

Sobre el uso de Rectificadores en Cascodo basados en un JFET Normalmente Cerrado de SiC y en un MOSFET de Si

Aitor Vázquez, Alberto Rodríguez, Marcos Fernández, Marta M. Hernando, Javier Sebastián.
Universidad de Oviedo. Grupo de Sistemas Electrónicos de Alimentación.
Campus de Viesques S/N- Edificio3. 33204 Gijón, España. Email: vazquezaitor.uo@uniovi.es

Resumen—Los nuevos dispositivos basados en semiconductores de banda prohibida ancha proporcionan una serie de propiedades interesantes para ser exploradas. Los JFET normalmente cerrados de Carburo de Silicio (SiC) ofrecen varias ventajas potenciales, en particular bajas pérdidas de conmutación, capacidad para trabajar a altas temperaturas y capacidad de soportar alta tensión. Buscando mejorar el rendimiento de los convertidores conmutados, pueden plantearse nuevas estructuras basadas en este tipo de semiconductores de potencia. En este artículo se presenta y analiza un rectificador en cascodo basado en un JFET normalmente cerrado de SiC. Esta estructura puede ser empleada en los rectificadores de entrada de convertidores CA-CC para incrementar su rendimiento. Como alternativa de bajo coste, se plantea un segundo rectificador en cascodo pero basado en un MOSFET de Silicio (Si). Así mismo, se presenta una caracterización en directa simple de ambas estructuras así como una comparativa de la dinámica de estos nuevos rectificadores. Por último, se compara el rendimiento obtenido de estas dos estructuras comparadas con diodos rectificadores tradicionales en un convertidor elevador entrelazado con Corrección del Factor de Potencia (CFP). Como resultado de esta comparativa, se ha obtenido una mejora del rendimiento de dos puntos en la etapa de potencia.

Index Terms—SiC JFET, rectificador, rectificación síncrona, convertidores CA-CC

I. INTRODUCCIÓN

Los convertidores CA-CC son uno de los campos de aplicación tradicionales dentro de la electrónica de potencia. Los convertidores CA-CC han sido ampliamente usados en distintas aplicaciones, tales como balastos para iluminación, equipamiento para centrales de telecomunicación, cargadores de baterías para dispositivos móviles y, más recientemente, cargadores para vehículos híbridos y eléctricos. Durante la última década, se han presentado distintas soluciones tratando de mejorar el funcionamiento de estas etapas de potencia, buscando tanto incrementar el rendimiento y la fiabilidad como reducir su volumen y peso. En este sentido, la utilización de dispositivos semiconductores de banda prohibida ancha ha abierto un nuevo camino para poder mejorar las limitaciones inherentes a los convertidores CA-

CC. En concreto, los dispositivos de Carburo de Silicio (SiC) proporcionan una serie de ventajas bien estudiadas y presentadas en [1].

Las potenciales ventajas de esta tecnología son una mayor capacidad de soportar tensión, un muy buen comportamiento en conmutación y la posibilidad de trabajar en rangos de temperatura muy elevados con un encapsulado adecuado. Los dispositivos de SiC han sido estudiados en distintos trabajos como sustitutos de los de Si en este tipo de convertidores, fundamentalmente buscando un incremento en el rendimiento. La primera opción explotada fue el reemplazo del diodo de libre circulación, donde se venían empleando diodos del tipo *ultra-fast*. Algunos ejemplos pueden encontrarse en [2]-[4], donde el uso de un diodo Schottky de alta tensión de SiC ha permitido reducir las pérdidas en la salida de conducción de este dispositivo (pérdidas que están ligadas mayoritariamente al proceso de recuperación inversa). En [5] se recoge una comparativa entre estos diodos de SiC y diodos *ultra-fast* de Si. A medida que la tecnología de SiC ha ido madurando, se han desarrollado otro tipo de dispositivos, no sólo diodos Schottky de alta tensión, si no también transistores. En concreto, los JFETs de SiC tanto normalmente abiertos (n-on) como normalmente cerrados (n-off) son los más interesantes además de ser comercialmente accesibles [6, 7]. Una vez más, este nuevo tipo de transistores poseen la capacidad de soportar alta tensión (entre 1200 y 2000 V) combinada con una resistencia en conducción muy baja. No obstante, el JFET n-on tiene como principal desventaja que ha de ser gobernado con señales de control inversas a la lógica tradicional. Esto es, el JFET n-on de SiC estará abierto cuando se aplique una tensión negativa en su puerta (del orden de -15 V), mientras que estará en conducción con 0 V en puerta (o una tensión ligeramente positiva). Varias comparativas de estos dispositivos se han presentado en [8] y [9], destacando las ventajas anteriormente comentadas. Para poder gobernar estos dispositivos con una lógica tradicional se puede implementar un cascodo como puede verse en [10]. Utilizando este montaje en cascodo, es posible reemplazar “pin a pin” el transistor tradicional de Si utilizado en las etapas de potencia; así en [11], cascodos de JFET n-on de SiC han sido utilizados como reemplazo del transistor principal de Si en convertidores con Corrección del Factor de Potencia (CFP), obteniendo mejoras

en el rendimiento.

Una de las últimas partes susceptibles de optimización es el rectificador de entrada. A lo largo de los años, se han desarrollado distintas técnicas para intentar incrementar el rendimiento en esta etapa rectificadora, como son montajes del tipo *bridgeless* [12]-[14] o *totem-pole* [15]. En este sentido, algunos trabajos ya han propuesto la utilización de JFETs de SiC para rectificadores bidireccionales [16]. En [17]-[19], JFETs n-on de SiC y MOSFETs de Si son utilizados como rectificadores síncronos (i.e. como rectificadores controlados) con distintos circuitos de mando, siempre con el objetivo de incrementar el rendimiento del rectificador. En los trabajos mencionados anteriormente, la circuitería adicional necesaria para generar adecuadamente las señales de disparo de estos rectificadores síncronos es la principal limitación de este tipo de soluciones, sobre todo si se emplean JFETs n-on de SiC. Así pues, para tratar de evitar este problema, en este artículo se proponen dos estructuras distintas de cascodos rectificadores para ser usados en etapas de rectificación en convertidores CA-CC. La primera alternativa es un rectificador en cascodo basado en un JFET n-on de SiC que no necesita ningún tipo de circuitería adicional y que puede verse como un rectificador síncrono autoexcitado (i.e. sin necesidad de generar señales para el control de JFET externamente). En la segunda estructura se sustituye el JFET n-on de SiC por un MOSFET de Si con el objetivo de obtener una versión de bajo coste del rectificador en cascodo. Este artículo se ha organizado de la siguiente manera. En el apartado II ambos rectificadores en cascodo son presentados y analizados. En el apartado III se presenta una pequeña comparativa teórica de las curvas en directa de esta estructura y de las ventajas que ellas conllevan. Para validar dichas ventajas, se ha realizado una comparativa entre estos dos rectificadores en cascodo y un puente rectificador tradicional de Si trabajando en un convertidor elevador entrelazado con CFP. Todos los resultados experimentales se resumen en el apartado III. Por último, en el apartado IV se recogen las principales conclusiones.

II. RECTIFICADOR EN CASCODO

A. Rectificador en cascodo basado en un JFET n-on de SiC

La estructura propuesta como rectificador se muestra en la Fig. 1. Esta estructura está compuesta por un JFET n-on de SiC y un diodo Schottky de Si de baja tensión. La fuente del JFET de SiC está conectada con el cátodo del diodo Schottky. A su vez, la puerta del JFET de SiC está conectada al ánodo del diodo. Esta estructura básica puede interpretarse como un cascodo tradicional pero utilizando un diodo Schottky en lugar de un transistor MOSFET. Así mismo, esta estructura ya ha sido propuesta para rectificadores de Nitruro de Galio (GaN) en [20]. El funcionamiento básico de este rectificador puede explicarse a partir de la Fig. 2 (a), donde la fuente de tensión es senoidal.

En el semi-periodo positivo de la tensión de entrada, el rectificador en cascodo se encuentra polarizado directamente ($V_{cascode}$ es positiva). Los circuitos equivalentes en este semi-

periodo y las formas de onda se muestran en Fig. 2 y Fig. 3. En esta situación, el JFET de SiC puede conducir, puesto que es un dispositivo normalmente cerrado pero el diodo Schottky no conducirá hasta que la tensión de entrada supere su tensión de codo $V_{\gamma-SH}$ (Fig. 2 (c)). En otras palabras, el diodo ideal mostrado en la Fig. 2 (b) todavía no está conduciendo. Cuando la tensión de entrada sea mayor que $V_{\gamma-SH}$, el diodo Schottky entrará en conducción (i.e. el diodo ideal del circuito equivalente estará conduciendo, Fig. 2 (d)). Téngase en cuenta que el JFET de SiC siempre se encontrará conduciendo, puesto que su tensión puerta fuente será ligeramente positiva e igual a la caída en tensión directa del diodo Schottky (este dispositivo es normalmente cerrado, por lo que conduce incluso con 0 V de tensión en puerta). Así pues, el rectificador en cascodo se comporta como un diodo cuya tensión de codo será justamente la tensión de codo del diodo Schottky y cuya resistencia dinámica equivalente será la suma de la resistencia dinámica del diodo Schottky y la resistencia en conducción del JFET de SiC. Por lo tanto, es esperable que la caída de tensión en directa de esta estructura sea menor que la de un diodo PIN de Si equivalente en tensión y corriente, para un rango de corrientes determinado.

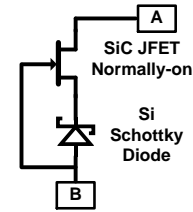


Fig. 1. Rectificador en cascodo basado en un JFET n-on de SiC y un diodo Schottky de baja tensión.

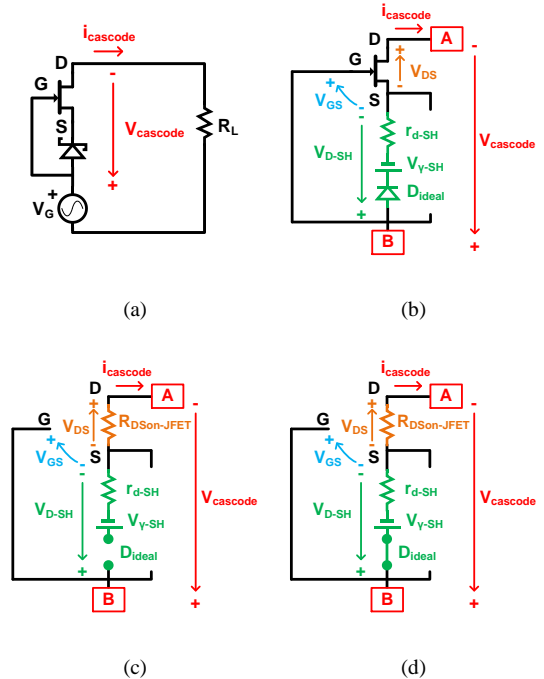


Fig. 2. Circuitos equivalentes del rectificador en cascodo basado en un JFET n-on de SiC cuando está inversamente polarizado.

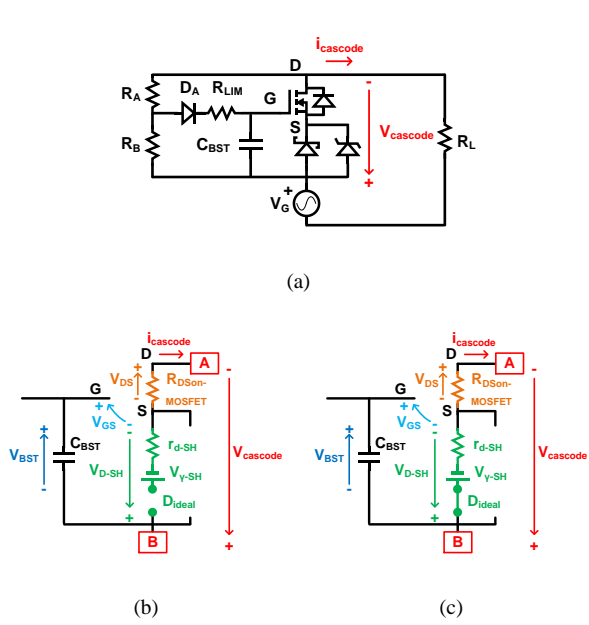


Fig. 6. Circuitos equivalentes del rectificador en cascodo basado en un MOSFET cuando está directamente polarizado.

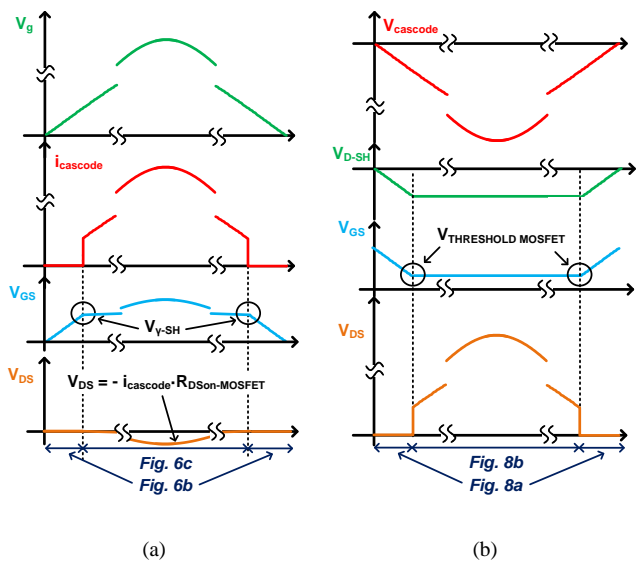


Fig. 7. Formas de onda del rectificador en cascodo basado en un MOSFET. (a) En polarización directa. (b) En polarización inversa.

generada y con los máximos valores de funcionamiento del transistor (típicamente 20 V).

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se presentarán los distintos resultados experimentales obtenidos con las estructuras comentadas anteriormente. En primer lugar, se resume una pequeña comparativa entre los rectificadores en cascodo y rectificadores de Si, con el objetivo de inferir las principales ventajas de las estructuras propuestas. En segundo lugar, se presentarán los resultados de rendimiento obtenidos con un convertidor elevador entrelazado con CFP. En todos los casos, para la implementación del rectificador en cascodo se ha empleado el JFET n-on de SiC SJDP120R085 de SemiSouth y

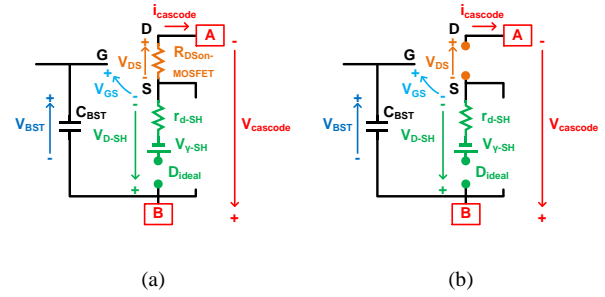


Fig. 8. Circuitos equivalentes del rectificador en cascodo basado en un MOSFET cuando está inversamente polarizado.

el MOSFET IRFP15N60, ambos en un encapsulado TO247. En la Tabla I se resumen las principales características de estos dispositivos. En ambos cascodos se ha utilizado el diodo Schottky 40L15CW, 15 V y 40 A, de nuevo en TO247 de IR. El diodo Zener usado en el rectificador en cascodo basado en MOSFET es también de 15 V. Adicionalmente, los diodos de Si utilizados en las distintas comparativas se muestran en la Tabla II.

A. Comparativa teórica entre ambos rectificadores en cascodo y diodos de Si

En esta sección se presenta una pequeña comparativa teórica que pretende evidenciar las ventajas esperadas de las estructuras en cascodo propuestas. La comparativa únicamente se ha centrado en las pérdidas en conducción. Ambos rectificadores en cascodo se comportan como un diodo Schottky de baja tensión con una resistencia equivalente algo mayor (debido a la resistencia del JFET o del MOSFET), ambos dispositivos. Teniendo en cuenta las características del JFET y del MOSFET y utilizando los valores dados por los distintos fabricantes para los diodos mostrados en la Tabla II, es posible representar de manera teórica las curvas en directa de cada uno de ellos. Cuando se encuentran polarizados directamente. Este circuito equivalente puede usarse para obtener las curvas en directa de Como puede verse en la Fig. 9, ambos rectificadores en cascodo poseen una tensión de codo notablemente inferior al resto de diodos. La pendiente de la curva corriente-tensión viene determinada por la resistencia en conducción de cada dispositivo.

TABLA I. JFET N-ON Y MOSFET UTILIZADOS EN CADA RECTIFICADOR EN CASCODO PROPUESTO

Dispositivo	V _{DS} [V]	I _D [A]	R _{DSon} [mΩ]	Fabricante
SJDP120R085 (SiC JFET)	1200	27	85	SemiSouth
IRFP15N60 (MOSFET)	600	15	385	Vishay

TABLA II. DIODOS DE SI UTILIZADOS EN CADA CIRCUITO DE MEDIDA.

Diode	V _R [V]	I _F [A]	Manufacturer
BR804	400	8	EIC
MUR4100	1000	4	OnSemi
GBU8J	600	8	Fairchild
20ETF08	800	20	IR
MUR3060PT	600	30	OnSemi
GBPC1504	400	15	Diodes INC

Así, como puede verse, esta pendiente es menor para las estructuras propuestas (i.e. su resistencia es mayor). Debido a este hecho, las pérdidas en conducción para los rectificadores en cascodo sólo serán menores que el diodo de Si correspondiente en un determinado rango de corrientes (y para una determinada caída de tensión directa). Este valor máximo de corriente viene determinado por el corte de las curvas en directa. En la Fig. 9, estos valores se han resaltado con círculos rojos para el caso del rectificador en cascodo basado en un JFET de SiC, y con círculos azules para el cascodo basado en un MOSFET. Por encima de estos valores de corriente, es esperable que las pérdidas de las estructuras propuestas sean mayores que para el diodo de Si. No obstante, estos valores de corriente son relativamente elevados (especialmente en el caso del JFET de SiC), por lo que el rectificador en cascodo sigue siendo una solución interesante para un rango amplio de corrientes.

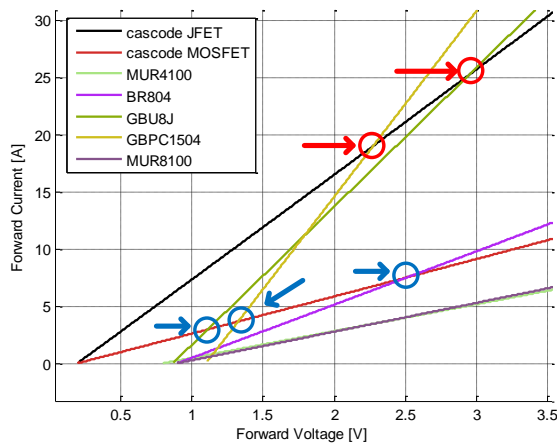


Fig. 9. Corriente frente a tensión directa para ambos rectificadores en cascodo y los diodos de Si listados en la Tabla II.

B. Resultados experimentales en un convertidor elevador entrelazado con CFP

Para comprobar experimentalmente las ventajas comentadas anteriormente, ambos rectificadores en cascodo se han utilizado en un puente completo de entrada en la etapa rectificadora de un convertidor CA-CC elevador entrelazado con CFP. El circuito de ambos rectificadores en cascodo como un puente rectificador de onda completa puede verse en la Fig. 10. Para el rectificador en cascodo basado en un MOSFET, el circuito de *bootstrap* se ha configurado con los siguientes valores: $R_A = 3.9 \text{ M}\Omega$, $R_B = 150 \text{ k}\Omega$, $R_{LIM} = 150 \text{ k}\Omega$, $C_{BST} = 10 \text{ }\mu\text{F}$ y D es un diodo 1N4148.

El convertidor elevador entrelazado con CFP tiene una tensión de entrada de $230 \text{ V}_{\text{RMS}}$, 50 Hz . La tensión de salida es de 550 V . La potencia de salida se ha variado desde 200 a 1200 W . El convertidor trabaja en lazo cerrado con un control con multiplicador basado en el IC UCC28070 de Texas Instruments.

Ambos rectificadores en cascodo se han comparado con un puente completo GBPC1508. Los valores de inductancia, capacidad de salida, el transistor y el diodo de libre circulación se especifican en la Fig. 11.

Los resultados de rendimiento obtenidos para este convertidor pueden verse en la Fig. 12. Como puede observarse, se obtiene una mejora de 1,2 puntos en el rendimiento con el rectificador en cascodo basado en un JFET de SiC a plena carga. Esta mejora es de 0,8 puntos para el rectificador en cascodo basado en un MOSFET. A media potencia, el rendimiento del rectificador en cascodo con JFET de SiC es del orden de 3 puntos mejor que para el puente rectificador de Si. En este punto, la mejora lograda con el rectificador en cascodo con MOSFET es de 2,2 puntos. Por último, a baja carga la mejora del rendimiento es de 2 puntos para ambos rectificadores en cascodo. En todos los casos, el factor de potencia es prácticamente unitario y no se han observado distorsiones aparentes en las formas de onda del convertidor.

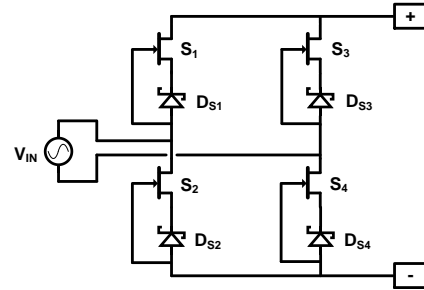


Fig. 10. Rectificador de onda completa formado con rectificadores en cascodo basados en un JFET de SiC.

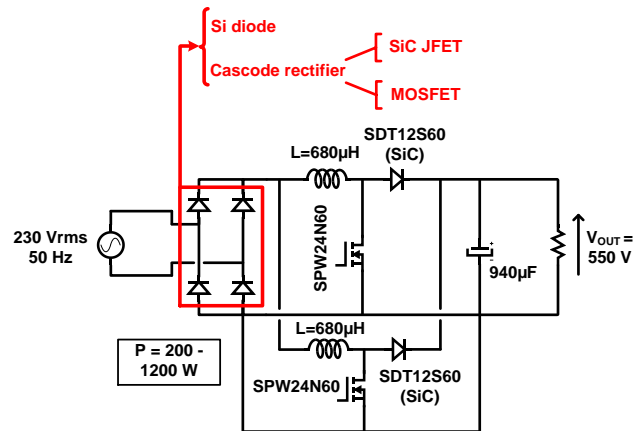


Fig. 11. Especificaciones del convertidor elevador entrelazado con CFP.

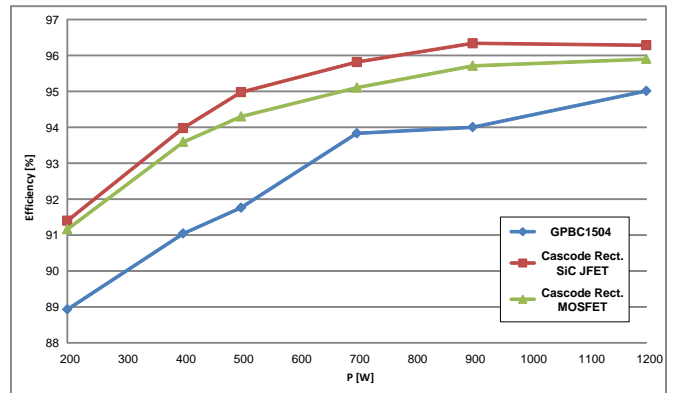


Fig. 12. Resultados de rendimiento medidos en el convertidor elevador con CFP.

IV. CONCLUSIONES

Los convertidores CA-CC son ampliamente usados hoy en día en muchas aplicaciones. En los últimos años, se han propuesto diversas técnicas para mejorar el rendimiento de este tipo de fuentes de alimentación. Los dispositivos de banda prohibida ancha, como los de SiC, ofrecen la posibilidad de explorar nuevas vías para la mejora del rendimiento en los convertidores CA-CC. Particularmente, los JFET n-on de SiC son uno de los dispositivos con una mayor atractivo, dadas sus capacidades para soportar alta tensión, trabajar a una temperatura elevada o conseguir resistencias de conducción bajas.

Centrado en este tipo de dispositivo y de tecnología, en este artículo se han propuesto dos rectificadores en cascodo diferentes. Buscando la mejora del rendimiento en los puentes rectificadores de entrada usados en los convertidores CA-CC, los rectificadores en cascodo propuestos, combinan la baja caída de tensión en directa de un diodo Schottky con la capacidad de soportar alta tensión cuando están inversamente polarizados, en particular cuando se emplea un JFET de SiC. En este caso particular, no se precisa ningún tipo de circuitería adicional para gobernar el JFET. No obstante, su elevado precio es el mayor inconveniente de esta opción. Como alternativa de bajo coste, se ha propuesto un segundo rectificador en cascodo, pero basado en un MOSFET de Si. En este caso, se necesita un pequeño circuito de *bootstrap* para poder polarizar el MOSFET. No obstante, esta circuitería adicional es muy sencilla (un condensador, dos diodos y tres resistencias) y es posible ajustarla fácilmente de acuerdo con la aplicación donde vaya a utilizarse el rectificador. Por lo tanto, ambos rectificadores en cascodo pueden utilizarse como rectificadores síncronos de alta tensión de muy bajas pérdidas de conducción e incluso pueden fabricarse en un pequeño circuito integrado.

Se ha utilizado un convertidor elevador entrelazado con CFP para poder corroborar mediante experimentación los dos rectificadores en cascodo propuestos. En este sentido, los resultados obtenidos en ambos casos mejorar del orden de 3 puntos el rendimiento global del convertidor, cuando este trabaja a baja carga, y hasta 2 puntos a plena carga en comparación con un rectificador en puente completo de Si, operando en las mismas condiciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado mediante la financiación del Gobierno de España a través de los proyectos MICINN-10-DPI2010-21110-C0201 y CONSOLIDER MICINN-10-CSD2009-00046, así como las becas FPU AP2008-03380 y FPI BES-2011-044114.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Biela, M. Schweizer, S. Waffler and J. Kolar, "SiC versus Si—Evaluation of Potentials for Performance Improvement of Inverter and DC–DC Converter Systems by SiC Power Semiconductors," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 7, pp. 2872-2882, Jul. 2011.
- [2] G. Spiazzi, S. Buso, M. Citron, M. Corradin and R. Pierobon, "Performance evaluation of a Schottky SiC power diode in a boost PFC application," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 6, pp. 1249- 1253, Nov. 2003.
- [3] B. Lu, W. Dong, Q. Zhao and F. Lee, "Performance evaluation of CoolMOS and SiC diode for single-phase power factor correction applications," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC '03. Eighteenth Annual IEEE*, vol. 2.
- [4] F. Chimento, S. Musumeci, A. Raciti, M. Melito and G. Sorrentino, "Super-Junction MOSFET and SiC Diode Application for the Efficiency Improvement in a Boost PFC Converter," *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*.
- [5] M. Hernando, A. Fernandez, J. Garcia, D. Lamar and M. Rascon, "Comparing Si and SiC diode performance in commercial AC-to-DC rectifiers with power-factor correction," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 2, pp. 705- 707, Apr. 2006.
- [6] SemiSouth, "http://semisouth.com/," [Online]. [Accessed 12 11 2012].
- [7] Cree, "http://www.cree.com/power," [Online]. [Accessed 14 11 2012].
- [8] R. Shillington, P. Gaynor, M. Harrison and B. Heffernan, "Applications of silicon carbide JFETs in power converters," *Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2010 20th Australasian*, pp. 1-6, Dec. 2010.
- [9] R. Mousa, D. Planson, H. Morel, B. Allard and C. Raynaud, "Modeling and high temperature characterization of SiC-JFET," *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE*, pp. 3111-3117, 2008.
- [10] T. Friedli, S. Round, D. Hassler and J. Kolar, "Design and Performance of a 200-kHz All-SiC JFET Current DC-Link Back-to-Back Converter," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 45, no. 5, pp. 1868-1878, Sept. 2009.
- [11] Y. Durrani, E. Aeloiza, L. Palma and P. Enjeti, "An Integrated Silicon Carbide (SiC) Based Single Phase Rectifier with Power Factor Correction," *Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th*, pp. 2810-2816, 2005.
- [12] L. Huber, Y. Jang and M. Jovanovic, "Performance Evaluation of Bridgeless PFC Boost Rectifiers," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 3, pp. 1381-1390, May 2008.
- [13] H.-Y. Tsai, T.-H. Hsia and D. Chen, "A Family of Zero-Voltage-Transition Bridgeless Power-Factor-Correction Circuits With a Zero-Current-Switching Auxiliary Switch," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 5, pp. 1848-1855, May 2010.
- [14] Y. Jang and M. Jovanovic, "A Bridgeless PFC Boost Rectifier With Optimized Magnetic Utilization," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 1, pp. 85-93, Jan. 2009..
- [15] K. Mino, H. Matsumoto, S. Fujita, Y. Nemoto, D. Kawasaki, R. Yamada and N. Tawada, "Novel bridgeless PFC converters with low inrush current stress and high efficiency," *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, pp. 1733-1739, Jun. 2010.
- [16] Y. H. a. M. Mino, "High-density bidirectional rectifier for next generation 380-V DC distribution system," *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE*, pp. 2455-2460, Feb. 2012.
- [17] C. Cass, R. Burgos, F. Wang and D. Boroyevich, "Three-phase AC Buck Rectifier using Normally-On SiC JFETs at 150 kHz Switching Frequency," *Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE*, pp. 2162-2167, 2007.
- [18] L. Huber and M. Jovanovic, "Performance evaluation of synchronous rectification in front-end full-bridge rectifiers," *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE*, pp. 310-316, Feb-2012.
- [19] W. Zhong, S. Hui, W. Ho and X. Liu, "Using Self-Driven AC–DC Synchronous Rectifier as a Direct Replacement for Traditional Power Diode Rectifier," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 1, pp. 392-401, Jan. 2012.
- [20] J. J. Zhang and IR, "GaN-based device cascoded with an integrated FET/Schottky diode device". USA Patent US8084783B2, 27 Dec 2011.