

Técnica de maestro-esclavo aplicada a la agrupación modular en paralelo para la mejora del rendimiento

Aitor Vázquez, Alberto Rodríguez, Juan Rodríguez, Diego G. Lamar y Marta M. Hernando

Universidad de Oviedo. Grupo de Sistemas Electrónicos de Alimentación (SEA)
Edificio Departamental nº 3. Campus Universitario de Viesques. 33204 Gijón. España
vazquezaitor@uniovi.es

Resumen—La agrupación modular en paralelo (IPOP) es una solución interesante para convertidores CC-CC en los que se busque incrementar la robustez, la flexibilidad y el rendimiento. Cuando se requiere conversiones bidireccionales en aplicaciones de gestión de energía, el rendimiento a media y baja carga debe mantenerse muy elevado. Con el objetivo de maximizar el rendimiento en un rango de potencias amplio, en este artículo se presenta una técnica de control maestro-esclavo para un convertidor modular IPOP. La técnica propuesta se compara de manera teórica con la técnica clásica de entrelazado (o control balanceado de la corriente) y con la técnica de encendido secuencial. La técnica de control se ha validado con un prototipo experimental de 2kW, con tensiones de 150V y 400V, basado en el convertidor elevador síncrono trabajando en modo QSW-ZVS.

Palabras clave—Técnicas de agrupación modular, convertidores bidireccionales, entrelazado IPOP, maestro-esclavo, QSW-ZVS.

I. INTRODUCCIÓN

Los convertidores CC-CC bidireccionales se han convertido en uno de los campos con mayor interés en los últimos años. Existen un buen número de aplicaciones en donde estos convertidores bidireccionales son utilizados mayoritariamente. Algunos buenos ejemplos son los sistemas de recuperación de energía, sistemas de alimentación de motores y máquinas eléctricas, gestión de baterías o la movilidad eléctrica. Cuando no se precisa un asilamiento galvánico entre la entrada y la salida del convertidor bidireccional, las versiones de las topologías elevadora o reductora son las más interesantes debido al reducido número de componentes que utilizan, a su bajo coste y a la elevada densidad de potencia que puede lograrse [1]. Pese a estas interesantes propiedades, estos convertidores poseen al menos dos importantes restricciones en comparación con otras topologías bidireccionales más complejas: la limitación en cuanto a la potencia que pueden manejar y el rendimiento. Una posible opción para afrontar estas limitaciones son las agrupaciones modulares o multifase, en especial la agrupación en paralelo, (IPOP, por su acrónimo inglés *Input Paralell Output Paralell*) [2], [3], que permiten lograr un rendimiento elevado procesando niveles de potencia del orden de kW.

Por otro lado, en la mayoría de las aplicaciones mencionadas anteriormente, el convertidor se encuentra trabajando una gran parte del tiempo a media o baja carga y sólo durante un porcentaje muy bajo del tiempo total de funcionamiento el convertidor opera a plena carga. Este escenario es muy común en sistemas de alimentación para energías renovables (i.e.

energía solar o turbinas eólicas) o en sistemas basados en micro-redes de distribución o edificación autónoma (o *smart grids*) [4]-[10]. Pese a que el convertidor ha de ser diseñado para poder manejar la potencia máxima, en términos de eficiencia energética es más interesante que el diseño del convertidor también tenga en cuenta esta operación a media y baja carga. Idealmente, el convertidor no sólo debería tener un buen rendimiento a plena carga, sino también a media y baja carga (i.e. un rendimiento prácticamente plano). En este sentido, las técnicas de agrupación modular permiten afrontar este problema de una manera más sencilla, de forma que puedan combinarse determinados módulos y su funcionamiento para optimizar el rendimiento del convertidor modular (i.e. del convertidor global formado por los módulos de potencia) en todo el rango de operación.

En este artículo se presenta una posible técnica de control de maestro-esclavo para poder aplicarse a un convertidor modular basado en una agrupación en paralelo de varios convertidores, de forma que se consiga mejorar el rendimiento en un determinado rango de potencias de operación en comparación con las técnicas de control tradicionales. El artículo se ha organizado siguiendo la siguiente estructura. En la sección II se presenta en un análisis teórico de un convertidor modular IPOP, junto con la técnica clásica de control balanceado y de control de encendido secuencial. La técnica de maestro-esclavo se presenta a continuación comparándola con las anteriores. Un ejemplo de diseño de las tres técnicas y una comparativa teórica se resume en la sección III. En la sección IV se presentan los resultados experimentales medidos con un convertidor elevador síncrono QSW-ZVS de seis fases para una potencia máxima de 2kW. Por último, las principales conclusiones alcanzadas en este trabajo se resumen en la sección V.

II. TÉCNICA DE MAESTRO-ESCLAVO PROPUESTA PARA LA AGRUPACIÓN MODULAR EN PARALELO (IPOP)

Un esquema general para un convertidor modular IPOP de N módulos o fases se muestra en la Fig. 1. Teniendo en cuenta este esquema general, existen una serie de relaciones y ecuaciones que pueden utilizarse de forma genérica para comparar distintas técnicas de control aplicadas a este convertidor modular. Como puede verse, las tensiones de entrada y de salida (V_G y V_O respectivamente) son las mismas para todos los módulos. Las corrientes de entrada y de salida (i_G e i_O respectivamente) resultan ser la suma de las corrientes de cada módulo individual. Esto puede expresarse como

$$i_G = \sum_{n=1}^N i_{Gn}, \quad i_O = \sum_{n=1}^N i_{On}, \quad (1)$$

donde N es el número total de módulos e i_{Gn} es la corriente de entrada del módulo n -ésimo. Las potencias de entrada y de salida totales se definen entonces como

$$P_G = \sum_{n=1}^N P_{Gn}, \quad P_O = \sum_{n=1}^N P_{On}, \quad (2)$$

mientras que las pérdidas totales también pueden calcularse como la suma de las pérdidas de cada módulo ($Loss_n$)

$$Loss_T = \sum_{n=1}^N Loss_n. \quad (3)$$

El rendimiento total del convertidor modular es

$$\eta_T = \frac{P_O}{P_G} = \frac{P_G - Loss_T}{P_G}, \quad (4)$$

y, de manera similar, el rendimiento del módulo n -ésimo es

$$\eta_n = \frac{P_{On}}{P_{Gn}} = \frac{P_{Gn} - Loss_n}{P_{Gn}}, \quad (5)$$

Las ecuaciones (1) a (5) son genéricas para cualquier convertidor modular que utilice una agrupación IPOP y son útiles para poder comparar cada una de las técnicas de control que se vayan a aplicar.

La estrategia de control más clásica para las agrupaciones IPOP, es aquella en la cada módulo procesa la misma cantidad de potencia o, en este caso, que cada módulo procese el mismo nivel de corriente [11]. Esta ecuilización de corrientes se busca principalmente cuando todos los módulos han sido diseñados para procesar el mismo nivel de potencia (es decir, todos los módulos son iguales), de forma que todos trabajen en el mismo punto de funcionamiento. Matemáticamente, esta condición de equilibrio puede describirse utilizando la ecuación (1) como

$$i_{Gn-ba} = \frac{i_G}{N}, \quad i_{On-ba} = \frac{i_O}{N}. \quad (6)$$

Las potencias de entrada y de salida se obtienen directamente sustituyendo (6) en (2)

$$P_{G-ba} = N \cdot P_{Gn}, \quad P_{O-ba} = N \cdot P_{On}. \quad (7)$$

Por otro lado las pérdidas totales bajo esta técnica de control balanceado se pueden expresar mediante (3) quedando como

$$Loss_{T-ba} = N \cdot Loss_n, \quad (8)$$

y el rendimiento del convertidor modular utilizando esta técnica se puede expresar como

$$\eta_{T-ba} = \frac{P_{O-ba}}{P_{G-ba}} = \frac{N \cdot P_{On}}{N \cdot P_{Gn}} = \eta_n. \quad (9)$$

La ecuación (9) establece que el rendimiento del convertidor modular controlado con la técnica de control balanceado será el rendimiento obtenido para un módulo, independientemente del número de módulos utilizados. En otras palabras, cuando el convertidor modular se encuentre procesando un determinado

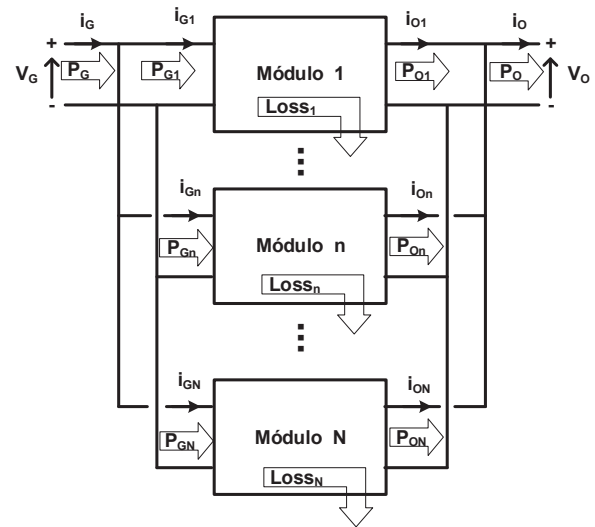


Fig. 1. Esquema general de un convertidor modular en agrupación IPOP.

nivel de potencia (P_T), todos los módulos estarán procesando una potencia equivalente de P_T/N .

Una segunda estrategia de control para el convertidor modular IPOP consiste en mantener activos únicamente el número de módulos necesarios para suministrar un determinado nivel de potencia. A esta estrategia se la denomina como control no balanceado, control adaptativo o encendido secuencial, como se estudia en [11], [12]. En esta técnica, cada módulo se enciende (i.e. procesa potencia) cuando la potencia crece (y se apagan a medida que la potencia total descende). Por lo tanto, únicamente un número determinado de módulos se encuentran procesando potencia simultáneamente. Este número de módulos activos (llamado aquí N_{unb}) será igual al cociente entre la potencia total demandada y la potencia máxima que puede procesar un módulo. Por simplicidad, se ha asumido que hay un número N de módulos totales, y que la potencia máxima que puede procesar un módulo se corresponde con P_T/N , siendo P_T la potencia máxima del convertidor modular (para una comparativa más justa, estos datos coinciden con los utilizados en la técnica de control balanceado mencionada anteriormente). Atendiendo a este perfil, cuando la potencia total es inferior a P_T/N , únicamente hay un módulo activo, proporcionando toda la potencia. El resto de módulos permanecen inactivos (i.e. no procesan potencia). Cuando la potencia total demandada se encuentra entre P_T/N y $2P_T/N$, hay dos módulos de potencia activos. Uno de ellos procesa su máxima potencia individual (i.e. P_T/N), mientras que el segundo módulo procesa la diferencia entre la potencia demandada y P_T/N . Y así sucesivamente hasta alcanzar la máxima potencia demandada. El proceso de apagado de módulos es inverso al descrito para su encendido. Matemáticamente, las pérdidas totales utilizando esta técnica de control pueden calcularse como

$$Loss_{T-unb} = Loss_{n-unb} + (N_{unb} - 1) \cdot Loss_{n-unb@Pmax}, \quad (10)$$

donde $Loss_{n-unb}$ son las pérdidas del módulo n -ésimo y $Loss_{n-unb@Pmax}$ son las pérdidas del módulo trabajando a su máxima potencia (i.e. cuando se encuentra saturado a P_T/N).

Como ya se ha comentado, el número total de módulos activos N_{unb} , varía desde 1 a $N - 1$. En general, las pérdidas de un módulo a plena carga ($Loss_{n-unb@P_{max}}$) serán menores que las pérdidas de dicho módulo a baja carga (i.e. normalmente se diseña el módulo de potencia para obtener el máximo rendimiento a plena carga). Por lo tanto, esta técnica de control consigue, a priori, mejorar el rendimiento a media y baja carga en comparación con la técnica balanceada comentada anteriormente. No obstante, esta técnica de control no es la óptima desde el punto de vista de obtener el máximo rendimiento posible a media y baja carga. Esto se debe a que cuando un módulo se activa, comienza a trabajar a baja carga, donde su rendimiento puede ser muy bajo. Este problema es común a la técnica balanceada como a la de encendido secuencial. La única diferencia entre ellas es que en ésta última únicamente un módulo trabaja a baja carga, y no los N módulos como ocurriría en el caso balanceado. Así pues, es posible plantear una técnica en la que se evite que uno o varios módulos trabajen a baja carga.

La técnica de maestro-esclavo que se propone se basa en que un único módulo regule la tensión de salida y trabaje a potencia variable (maestro) mientras que el resto de módulos trabajen en lazo abierto aportando un nivel de potencia fijo (esclavos). En el caso particular de la agrupación IPOP, los esclavos se comportan como fuentes de corriente, aportando un nivel de potencia máximo denotado como P_{slave} . El módulo maestro permanece siempre activo, mientras que los esclavos se activan o desactivan en función de la potencia demandada por la carga en cada momento. Para evitar que el maestro trabaje con niveles de potencia muy bajos, su potencia máxima (P_{Mmax}) es mayor que la potencia de un esclavo (P_{slave}). Por lo tanto, el maestro se diseña para trabajar en un cierto rango de potencia (concretamente entre $P_{Mmax} - P_{slave}$ y P_{Mmax}), donde su rendimiento es suficientemente elevado. Los esclavos se diseñan teniendo en cuenta que van a operar únicamente a plena potencia, por lo que puede optimizarse su rendimiento únicamente en este punto de trabajo. El número de esclavos necesarios puede obtenerse a partir de las potencias del maestro y del esclavo en función de la potencia total demandada por la carga P_T , como

$$N_S = \frac{P_T - P_{Mmax}}{P_{slave}} \quad (11)$$

Las pérdidas totales del convertidor modular utilizando esta técnica pueden calcularse de nuevo particularizando la ecuación (3), quedando éstas como

$$Loss_{T-M_S} = Loss_M + (N_{S-active} - 1) \cdot Loss_{Slave}, \quad (12)$$

donde $Loss_M$ son las pérdidas del maestro, $Loss_{Slave}$ son las pérdidas del esclavo y $N_{S-active}$ es el número de esclavos activos. Al igual que en el caso de la técnica de encendido secuencial, $N_{S-active}$ varía desde 1 a N_S , incrementándose o decreciéndose en función del perfil de carga. Cabe destacar que la técnica maestro-esclavo rompe con la filosofía de las dos técnicas anteriores. En primer lugar, en este caso los módulos ya no son iguales, como sí ocurría en las dos técnicas anteriores, en donde todos los módulos pueden diseñarse y construirse de igual forma. No ocurre esto en este caso, en donde han de diseñarse dos módulos distintos (un maestro y varios esclavos). En

segundo lugar, para conseguir un rendimiento elevado a media y baja potencia, el módulo esclavo debe diseñarse para que su rendimiento a la potencia máxima (P_{slave}) sea mayor o igual que el rendimiento del maestro trabajando a esa potencia P_{slave} . En comparación con las técnicas anteriores, esta condición puede expresarse matemáticamente a partir de las ecuaciones (8) y (10), asumiendo que el módulo maestro es idéntico a los módulos utilizados en estas técnicas,

$$Loss_{Slave} < k_{eff} \cdot \left(\frac{N_{unb} - 1}{N_S - 1} \right) \cdot Loss_{n-unb@P_{nmax}} \quad (13)$$

$$k_{eff} = \frac{P_{slave} \cdot (1 - \eta_{slave})}{\left(\frac{N_{unb} - 1}{N_S - 1} \right) \cdot Loss_{n-unb@P_{nmax}}} \quad (14)$$

La ecuación (13) establece una cota superior para las pérdidas del esclavo en función de las pérdidas de la técnica de encendido secuencial ($Loss_{n-unb@P_{nmax}}$). El parámetro k_{eff} se emplea para cuantificar la mejora de la técnica del maestro-esclavo respecto a las técnicas anteriores. Este parámetro es siempre menor que 1 y puede deducirse su valor utilizando la ecuación (14) si se conoce el rendimiento del módulo esclavo (η_{slave}). Un valor de $k_{eff} = 1$ implica que el rendimiento que obtendrá la técnica maestro-esclavo será idéntico a la técnica de encendido secuencial, por lo que a menor valor de k_{eff} , mayor será el rendimiento obtenido para la técnica maestro-esclavo.

III. EJEMPLO DE DISEÑO

Para clarificar la técnica de control propuesta, en esta sección se desarrolla un ejemplo de diseño y una pequeña comparativa del rendimiento teórico obtenido. Las especificaciones de diseño se recogen en la Tabla I. A partir de las potencias fijadas en el diseño, el número de módulos N para la técnica balanceada y la técnica de encendido secuencial es 4. Utilizando la técnica balanceada, no existe una secuencia de encendido, puesto que todos los módulos se encuentran procesando la misma cantidad de potencia en función de la carga demandada. Si se adopta la técnica de encendido secuencial, la secuencia de encendido de cada módulo puede verse en la Fig. 2(a). Para la técnica maestro-esclavo el diseño a seguir es ligeramente distinto. Existen cuatro pasos a cumplir en este diseño: rendimiento del maestro, selección de la potencia del esclavo, calcular el número de esclavos y calcular el rendimiento del esclavo. En primer lugar, ha de estimarse o medirse el rendimiento del maestro. De cara a obtener una comparativa más justa, se ha supuesto que el módulo maestro es idéntico al módulo utilizado en las técnicas anteriores, tanto su topología, su potencia máxima y su rendimiento. Éste último se ha estimado utilizando el modelo de pérdidas para un convertidor elevador síncrono operando en modo QSW-ZVS (modo propuesto originalmente en [13] y analizado en [14] y [15]). Se han tenido en cuenta tanto las pérdidas en los semiconductores (por conducción y por conmutación), las pérdidas en la inductancia y las pérdidas en los condensadores. No se han tenido en cuenta ni las pérdidas en el *driver* de control, ni en la placa de circuito impreso. De igual forma, se ha supuesto que el módulo esclavo utiliza la misma topología que el maestro, aunque se diseña para una potencia distinta. El rendimiento teórico estimado para el módulo maestro se muestra en la Fig. 3. Como cabría esperar, el rendimiento es máximo a plena carga y

desciende a medida que la potencia que maneja el módulo decrece. Sobre esta curva de rendimiento ha de seleccionarse el rango de funcionamiento del módulo maestro. En este caso, se ha fijado la potencia mínima del maestro en 200W, donde su rendimiento es aproximadamente un 97,25% (remarcado en la figura Fig. 3 con las flechas). Puede verse que por debajo de esta potencia, el rendimiento cae drásticamente, mientras que por encima crece ligeramente hasta el rendimiento máximo de 97,39%.

TABLA I. ESPECIFICACIONES PARA EL EJEMPLO DE DISEÑO

Parámetro	Valor
Potencia total P_T	2000W
Potencia de un módulo P_n	500W
Número de módulos N (balanceado y no balanceado)	4
Potencia del módulo maestro P_M	500W
Potencia del módulo esclavo P_{slave}	300W
Número de esclavos (N_s)	6

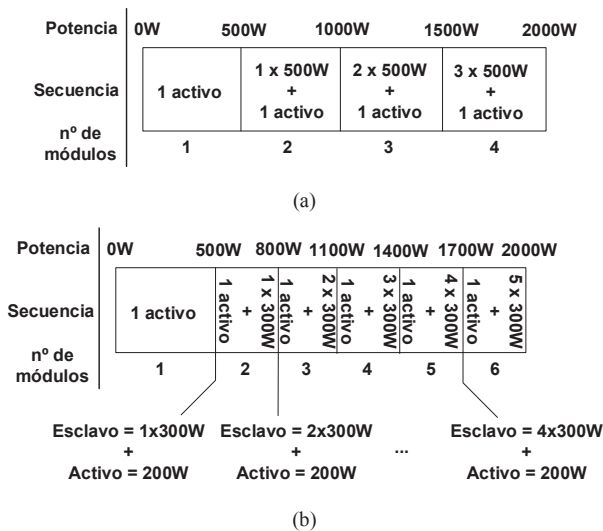


Fig. 2. Estrategia de control y secuencia de encendido y apagado. (a) Con encendido secuencial. (b) Con maestro-esclavo.

Una vez que se ha fijado el rango de funcionamiento del maestro, el segundo paso es calcular la potencia máxima del esclavo, que puede obtenerse directamente como la diferencia entre la potencia máxima y mínima que procesa el maestro. En este caso, la potencia del esclavo es 300W. Conocido el valor de P_{slave} , se usa la ecuación (11) para hallar el número de esclavos necesarios, N_s , que resulta ser para este ejemplo de 6. El último paso del diseño es calcular el valor mínimo del rendimiento del módulo esclavo (o el valor máximo de sus pérdidas) a través de la ecuación (13). Este rendimiento ha de ser superior al rendimiento del módulo maestro cuando se encuentra trabajando a 300W (P_{slave}), o, de forma análoga, al obtenido en la ecuación (13) cuando $k_{eff} = 1$. En este ejemplo, el valor mínimo del rendimiento del esclavo es de 97,38%. Puesto que se persigue mejorar el rendimiento de las técnicas anteriores, se fija un valor

de $k_{eff} = 0,8$, con el que se obtiene un rendimiento del módulo esclavo del 97,98%. Por último, la secuencia de encendido también es ligeramente diferente y se ha representado en la Fig. 2(b) con los datos utilizados en este ejemplo. Teniendo en cuenta estos diseños, se ha obtenido el rendimiento del convertidor modular IPOP con cada una de las técnicas de control. Para ello, se ha empleado el rendimiento de un módulo mostrado en la Fig. 3 y las ecuaciones (8), (10) y (12). Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 4. Como puede verse, el rendimiento obtenido por la técnica balanceada es idéntico al obtenido por un único módulo (traza azul). Alcanza su máximo, 97,39% a plena potencia, 2kW. La técnica de encendido secuencial (traza negra), obtiene el mismo rendimiento que la primera a plena potencia. Sin embargo, para potencias inferiores a 1kW (media carga) logra rendimientos mejores que ésta, especialmente a muy baja carga (por debajo de 200W). Por último, la técnica maestro-esclavo logra mejorar a las dos anteriores tanto a plena carga (donde se obtiene un 98,84%, lo que supone una mejora de punto y medio), como a media y baja carga, donde el rendimiento se sitúa siempre por encima del 98% (nuevamente, entre un punto y punto y medio por encima). Cabe destacar que por debajo de 500W el rendimiento obtenido por la técnica maestro-esclavo es el mismo que para la técnica de encendido secuencial, puesto que en ambos casos únicamente se encuentra un módulo procesando potencia.

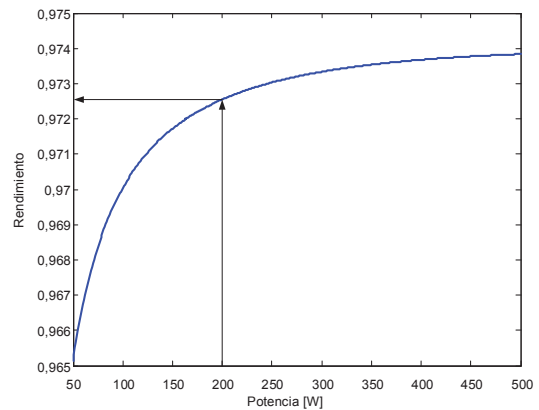


Fig. 3. Rendimiento teórico estimado para un módulo.

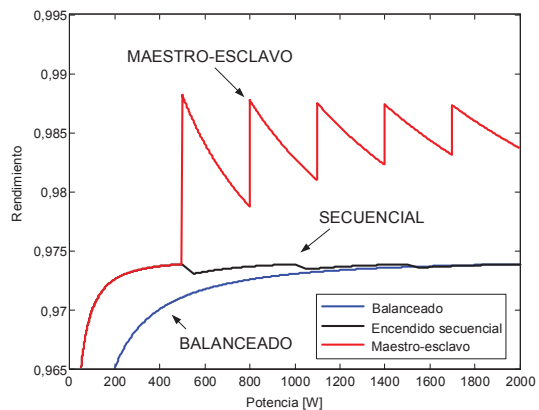


Fig. 4. Comparativa del rendimiento teórico para el convertidor modular IPOP obtenido para cada técnica de control.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para validar la técnica propuesta, se ha construido un convertidor modular IPOP en el laboratorio. Para ello, se ha seguido el diseño y las especificaciones utilizadas en la sección anterior. La topología seleccionada ha sido el convertidor elevador síncrono trabajando en modo QSW-ZVS, con tensiones de 150V y 400V respectivamente. Los transistores utilizados son CoolMos de Infineon modelo IPW60R160C6 y la frecuencia de conmutación nominal es de 100kHz (mínima de 80kHz y máxima de 140kHz). Se han fabricado dos tipos de convertidor elevador, uno preparado para trabajar a 500W, que hará las veces de módulo maestro y otro diseñado para una potencia de 300W, que hará las veces de módulo esclavo. El único cambio entre uno y otro es el valor de la inductancia (97μH ETD42 para el maestro, 132μH ETD39 para el esclavo, ambos con material 3F3 de Ferroxcube). El control de los convertidores y las distintas técnicas o estrategias de control se han implementado en una FPGA Spartan 6 de Xilinx a través de la plataforma Nexys 3 de Digilent, junto con el conversor A/D de 12bits modelo AD7476 de Analog.

La curva de rendimiento obtenida para el módulo maestro se muestra en la Fig. 5. Como se puede ver, el rendimiento obtenido es ligeramente superior al estimado teóricamente, situándose en un 98,01% a plena carga. No obstante, el rango de funcionamiento del módulo maestro puede mantenerse igual que el utilizado en el ejemplo de diseño anterior, esto es, entre 200W y 500W. El módulo esclavo debe procesar 300W y su rendimiento debe ser superior al del módulo maestro trabajando a 300W, que es 97,87% en este caso (véase de nuevo la Fig. 5). El rendimiento medido para este convertidor a plena carga es de 98,7%, con lo que se cumple la condición de mejora de rendimiento (concretamente, se opera con un valor de $k_{eff} = 0,61$).

Una vez comprobado experimentalmente este diseño, se midió el rendimiento del convertidor modular IPOP siguiendo las especificaciones de la Tabla I. En la Fig. 6 se muestra una comparativa de los resultados obtenidos para las tres técnicas de control. Concretamente, en la Fig. 6(a) se muestra una comparativa del rendimiento medido. La técnica maestro-esclavo obtiene una mejora de entre 0,5 y 0,8 puntos en el rendimiento entre 500W y 2kW. También puede apreciarse que por debajo de 500W los rendimientos obtenidos por el maestro-esclavo coinciden con las mediciones obtenidas para la técnica de encendido secuencial, como cabría esperar. Las diferencias entre las distintas técnicas pueden apreciarse de manera más nítida en la Fig. 6(b), en donde se han representado las pérdidas totales del convertidor modular (sin tener en cuenta las pérdidas en la etapa de control). En este caso puede verse cómo las pérdidas de la técnica maestro-esclavo permanecen en torno a 10W aproximadamente por debajo de las pérdidas obtenidas para la técnica de balanceo. Para completar la validación experimental de la técnica de control propuesta, se han utilizado dos rendimientos ponderados propuestos por la Comisión de Energía de California: la Eficiencia Europea y la eficiencia CEC. Estos rendimientos ponderados permiten comparar el rendimiento de un convertidor en un determinado rango de operación y no sólo en un punto de funcionamiento. Ambos se utilizan de manera generalizada en aplicaciones de generación de energía solar [16], y se definen matemáticamente como

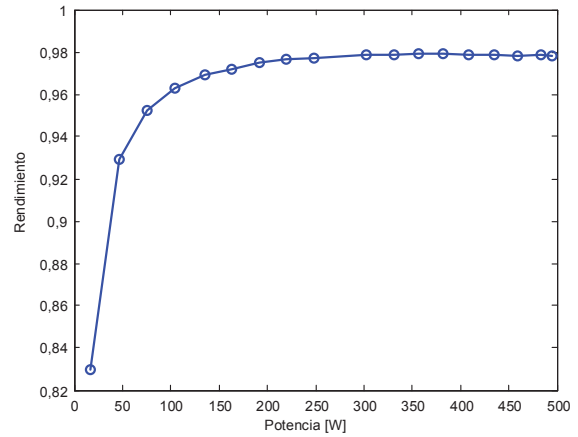
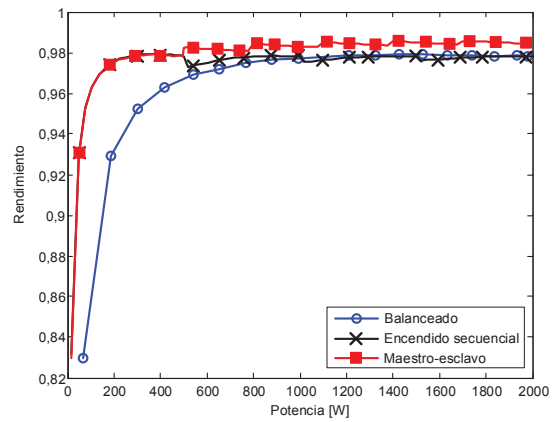
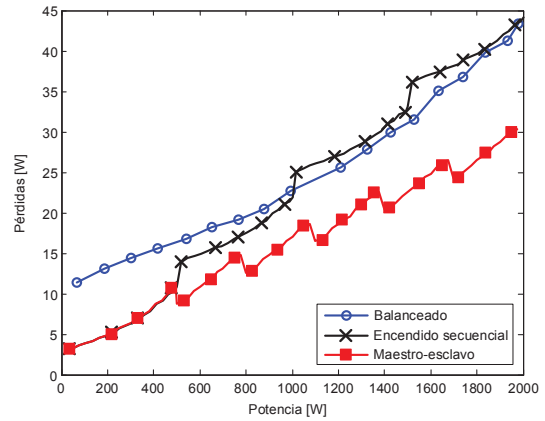


Fig. 5. Rendimiento medido del módulo maestro.



(a)



(b)

Fig. 6. Comparativa de las técnicas balanceada, de encendido secuencial y maestro-esclavo. (a) Rendimiento total medido. (b) Pérdidas totales.

$$EuroEff = 0.03 \cdot \eta_{5\%} + 0.06 \cdot \eta_{10\%} + 0.13 \cdot \eta_{20\%} + 0.1 \cdot \eta_{30\%} + 0.48 \cdot \eta_{50\%} + 0.2 \cdot \eta_{100\%} \tag{14}$$

$$CECEff = 0.04 \cdot \eta_{10\%} + 0.05 \cdot \eta_{20\%} + 0.12 \cdot \eta_{30\%} + 0.21 \cdot \eta_{50\%} + 0.53 \cdot \eta_{75\%} + 0.05 \cdot \eta_{100\%} \tag{15}$$

Utilizando estos rendimientos ponderados, es posible establecer una segunda comparativa en base a los rendimientos medidos, que se recoge en la Tabla II. Como puede verse, el encendido secuencial logra una mejora que no llega a medio punto con respecto a la técnica balanceada, mientras que el control maestro-esclavo propuesto casi alcanza un punto de mejora con respecto a esta técnica y aproximadamente medio punto respecto a la técnica de encendido secuencial.

TABLA II. COMPARATIVA DE LA EFICIENCIA EUROPEA Y DE LA CEC

Método	Balanceado	Encendido secuencial	Maestro-esclavo
Eficiencia Europea [%]	97,20	97,60	98,16
CEC [%]	97,60	97,61	98,35
Mejora [%]	-	0,4136	0,9936

V. CONCLUSIONES

Los convertidores modulares abren la posibilidad de aplicar ciertas estrategias de control que mejoren alguno de los parámetros de funcionamiento del convertidor, en comparación con un único convertidor. Por lo general, el rendimiento es siempre una especificación exigente donde cualquier mejora debe ser analizada. En aquellas aplicaciones donde se precise un convertidor bidireccional, la gestión de la energía es un factor crítico y el rendimiento a media y baja carga cobran también una especial relevancia. En este artículo se ha estudiado una estrategia de maestro-esclavo con el objetivo de mejorar el rendimiento obtenido por un convertidor modular IPOP. Utilizando dos módulos distintos (un maestro y varios esclavos), es posible combinar las propiedades de ambos para lograr un rendimiento mayor que una técnica de control balanceado y de encendido secuencial. Los resultados teóricos del análisis planteado, así como los rendimientos estimados han sido corroborados experimentalmente con un prototipo basado en la topología elevador síncrono QSW-ZVS, consiguiendo mejoras de entre 1 a 1,5 puntos en el rendimiento. También se ha utilizado un rendimiento ponderado para evaluar el rendimiento en todo el rango de operación del convertidor, obteniendo con estas eficiencias hasta 1 punto de mejora. Pese a que la técnica maestro-esclavo aquí planteada puede suponer una mejora del rendimiento, conviene destacar ciertos aspectos críticos. En primer lugar, esta técnica exige un diseño algo más elaborado que las dos técnicas convencionales. Han de diseñarse y construirse al menos dos tipos distintos de módulos (un maestro y uno o varios esclavos). Además, el número total de módulos necesarios es mayor que en el caso de las dos técnicas anteriores. En segundo lugar, el rendimiento del esclavo ha de ser mejor que el rendimiento del maestro, lo que no puede resultar sencillo de conseguir. Y en tercer lugar, la implementación del esquema de control es ligeramente más compleja que para la técnica de control balanceado (i.e. gestión del número de esclavos activos, activación y desactivación de los mismos, regulación, etc.).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía del Gobierno de España, a través de los proyectos CONSOLIDER RUE MICINN-10-CSD2009-00046 y DPI2013-47176-C2-2-R, los fondos

FEDER, y la beca de formación del personal investigador FPI BES-2011-044114.

REFERENCIAS

- [1] D. Sable, F. Lee and B. Cho, "A zero-voltage-switching bidirectional battery charger/discharger for the NASA EOS satellite," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1992. APEC '92. Conference Proceedings 1992., Seventh Annual.*
- [2] G. Shuqiu, Y. Ming, D. Xiying and H. Bin, "Research of interleaved three-phase bidirectional DC/DC converter based on control type soft switching," *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*, pp. 1738-1741, Oct. 2008.
- [3] O. Garcia, P. Zumel, A. de Castro and A. Cobos, "Automotive DC-DC bidirectional converter made with many interleaved buck stages," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 3, pp. 578-586, May 2006.
- [4] N. Tutkun and E. San, "Optimal power scheduling of an off-grid renewable hybrid system used for heating and lighting in a typical residential house," *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013 13th International Conference on*, pp. 352-355, Nov. 2013.
- [5] M. Beshr, H. Khater and A. Abdelraouf, "Modelling of a residential solar stand-alone power system," *Nuclear & Renewable Energy Conference (INREC), 2010 1st International*, pp. 1-6, March 2010.
- [6] M. Lakshmi, C. Sai Babu and S. Prasad, "Design of off-grid homes with Renewable energy sources," *Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2012), IET Chennai 3rd International on*, pp. 1-7, Dec. 2012.
- [7] C. H. Dharmakeerthi, A. Atputharajah and J. Ekanayake, "Field experience with an islanded micro wind power plant," *Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008. IEEE International Conference on*, pp. 966-971, Nov. 2008.
- [8] D. Yadav, S. Girimaji and T. Bhatti, "Optimal hybrid power system design using HOMER," *Power Electronics (IICPE), 2012 IEEE 5th India International Conference on*, pp. 1-6, Dec. 2012.
- [9] U.S. Energy Information Administration (EIA), "EiA," [Online]. Available: <http://www.eia.gov/electricity/>. [Accessed Jun. 2014].
- [10] United Kingdom Government Publications, "Household Electricity Survey," Feb. 2014. [Online]. Available: <https://www.gov.uk/government/publications/household-electricity-survey>. [Accessed Jun. 2014].
- [11] S. Waffler and J. Kolar, "Efficiency optimization of an automotive multi-phase bi-directional DC-DC converter," *Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International*, pp. 566-572, May 2009.
- [12] M. Sakka, J. Van Mierlo and H. Gualous, "Efficiency optimization of a 30KW interleaved 4-channels DC/DC converter with variable number of active channels," *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on*, pp. 1-8, 2011.
- [13] V. Vorperian, "Quasi-square-wave converters: topologies and analysis," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 2, pp. 183-191, Apr 1988.
- [14] J. Zhang, J.-S. Lai, R.-Y. Kim and W. Yu, "High-Power Density Design of a Soft-Switching High-Power Bidirectional dc-dc Converter," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 4, pp. 1145-1153, July 2007.
- [15] P. Andreassen, G. Guidi and T. Undeland, "Digital Variable Frequency Control for Zero Voltage Switching and Interleaving of Synchronous Buck Converters," *Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006. 12th International*, vol. 1, pp. 184-188, Sept. 2006.
- [16] C. W. C. E. C. B. Brooks, "Guideline for the use of the Performance Test Protocol for Evaluating Inverters Used in Grid-Connected Photovoltaic Systems," 2005. [Online]. Available: http://www.gosolarcalifornia.ca.gov/equipment/documents/Sandia_Guide_line_2005.pdf. [Accessed Jun. 2014].