energía distribuida, los cuales tienen un menor impacto ambiental, además se han presentado estudios comparativos entre sistemas de distribución de energía en CD y el convencional en CA, resultando favorable trabajar en CD. Es por ello que actualmente se están desarrollando microredes con sistemas de distribución en corriente directa. Tradicionalmente un bus de CD está compuesto por dos hilos (positivo y negativo), sin embargo un bus de dos hilos no es suficiente para cubrir las necesidades de todos los tipos de cargas y es por ello que se opta por un sistema de distribución de 3 hilos (positivo, negativo y neutro). Estos últimos tienen un problema de desbalance de voltaje al conectar cargas entre uno de los rieles y el neutro, siendo necesario un convertidor que regule dichos desbalances en el bus. En este artículo se

presenta una revisión de los convertidores balanceadores de voltaje reportados en la literatura.

Palabra(s) Clave(s): balanceador de voltajes, micro-redes, sistema de distribución en CD.

1. Introducción

Se sabe que la demanda energética está ligada al acelerado crecimiento poblacional, un estudio realizado estima que el consumo mundial de energía eléctrica creció 3.3% promedio anual durante el periodo de 1999-2009, alcanzando 16,764.4 Terawatts-hora (TWh) [1]. Esta tendencia fue impulsada por el aumento económico de ciertos países, lo que propició la urbanización de la población y un cambio estructural en su consumo de energía. Aunado a lo anterior, el estilo de vida actual demanda un mayor consumo energético, lo que ha provocado que las reservas de combustibles fósiles comiencen a agotarse. En México, de acuerdo a la secretaría de energía el consumo de combustóleo y diésel ha tenido una disminución desde el año 2013, y durante el 2014 se presentó una reducción de aproximadamente treinta y cuarenta mil barriles respectivamente, en relación al año 2013 (Ver Fig. 1).

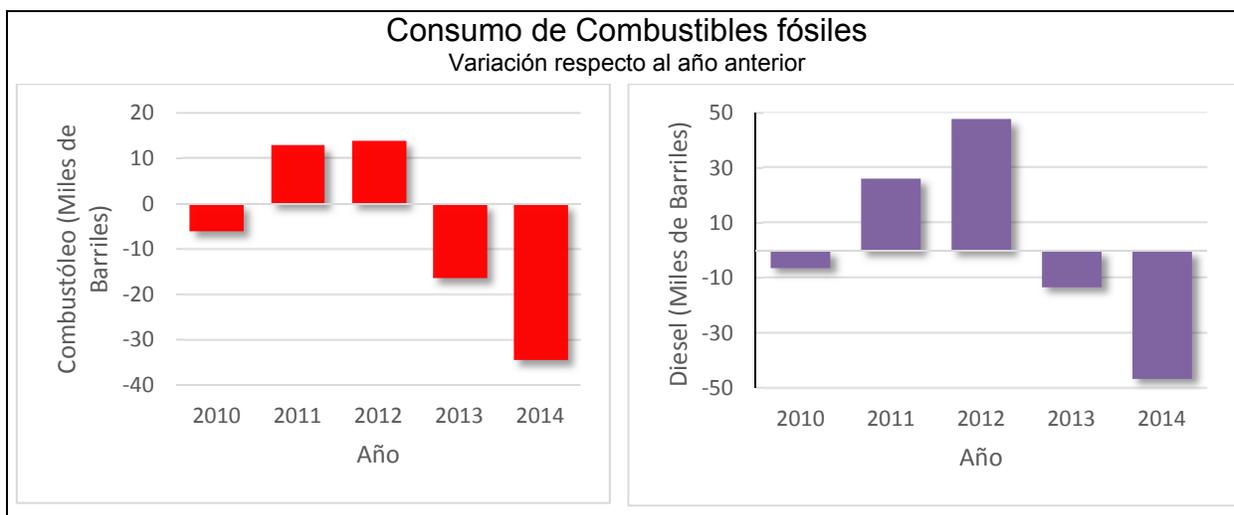


Fig. 1. Variación en el consumo de combustibles fósiles durante el periodo 2010-2014. [2].

Por otra parte, la generación de energía eléctrica a partir de la quema de combustibles fósiles genera gases con efectos nocivos para el medio ambiente, responsables del calentamiento global y los cambios climáticos. Es por ello que la comunidad científica se ha interesado en desarrollar tecnología y procedimientos para generar energía eléctrica a partir de fuentes renovables, las cuales durante su operación no provocan un impacto negativo en el ambiente.

Abordando esta problemática surge el concepto de “Fuentes de energía distribuida” (DER, por sus siglas en inglés), que son módulos de generación de energía integrados por paneles fotovoltaicos, celdas de combustible, microturbinas, etc., los cuales no contribuyen con emisiones de carbono en el ambiente [3] y con ello se reduce el uso de fuentes no renovables. Sin embargo, administrar y controlar un conjunto de módulos de este tipo no es una tarea sencilla, y una alternativa para ello son las microrredes, de las cuales se hablará brevemente a continuación.

1.1. Microred

Una microred es un sistema conformado de fuentes renovables, cargas y dispositivos de almacenamiento de energía; que puede operar en conjunto con la red eléctrica

principal, o en forma independiente (modo isla). Existen microrredes que alimentan a sus cargas tanto en CD como en CA [4, 5, 6, 7].

Sin embargo, dado que la mayoría de las cargas electrónicas operan en su interior con corriente directa, una microrred de CD resulta un objeto de estudio bastante prometedor, muchos investigadores se han dado a la tarea de demostrar que un sistema de distribución basado en CD puede ser superior a uno de CA en términos de eficiencia, confiabilidad y capacidad de distribución [8, 9, 10], ya que bajo la premisa anterior, evita conversiones de energía innecesarias (CA/CD) evitando la inyección de armónicos, bajo factor de potencia, por mencionar algunas.

Un diagrama a bloques muy simple es mostrado en la figura 2, consta de algunos módulos DER que actúan como generadores de energía, elementos almacenadores y cargas eléctricas. Es requerido además un convertidor bidireccional que sirva de enlace entre la red eléctrica y el bus de CD para que cuando exista un exceso de energía por parte de las fuentes renovables sea posible inyectarlo a la red.

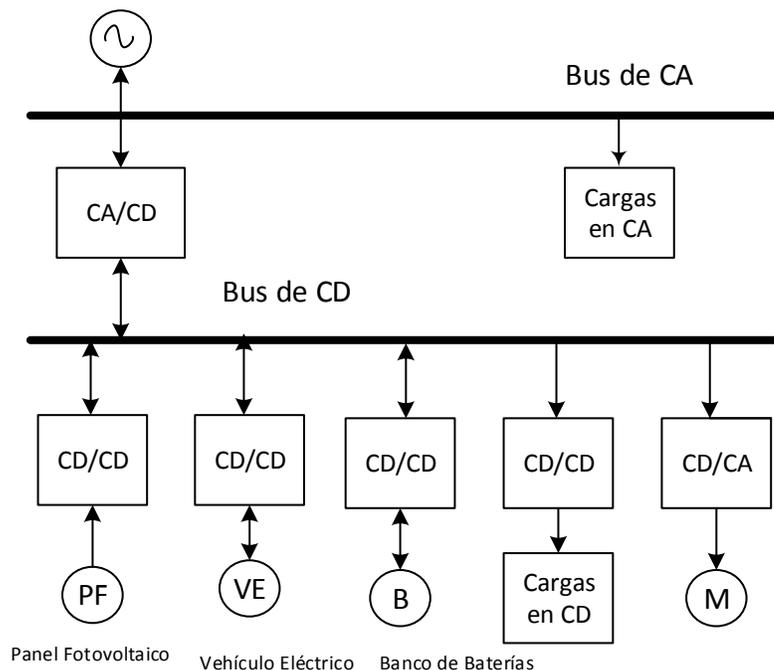


Fig. 2. Diagrama a bloques de una microrred de CD.

1.2. Necesidad de un sistema de distribución de tres hilos

Una microred usualmente tiene un solo nivel de voltaje en un sistema de distribución de dos hilos, y es complicado alimentar algunos tipos de cargas tales como convertidores CA-CD que requieren una conexión a neutro, convertidores CD-CD que requieren un voltaje de entrada balanceado (medio puente y medio puente de tres niveles) por mencionar algunos. Además cuando una microred de CD se implementa en oficinas y hogares se recomienda conectar el neutro a tierra por seguridad [11].

Dado que un sistema de distribución en CD de dos hilos no puede cumplir con las demandas de todos los convertidores, se propone un sistema de distribución a tres hilos (positivo, negativo y neutro), con ello se logra alimentar los convertidores antes mencionados, se puede aterrizar el neutro y además se obtiene un voltaje de operación menor para las cargas que así lo requieran.

Sin embargo estos sistemas de distribución presentan un problema de desbalance, ya que las cargas conectadas a cada hilo siempre tienen una demanda diferente de energía, ese desbalance se traduce en una variación entre el voltaje de cada hilo y el neutro, provocando un voltaje asimétrico el cual tiene un impacto negativo en los esfuerzos de voltaje en interruptores y en la calidad del voltaje y la corriente de salida [12].

Es por ello que un convertidor balanceador de tensión es necesario para evitar dichos problemas y ofrecer un sistema de distribución en CD estable y confiable [13]. La figura 3 muestra un diagrama a bloques del sistema descrito, se observa que un desbalance ocurre cuando se conecta una carga entre alguno de los hilos y el neutro.

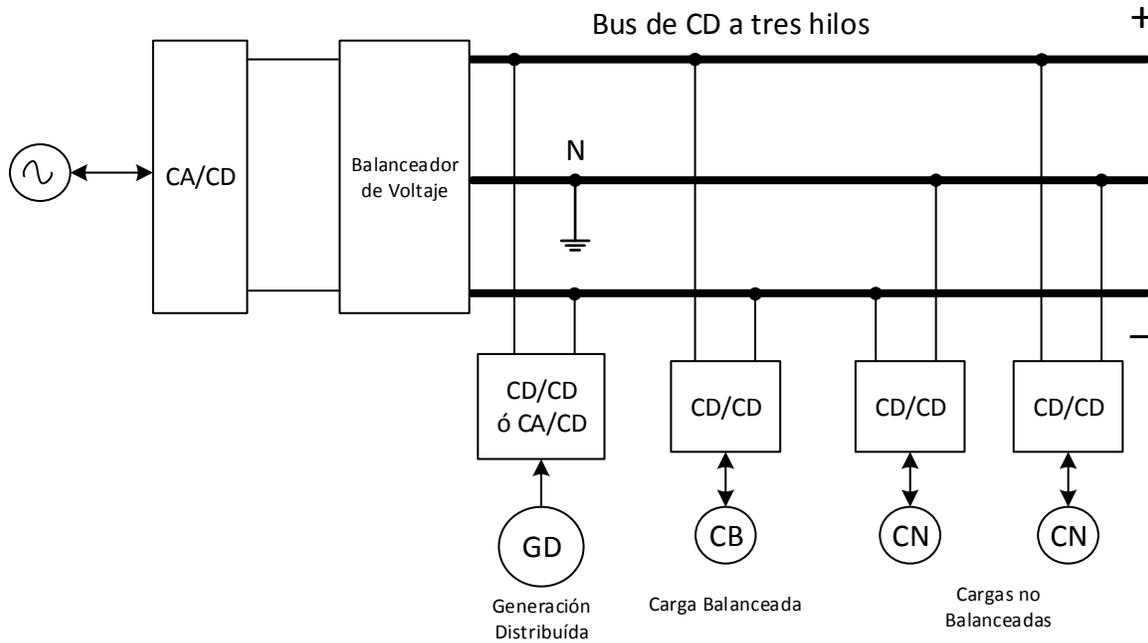


Fig. 3. Bus de CD a tres hilos con balanceador de voltaje.

1.3. Objetivo

En el Instituto Tecnológico de Celaya se está desarrollando una microred de CD en el departamento de Ingeniería Electrónica para alimentar el equipo de cómputo y la iluminación de un edificio, el Balanceador de Voltaje es parte fundamental de este sistema, es por ello que se pretende realizar un prototipo de dicho convertidor para contribuir al desarrollo de este macro proyecto. Este artículo sentará las bases para el diseño y la implementación del mismo.

2. Topologías de convertidores balanceadores de voltaje

En esta sección se abordará una descripción de los convertidores balanceadores de voltaje reportados en la literatura, se mencionarán sus principales características tales como su topología y técnicas de control empleadas.

En la Fig. 4 se muestra el convertidor balanceador de voltaje reportado en [14]. En este artículo se presentan resultados de una simulación para una microred de CD donde el

voltaje proveniente de una línea trifásica se acopla al balanceador de 2.1 kW con un transformador (6.6 kV/230V) y un convertidor CA-CD bidireccional, teniendo a la entrada del balanceador 340 V y una salida de ± 170 . Este nivel de tensión fue seleccionado para cumplir con un estándar japonés.

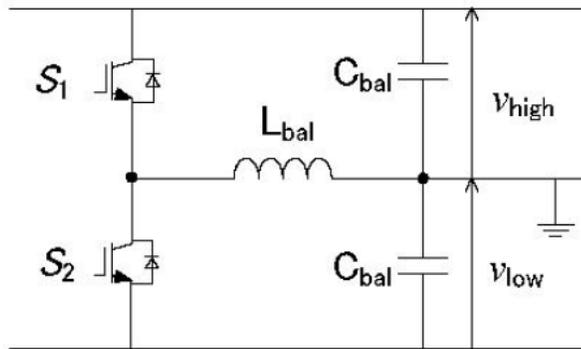


Fig. 4. Diagrama esquemático del convertidor balanceador de voltaje.

En la Fig. 5 se observa el diagrama a bloques del control propuesto para el balanceador, la señal "D" se genera midiendo el voltaje positivo y negativo, el cual se multiplica por una constante K, posteriormente es dividido por el voltaje a la entrada del balanceador ($v_{high}+v_{low}$) y se suma con 0.5, las señales PWM con determinado ciclo de trabajo son generadas comparando esta señal de referencia con una triangular.

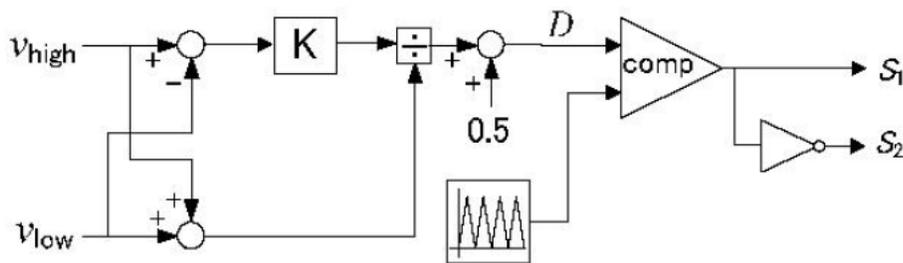


Fig. 5. Diagrama a bloques del control propuesto para el balanceador.

La topología que se muestra en la Fig. 6, a diferencia de la anterior (Fig. 5), no sólo funciona como balanceador, sino como un convertidor reductor CD-CD (Estado A) conectado a un sistema de generación distribuida, en la Fig. 7, se muestra un diagrama del flujo de corriente cuando $R1$ es más pequeña que $R2$.

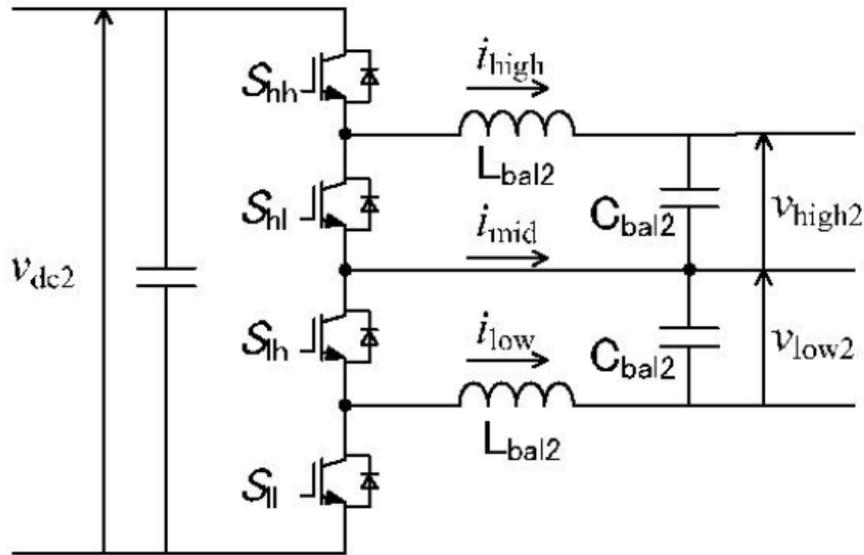
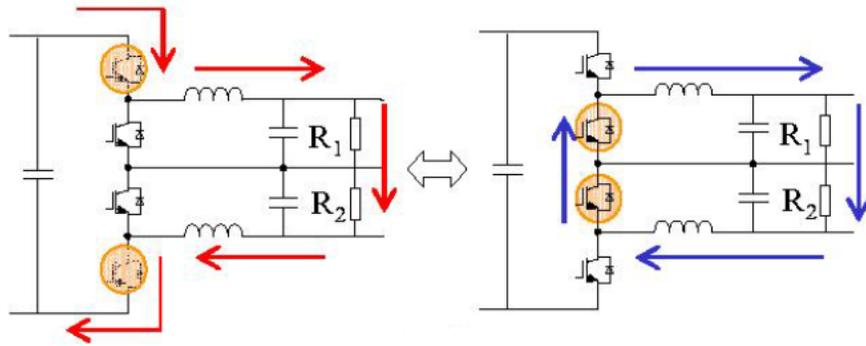
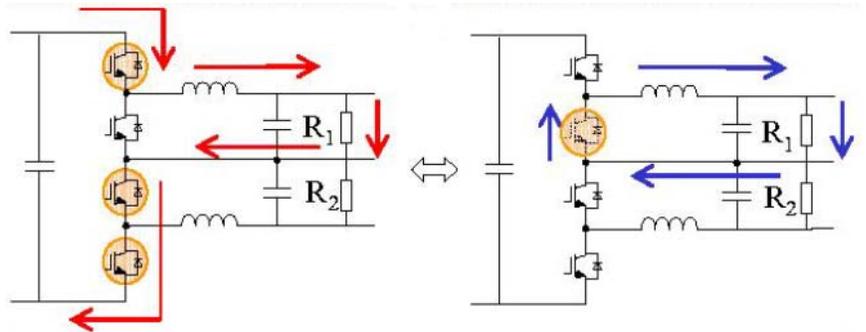


Fig. 6. Diagrama esquemático del convertidor balanceador de voltaje con convertidor Buck.

La operación de esta topología se basa en dos estados (A y B); si la diferencia entre el voltaje positivo y negativo disminuye de cierto nivel, hay un cambio de estado.



(a) Estado A



(b) Estado B

Fig. 7. Flujo de corriente cuando $R_1 < R_2$ [14].

La estrategia de control (Ver Fig. 8) requiere un bloque de selección del modo de conmutación mostrado en la tabla 1, el diagrama a bloques es muy similar al mostrado en la Fig. 5, la diferencia radica en que la referencia se obtiene a partir de las potencias existentes en cada hilo, la cual pasa por un controlador PI, además de la existencia de un bloque que selecciona el modo de operación (A o B) con la conmutación de los interruptores.

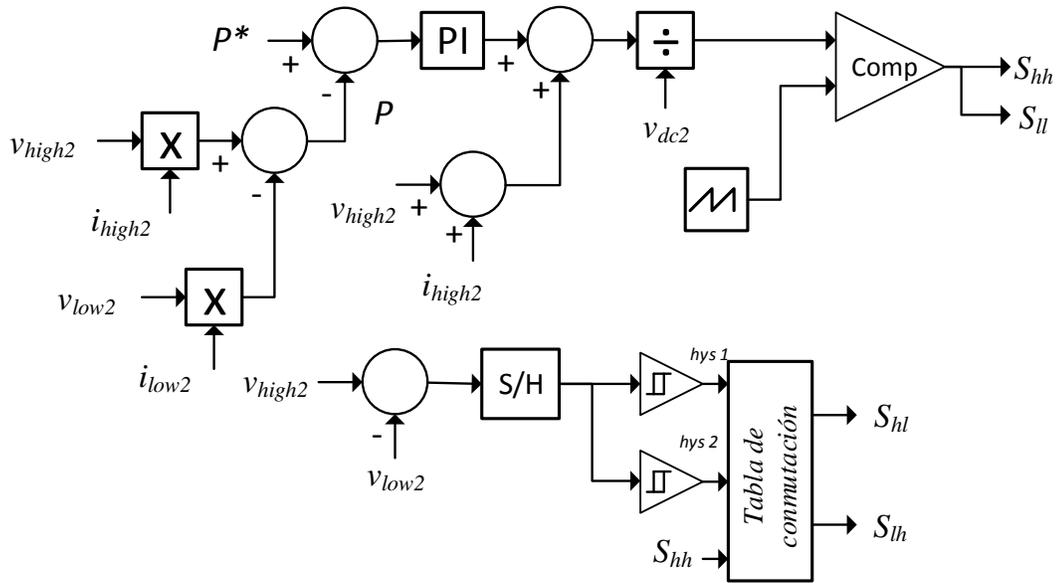


Fig. 8. Diagrama a bloques del control propuesto para el balanceador con convertidor Buck.

	hys 1	1	0	0
	hys 2	1	1	0
$S_{hh} = 1$	S_{hl}	1	0	0
	S_{lh}	0	0	1
$S_{hh} = 0$	S_{hl}	0	1	1
	S_{lh}	1	1	0

Tabla 1. Tabla de conmutación para la selección de estados.

En [15] se presenta una topología medio puente con un convertidor Reductor-Elevador bidireccional en cascada para regular las variaciones existentes en el voltaje de entrada del balanceador. (Ver Fig. 9)

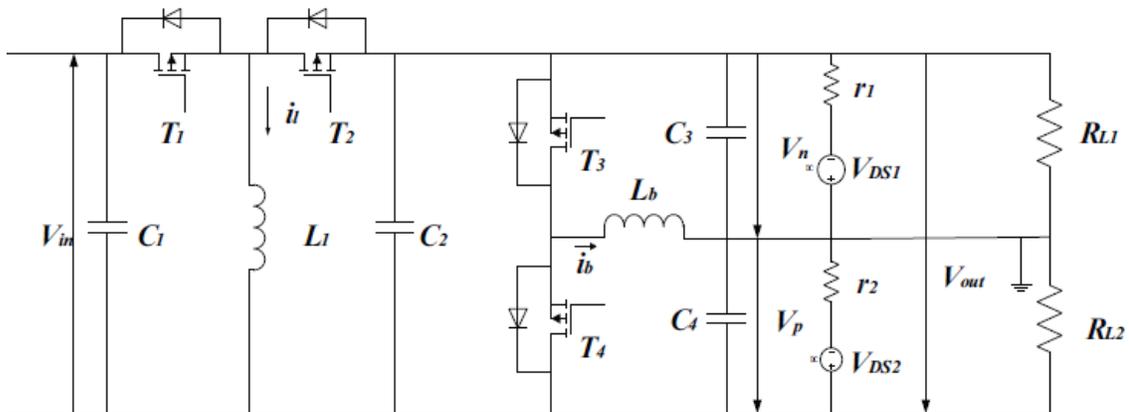
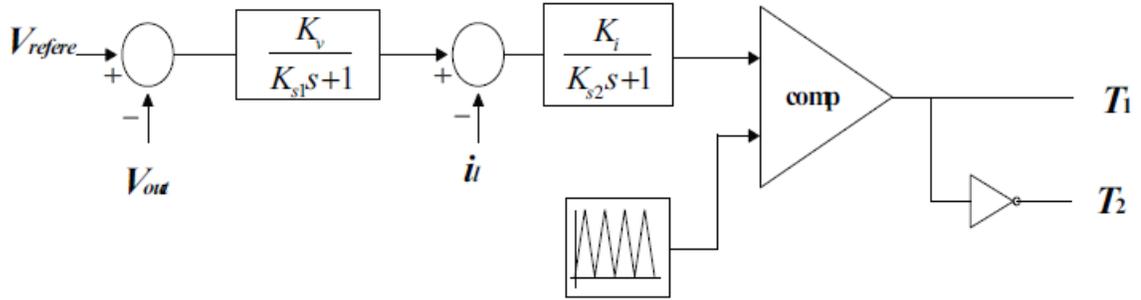


Fig. 9. Diagrama esquemático de un convertidor balanceador de voltaje con un convertidor reductor elevador a la entrada.

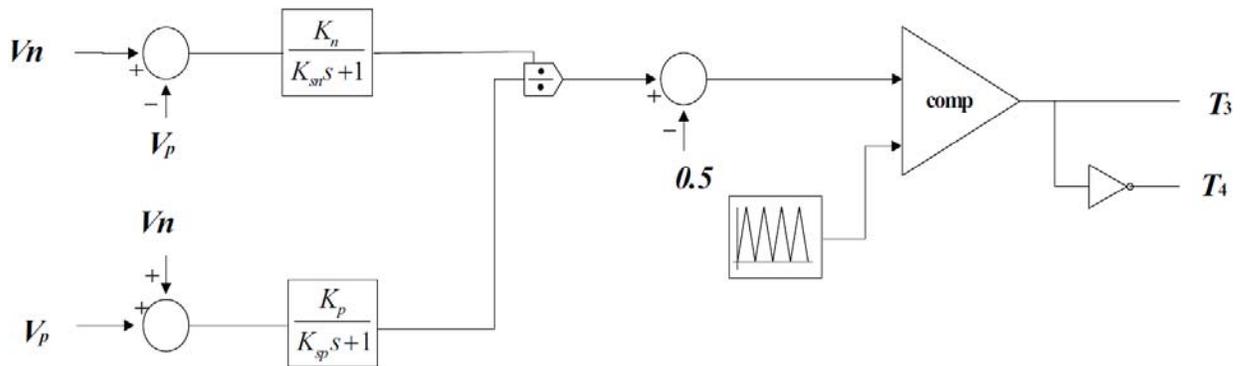
Las cargas activas en cada hilo se modelan con un circuito equivalente Thevenin representado por fuentes de voltaje V_{DS1} , V_{DS2} y por resistencias r_1 , r_2 , las cargas pasivas por su parte son representadas por R_{L1} , R_{L2} . Debido a que la topología reductora-elevadora presenta una inversión en el voltaje de salida se ha invertido la polaridad del balanceador.

El diagrama a bloques del control implementado se muestra en la Fig. 10. El esquema de control del convertidor Reductor-Elevador (Ver Fig. 10 (a)), es un control en modo corriente de doble lazo, el error de voltaje sirve como referencia para la corriente del inductor de balanceo, ambas señales de error pasan por compensadores PI y se genera una señal de referencia para compararse con la triangular.

El diagrama a bloques del balanceador (Ver Fig. 10 (b)) es similar al descrito en [14], con la diferencia que se emplean controladores PI para obtener la señal de referencia que va al comparador.



(a) Convertidor Reductor-Elevador



(b) Balanceador de voltaje

Fig. 10. Diagrama a bloques del control para el convertidor propuesto.

En [16] el balanceador está basado en un medio puente y para regular las fluctuaciones de voltaje a su entrada incorpora un convertidor Reductor-Elevador positivo. (Ver Fig. 11)

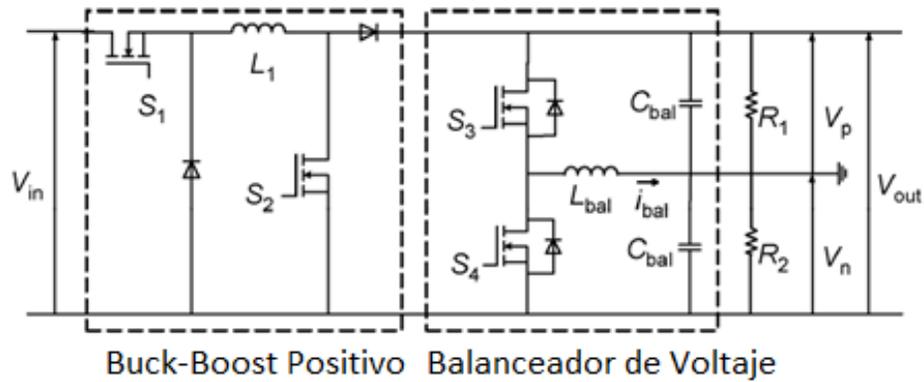


Fig. 11. Diagrama esquemático de un convertidor Balanceador de Voltaje con un convertidor Reductor Elevador positivo a la entrada.

La particularidad de esta topología está dada en el convertidor a la entrada, puede controlar en tres modos de operación: Reductor, Elevador y Reductor-Elevador, mejorando la eficiencia de dicho convertidor al operar de este modo.

El artículo se centra en el balanceador de tensión y en un análisis para obtener la eficiencia del mismo, por lo que no aborda a detalle el convertidor Reductor Elevador. El diagrama a bloques del control del balanceador se muestra en la Fig. 12. Como se puede observar únicamente se encuentra el error de voltaje entre ambos hilos y se multiplica por una ganancia proporcional.

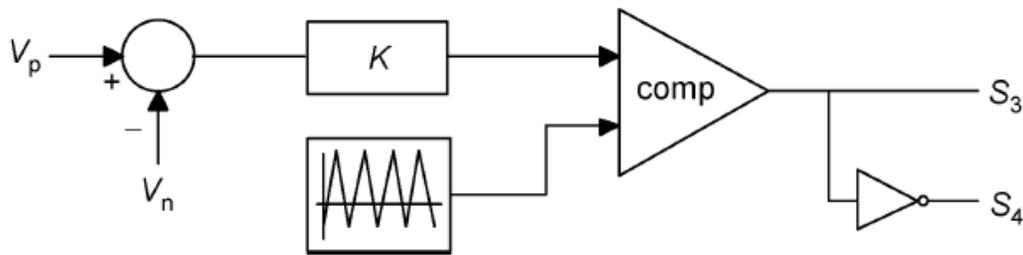


Fig. 12. Diagrama a bloques del control para el convertidor propuesto.

La eficiencia del balanceador de voltaje está dada por la ecuación (1)

$$\eta = \frac{P_n + P_p}{P_n + P_p + 2.5 \times 10^{-6} (P_n - P_p)^2 + 7.5 \times 10^{-3} |P_n - P_p|} \quad (1)$$

Donde:

P_n – Potencia parte negativa

P_p – Potencia parte positiva

En [11] se propone un convertidor reductor dual medio puente, posee dos ramas, cada una con un inductor, un diodo y un interruptor (Ver Fig. 13 (a)), con el propósito de reducir las pérdidas por conducción y conmutación del convertidor no se opta por una técnica de modulación con señales PWM complementarios, en lugar de eso se propone el diagrama mostrado en la Fig. 13 (b)

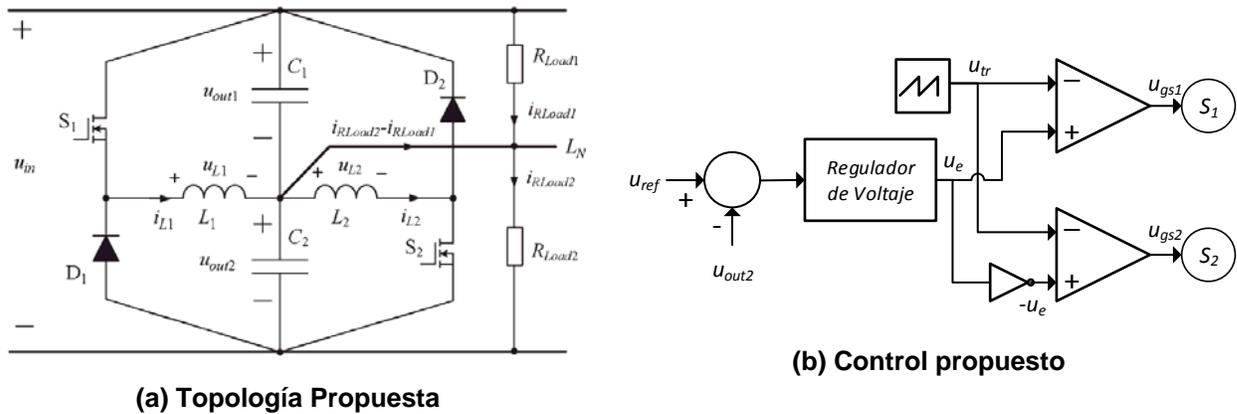


Fig. 13. Topología propuesta y Diagrama a bloques del control.

Se puede observar que la señal de control u_e obtenida del regulador es enviada al comparador del interruptor S_1 , y su negativo ($-u_e$) al comparador del interruptor S_2 , de esto se puede concluir que cuando $R_{L2} < R_{L1}$ la señal u_e será positiva y la rama

izquierda comenzará a conmutar mientras que la derecha no trabajará. Ocurre el caso contrario cuando $R_{L2} > RL_1$. De esta manera se logra que sólo una rama trabaje durante cada periodo de conmutación evitando las pérdidas inherentes a la otra rama.

En [17] se propone una topología medio puente como las mostradas anteriormente en [14, 15, 16] sin un convertidor que regule el voltaje de entrada.

Algunos de los balanceadores reportados emplean un control proporcional, lo que produce un error en estado estacionario, mientras tanto en [17] se proponen controladores PI para eliminar dicho error, además se implementa un lazo de control para la corriente en el inductor de balanceo, el diagrama a bloques se muestra en la Fig. 14 y se explica brevemente a continuación:

En primer lugar se obtiene el error de voltaje entre los hilos positivo y negativo, esta diferencia pasa por un controlador PI que genera la referencia para la corriente en el inductor de balanceo, posteriormente se obtiene el error en corriente y se pasa por otro controlador PI generando un voltaje ΔV , al cual se le suma el voltaje de un hilo y el resultado finalmente se divide entre el voltaje de entrada del convertidor, con ello se obtiene la señal de referencia a compararse con la triangular.

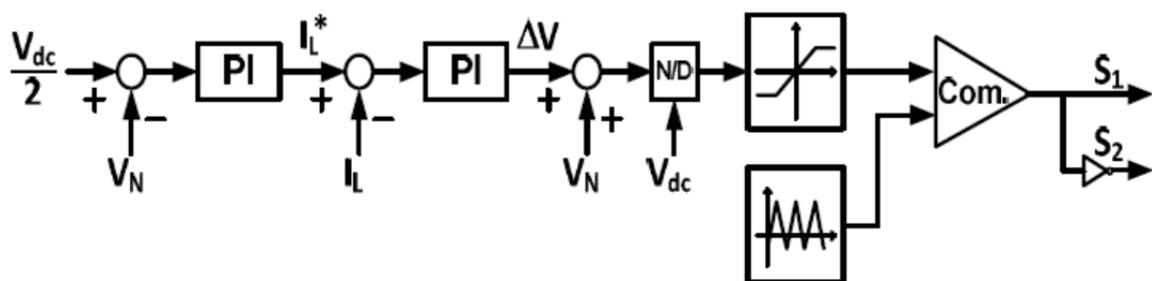


Fig. 14. Diagrama a bloques de control propuesto.

3. Discusión

Un análisis de las topologías presentadas en la sección dos, se muestra en la tabla 2, como se puede observar la mayoría de los autores basan sus sistemas de distribución de tres hilos en un nivel de voltaje de entre ± 170 y ± 200 V, algunas topologías presentan un convertidor regulador de voltaje a la entrada, esto depende en su mayoría de la aplicación, las topologías que no consideran esta regulación poseen por lo general un convertidor de enlace a la red eléctrica (CA-CD bidireccional).

Por otra parte es notorio que la mayoría de las topologías balanceadoras de voltaje, se basan en una estructura medio puente o medio puente de tres niveles a excepción de [11] que introduce un diodo y un inductor extra por rama. La diversidad entonces, se centra en los diagramas y las estrategias de control utilizadas.

Característica / Referencia	[11]	[14]1	[14]2	[15]	[16]	[17]
Voltaje de CD	± 180 V	± 170 V	± 170 V	± 200 V*	± 200 V *	± 200 V
Regulador de voltaje a la entrada	No	No	No	Sí	Sí	No
Número de interruptores controlados	2	2	4	4	4	2
Número de componentes pasivos	4	3	4	6	6	3
Potencia	2 kW	2.1 kW*	-	-	20 kW*	-
Controlador	-	P	PI	PI	P	PI modo corriente
-No especifica *En simulación						

Tabla 2. Análisis de las topologías presentadas.

4. Conclusiones

En este artículo se presentaron las principales características de los convertidores balanceadores de voltaje reportados en la literatura, así como de las estrategias de control utilizadas para su regulación, las cuales esencialmente se basan en técnicas de control clásico P y PI. Es importante destacar que los autores no presentan un análisis de eficiencia de sus topologías a excepción de [16], donde se detalla un análisis matemático para obtener la eficiencia del convertidor, por lo que resulta conveniente profundizar más en ese aspecto. Finalmente de esta revisión se puede concluir que todos los autores emplean técnicas de control lineal a topologías medio puente y derivadas de la misma, dejando un espacio para explorar nuevas alternativas con técnicas de control no lineal.

5. Referencias

- [1] Prospectiva del Sector Eléctrico. http://www.sener.gob.mx/res/pe_y_dt/pub/2012/pse_2012_2026.pdf. Mayo 2015
- [2] Sistema de información energética. <http://sie.energia.gob.mx>. Mayo 2015.
- [3] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, C. Marnay, "Microgrids". *Power and Energy Magazine*, IEEE. Vol.5. No.4. July-Aug. 2007. 78-94 pp.
- [4] D. Manz, R. Walling, N. Miller, B. LaRose, R. D'Aquila, B. Daryanian, "The Grid of the Future: Ten Trends That Will Shape the Grid Over the Next Decade". *Power and Energy Magazine*, IEEE. Vol.12. No.3. May-June 2014. 26-36 pp.
- [5] Qiang Fu, A. Hamidi, A. Nasiri, V. Bhavaraju, S. B. Krstic, P. Theisen, "The Role of Energy Storage in a Microgrid Concept: Examining the opportunities and promise of microgrids". *Electrification Magazine*, IEEE. Vol.1. No.2. Dec. 2013. 21-29 pp.

- [6] Jackson John Justo, Francis Mwasilu, Ju Lee, Jin-Woo Jung, "AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*". Vol. 24. No. ISSN 1364-0321. August 2013. 387-405 pp.
- [7] B. S. Hartono, Y. Budiyanto, R. Setiabudy, "Review of microgrid technology". *QiR (Quality in Research)*, 2013 International Conference. 25-28 June 2013. 127,132 pp.
- [8] M. R. Starke, Li Fangxing, L. M. Tolbert, B. Ozpineci, "AC vs. DC distribution: Maximum transfer capability". *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, IEEE. 20-24 July 2008.1-6 pp.
- [9] F. Dastgeer, A. Kalam, "Efficiency comparison of DC and AC distribution systems for distributed generation". *Power Engineering Conference*, 2009. AUPEC. Australasian Universities. Sept. 2009. 1-5, 27-30.
- [10] G. AlLee, W. Tschudi, "Edison Redux: 380 Vdc Brings Reliability and Efficiency to Sustainable Data Centers". *Power and Energy Magazine*, IEEE. Vol.10. No. 6. Nov.-Dec. 2012. 50-59 pp.
- [11] Xianjin Zhang, Chunying Gong, "Dual-Buck Half-Bridge Voltage Balancer", *Industrial Electronics*, IEEE. Vol.60. No.8. Aug. 2013. 3157-3164 pp.
- [12] Xianjin Zhang, Chunying Gong, Zhilei Yao, "Three-Level DC Converter for Balancing DC 800-V Voltage". *Power Electronics*, IEEE. Vol. 30. No. 7. July 2015. 3499-3507 pp.
- [13] H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, "Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid for Super High Quality Distribution". *Power Electronics*, IEEE. Vol.25. No.12. Dec. 2010. 3066-3075 pp.

- [14] H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, R. Uchida, "DC Voltage Control of the DC Micro-grid for Super High Quality Distribution". Power Conversion Conference – Nagoya. 2007. No. PCC '07. 2-5 April 2007. 518-525 pp.
- [15] Chi Zhang, Daozhuo Jiang, Huan Zheng, Lixin Ye, "A Bi-Directional Buck/Boost Voltage Balancer for DC Distribution System". Digital Manufacturing and Automation (ICDMA), 2013 Fourth International Conference. June 2013. 9-13, 29-30 pp.
- [16] H. Zheng, D. Z. Jiang, C. Zhang L. Ye, F. Xu, Y. Q. Liang, "A positive Buck-Boost voltage balancer for DC distribution system". Science China Technological Sciences. Vol. 57. No. 3. March 2014. 578-588 pp.
- [17] Hyun-Jun Kim, Yun-Seok Lee, Jin-gyu Lee, Byung-Moon Han, "Operation analysis of bipolar DC distribution system with voltage balancer". Power Engineering Conference (AUPEC). Australasian Universities. Sept.28-Oct.1 2014. 1-6 pp.

6. Autores

Ing. Fidel Alejandro Castro Espinosa obtuvo su título de Ingeniero Mecatrónico en el Instituto Tecnológico de Celaya en el año 2013, actualmente se encuentra cursando la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica.

Dr. Elías José Juan Rodríguez Segura, Ingeniero en Electrónica por la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco en 1994, Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica y Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET en 1996 y 1999 respectivamente. Desde 1999 es profesor-investigador en el Instituto Tecnológico de Celaya, sus principales áreas de interés son los convertidores CD-CA y CD-CD para alimentación de microprocesadores, cargadores de baterías, microredes de CD, iluminación de estado sólido y calentamiento por inducción para forja, templado y cocción.

Dr. Ciro Alberto Núñez Gutiérrez Doctor en Ciencias en Electrónica de Potencia por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico en 2002. A partir de ese año ha trabajado como Profesor Investigador en el Posgrado de Ingeniería Eléctrica de la

Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Sus intereses de investigación se centran en la electrónica de potencia para diversas aplicaciones, control y modelado de convertidores y calidad de la energía eléctrica.