

Análisis de topologías para la simplificación del bus de potencia en satélites

Abraham López¹, Manuel Arias¹, Pablo F. Miaja¹ y Arturo Fernández²

¹Universidad de Oviedo, Grupo de Sistemas Electrónicos de Alimentación (e-mail: lopezabraham@uniovi.es)

Edificio Departamental N° 3. Campus Universitario de Viesques. 33204 Gijón. España

²Electrical Power Management Section European Space Agency (ESA), Noordwijk, Holanda

Resumen: El subsistema de potencia de un satélite es el encargado de suministrar la energía obtenida a partir de un panel solar y una batería al resto de subsistemas del satélite. Dado que no existe una estandarización en los niveles de potencia del satélite, ni en la construcción de su panel solar (muy dependiente del espacio disponible para los mismos), los distintos convertidores que forman el subsistema de potencia suelen ser diseñados desde cero para cada misión, aumentando costes y tiempo de desarrollo. A raíz de una colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), se ha tratado de replantear el subsistema de potencia a nivel de convertidor, con el objetivo de desarrollar una única topología válida para todos los convertidores empleados en el mismo. De esta forma, el rediseño necesario para cada misión se vería drásticamente minimizado o, incluso, eliminado.

Este artículo presenta los resultados derivados del estudio realizado, resaltando qué topologías serían las más idóneas desde un punto de vista de estandarización respetando las restricciones de diseño impuestas por la ESA, y bajo la condición de maximizar el rendimiento. Finalmente, se presenta el uso del transformador electrónico como posible solución alternativa de cara a independizar el subsistema de potencia del diseño variable del panel solar. Para este caso se ha desarrollado un prototipo paralelizable donde se fijan las tensiones de entrada y salida en 56 V y 28 V respectivamente, para una potencia de trabajo de 200 W y una frecuencia de conmutación de 400 kHz.

Palabras clave: estandarización, fiabilidad, satélites, subsistema de potencia, transformador electrónico.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el subsistema de potencia típico en los satélites (Fig. 1) está formado por tres bloques: el SAR (*Solar Array Regulator*), el BCR (*Battery Charge Regulator*) y el BDR (*Battery Discharge Regulator*). El SAR es el encargado de extraer energía del panel solar, mientras que el BCR y el BDR se encargan de inyectar o extraer energía de las baterías en función del balance neto de potencias entre el panel solar y las cargas. Estos bloques están basados en convertidores CC/CC con diferentes especificaciones de potencia y de tensión de entrada y salida. Debido a esto, la solución actual se basa en emplear tres convertidores distintos, tanto en especificaciones como en topología. En el caso de los bloques SAR y BCR típicamente se emplean topologías *Buck* y *Superbuck*, mientras que para el BDR se emplean convertidores *Superboost* o *Weinberg*.

Por su parte, el sistema de distribución se basa en fuentes de alimentación que adaptan los niveles de tensión del bus de potencia (28, 50 o 100 V) a los niveles de tensión requeridos en las distintas partes del satélite.

La estructura típica de cada una suele ser la de un convertidor sencillo, que por normativa debe ser aislado (*flyback* o *forward*), seguido de un regulador lineal a la tensión requerida por el elemento al que se conecta.

Por razones de fiabilidad, se emplea redundancia (típicamente 2+1), con lo que cada bloque se compone de tres convertidores en paralelo dimensionados para la mitad de la potencia nominal. De esta forma, si se produjese un fallo en alguno de ellos, todavía se dispondría de dos capaces de proporcionar la potencia total necesaria. Para que esta redundancia sea efectiva, cada convertidor tiene que poder evitar que un fallo interno se propague fuera, afectando a los otros convertidores. Esto implica incluir interruptores adicionales en la entrada y salida del convertidor para permitir su desconexión del sistema en caso de fallo. Como es lógico, coste, tamaño y rendimiento se ven negativamente afectados.

Otro aspecto relevante del diseño aeroespacial es que no existe normalización en el diseño del panel solar o en la potencia nominal del satélite. Como consecuencia, las características de tensión y corriente del panel solar de cada satélite son distintas, por lo que el diseño del SAR debe plantearse desde cero. Los cambios de potencia nominal entre satélites hacen que el BCR y el BDR también deban ser rediseñados para cada misión.

Se hace necesario, dada la proliferación del uso de los satélites en la sociedad actual, el encontrar soluciones y planteamientos que permitan acortar los tiempos de desarrollo de un satélite y estandarizar su fabricación y sus componentes. La Agencia Espacial Europea (ESA) es consciente de esta necesidad y de las ventajas que una estandarización y homogeneización del subsistema de potencia supondrían de cara a los costes y fiabilidad de las misiones. En este artículo se recogen los resultados de un estudio realizado para la ESA en el que se persigue un doble objetivo en este sentido.

Por un lado se pretende encontrar la topología óptima que pueda ser empleada en los tres bloques del subsistema de potencia. Dicha topología debe ser capaz de elevar o reducir tensión en función del bloque en el que se coloque (SAR, BDR o BCR). Además, la topología debe estar protegida frente a la propagación de fallos. Por último, de todas las topologías válidas, aquella con un mayor rendimiento será considerada la óptima.

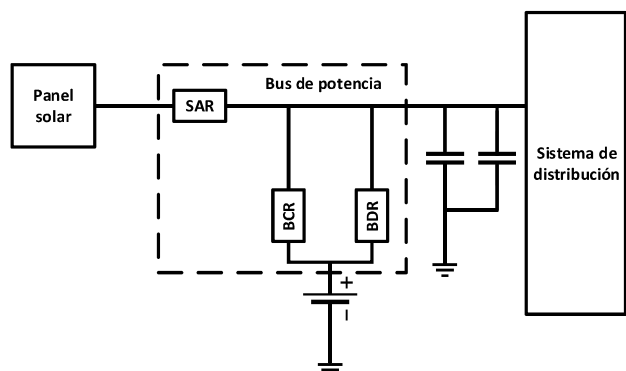


Fig. 1. Bus de potencia típico en satélites

Por otro lado, el segundo objetivo es pensar en nuevos esquemas del subsistema de potencia que reporten ventajas adicionales y que ahonden en reducir los tiempos de desarrollo.

Este artículo se organiza de la siguiente manera. En el apartado II se presenta un estudio sobre la fiabilidad de los componentes presentes en las topologías, así como también un método para la selección de los mismos. En el apartado III se presentan las posibles topologías que se podrían emplear en los bloques que forman el bus de potencia de los satélites. El apartado IV se centra en el análisis de un transformador electrónico (TE), se describe de manera resumida su estructura, y se plantean ventajas e inconvenientes de la misma. Finalmente, en el apartado V, se recogen las principales conclusiones de este artículo.

II. REQUISITOS Y CRITERIOS DE DISEÑO PARA LA SELECCIÓN DE TOPOLOGÍAS BÁSICAS MODULARES

La selección de la topología óptima para estandarizar los convertidores empleados en el subsistema de potencia debe atenerse a las reglas que rigen el diseño de convertidores para aplicaciones aeroespaciales, a los ya comentados requisitos impuestos por la ESA en la búsqueda de la topología óptima, y a las circunstancias propias del entorno en el que va a operar el convertidor (i.e. el espacio). Teniendo todo ello en cuenta, la necesidad de que el convertidor deba elevar o reducir la tensión en función del bloque en el que se vaya a implementar hace de las topologías aisladas las mejores candidatas, ya que este cambio puede lograrse rediseñando solamente su transformador.

A. Análisis de fiabilidad y estructuras inherentemente protegidas

La ESA realiza los análisis de fiabilidad y propagación de fallos acorde a lo establecido en el ECCS-Q-ST-30-02C [1]. Este documento describe los distintos pasos y procedimientos que se deben seguir, así como todos los aspectos a considerar. También indica, para cada tipo de componente, qué fallos se deben analizar (i.e. posibles modos de fallo de cada componente). Es posible resumir los aspectos más relevantes de cara al análisis que se pretende realizar en este estudio:

- Se debe analizar el fallo de todos los componentes que forman el sistema analizado (i.e. el convertidor), considerando todos los posibles modos de fallo recogidos en el ECCS-Q-ST-30-02C.
- Se debe asegurar que dicho fallo no afecta a otros elementos o sistemas externos al analizado. Es decir, se debe asegurar la no propagación de fallos.
- Se debe suponer que no fallan varios componentes a la vez. Es decir, es un análisis de fallo único.
- En general, en un convertidor sus componentes presentan dos modos de fallo: Fallo en Corto Circuito (FCC) y Fallo en Circuito Abierto (FCA) entre sus terminales.

En base a estos puntos, resulta sencillo analizar qué estructuras pueden ser definidas como inherentemente robustas frente a la propagación de fallos: son aquellas que no necesitan interruptores adicionales para evitar la propagación de cualquier fallo interno. En esta definición se debe tener en cuenta los posibles modos de conexión de sus puertos de entrada y salida (i.e. conexión serie o paralelo).

En la Fig. 2 y en la Fig. 3, se muestra el análisis de fallos cuando se emplea una configuración en puente completo o en medio puente en el primario del transformador. En el caso de estar ante un FCA con una topología en puente completo (Fig. 2a), dicho fallo no se propagará por el bus si los convertidores están conectados en paralelo, y el resto de interruptores permanecen abiertos. Si los convertidores están conectados en serie, habría que mantener dos interruptores cerrados para que siga habiendo conexión entre ellos. Si se emplea una configuración en medio puente (Fig. 2b), no habría mayor problema con una conexión en paralelo de los convertidores, manteniendo el resto de interruptores abiertos. Si la conexión entre ellos es en serie, se necesitaría un interruptor adicional para mantener la conexión.

Ante un FCC en una configuración en puente completo, con el resto de convertidores conectados en paralelo, el fallo quedaría aislado (Fig. 3a), dejando el resto de interruptores abiertos, mientras que si la conexión es en serie, habría que mantener dos de ellos cerrados para mantener la conexión entre módulos. Si se emplea una configuración en medio puente (Fig. 3b), y los módulos están conectados en paralelo, si el otro interruptor se mantiene abierto, el fallo no se propagará al bus dejando únicamente al condensador conectado al mismo. Ante una conexión en serie, bastaría con mantener el otro interruptor también cerrado.

En el caso del secundario del transformador, se consideran únicamente las configuraciones de rectificador en puente completo y con toma media. Dado que los buses de tensión de salida de los satélites están estandarizados a tres posibles valores (28 V, 50 V y 100 V), solo se consideran conexiones en paralelo entre módulos. Ante un FCA tanto en puente completo (Fig. 4a) como en toma media (Fig. 4b), si el resto de interruptores se mantienen abiertos, el fallo quedaría aislado. Si se produce un FCC sólo sería crítico en el caso de la configuración en toma media (Fig. 5b) donde se necesitaría un diodo de *OR-ing* adicional.

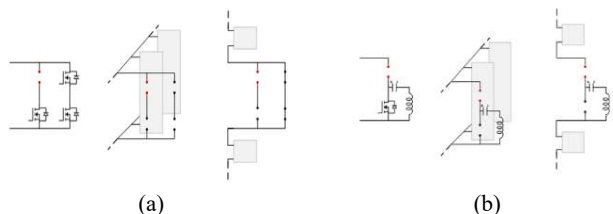


Fig. 2. Posibles casos de FCA en configuraciones puente completo (a) y medio puente (b)

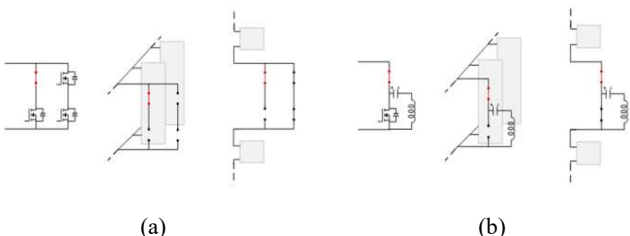


Fig. 3. Posibles casos de FCC en configuraciones puente completo (a) y medio puente (b)

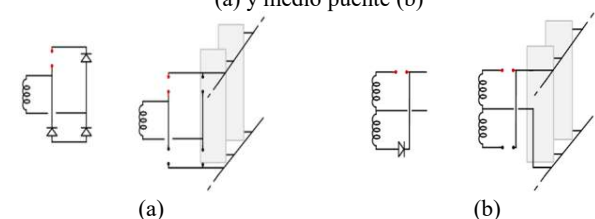


Fig. 4. Posibles casos de FCA en configuraciones rectificador de doble onda (a) y rectificador con toma media (b)

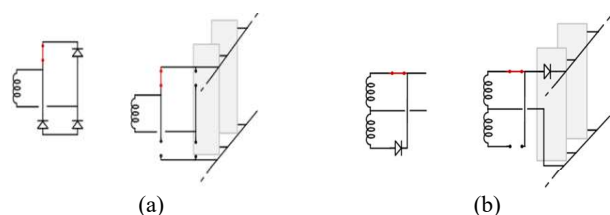


Fig. 5. Posibles casos de FCC en configuraciones rectificador de doble onda (a) y rectificador con toma media (b)

B. Selección de componentes

De entre las topologías robustas frente a la propagación de fallos, aquella con el rendimiento más elevado será la óptima. Dado que la lista de semiconductores validados para su uso en aplicaciones aeroespaciales es muy limitada, se puede contar con una base de datos con todos los semiconductores validados que incluya todos los parámetros necesarios para poder evaluar los siguientes tres requisitos:

- Sus tensiones y corrientes máximas son mayores que las que impone la topología analizada considerando los *derating* establecidos por el ECCS-Q-ST-30-02C.
- Su temperatura final en la unión es inferior a la máxima.
- Sus pérdidas son las menores de todos los semiconductores que cumplan las dos condiciones anteriores.

De esta forma, el cálculo del rendimiento de cada topología puede realizarse considerando que en su implementación se han empleado los semiconductores reales que presentan las menores pérdidas para el caso de estudio seleccionado.

Debe tenerse en cuenta que la última de estas condiciones implica que los modelos de pérdidas empleados deben ser lo suficientemente generales como para ser válidos para MOSFETs de muy diversas especificaciones y, especialmente, de distintos fabricantes, lo que implica que los datos de las hojas de características pueden ser presentados en distintos formatos, en distintas condiciones de medida, etc. A esto se debe añadir que modelos de pérdidas muy complejos necesitan datos que no todas las hojas de características proporcionan.

La selección de los componentes magnéticos óptimos puede plantearse desde una óptica similar a la de los semiconductores, pero con ciertas diferencias. En el espacio, la disipación de calor por convección no es posible. Todo el calor es disipado por conducción hacia elementos de temperatura fija (*'coolplates'*) del satélite o hacia el espacio directamente a través del proceso de radiación. Esto permite simplificar los cálculos térmicos de elementos complejos como los magnéticos, y plantear modelos matemáticos simplificados. De esta forma, el proceso de selección del componente óptimo se agiliza ya que no precisa el empleo de modelado por elementos finitos que, si bien tiene una precisión mayor, implica un tiempo de desarrollo notoriamente superior y dificulta la automatización del proceso de selección.

Este modelo térmico simplificado se basa en desacoplar el calentamiento del cobre y del núcleo [2]. En el caso del cobre, tal y como se aprecia en la Fig. 6, se considera que el bloque que forma se une a la *coolplate* mediante un material conductor del calor (e.g. *solithane*). Según eso, y despreciando la radiación, el calor fluye por el cobre tal y como indican las flechas. Para el núcleo, el punto de máxima temperatura se puede deducir de un modo similar. En este caso, tal y como se ve en la Fig. 7, todo el exterior del núcleo está unido mediante material conductor al *coolplate*. Sin embargo, la parte central del núcleo no, debido a que está rodeada por cobre. De nuevo, considerando sólo conducción, el peor caso ocurre en el punto medio de la parte central.

Como ya se ha remarcado, se trata de un modelo simplificado con una precisión baja en comparación a un modelo de elementos finitos. No obstante, permite agilizar la obtención de resultados si estos tienen como finalidad una comparativa entre distintos convertidores, ya que todos tendrán el mismo grado de precisión en sus resultados. Por último, el criterio a la hora de escoger el diseño óptimo del magnético en función de una topología y de sus condiciones de operación no puede ser exactamente igual al de los semiconductores. Si se impone la minimización de pérdidas como criterio decisor, el núcleo de mayor tamaño dentro de la lista sería siempre el escogido. Por ello, el criterio es el siguiente:

- Su temperatura en núcleo y cobre debe ser inferior a la máxima.
- El número de vueltas debe asegurar la no saturación y las pérdidas mínimas.
- El núcleo escogido será el de menor tamaño que permita cumplir la primera condición.

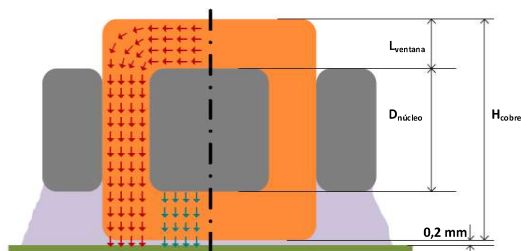


Fig. 6. Modelo térmico simplificado de la transferencia de calor para pérdidas en el cobre

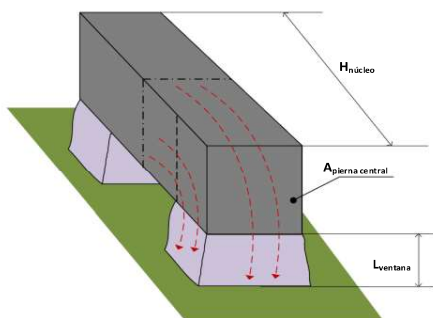


Fig. 7. Modelo térmico simplificado de la transferencia de calor para pérdidas en el núcleo

III. POSIBLES TOPOLOGÍAS BÁSICAS

Teniendo en cuenta todo lo planteado en el apartado anterior, es posible realizar un estudio de las topologías aisladas básicas.

A. Caso de estudio

Para poder realizar las comparaciones, se toma un caso de estudio planteado y aprobado por la ESA. En la Tabla I pueden verse las principales características del subsistema de potencia y del satélite tomados para dicho caso de estudio.

B. Topologías básicas

Las nueve topologías que han sido analizadas de acuerdo con lo planteado en la sección II son:

- Convertidor en medio puente con rectificador en puente completo o toma media.
- Convertidor en puente completo con rectificador en puente completo (control por fase desplazada) o toma media.
- Convertidor LLC resonante basado en medio puente, con rectificador en puente completo o toma media
- Convertidor LLC resonante basado en puente completo, con rectificador en puente completo o toma media
- Convertidor *Dual Active Bridge* (DAB)

Las ocho primeras configuraciones han sido evaluadas con rectificación mediante diodos y mediante MOSFET (rectificación síncrona), dejando un total de diecisiete posibles configuraciones básicas. Al tratarse de topologías diferentes (con parámetros de funcionamiento diferentes, en algunos casos), se ha definido un mismo punto de operación de referencia para las nueve topologías, con el objetivo de calcular la eficiencia de manera que pueda ser comparada entre todas las topologías analizadas.

Tabla I. Principales requisitos eléctricos del bus de potencia

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo
Potencia de carga	700 W	2500 W
Potencia nominal BCR	-	850 W
Potencia nominal BDR	-	1600 W
Potencia nominal SAR	-	2450 W
Tensión de OC en Array	36,8 V	60,3 V
Corriente de SC en Array	69,6 A	83,4 A
Tensión en la batería	24 V	33,6 V
Tensión en el bus	24 V	34 V

El punto de operación está definido para la máxima transferencia de potencia entre el *array* y el resto del sistema, la mínima tensión de entrada y la tensión de salida nominal. La Tabla II recoge las principales características de las topologías básicas evaluadas. Debe tenerse en cuenta que los bloques del subsistema de potencia siempre se plantean con redundancia N+1 (típicamente 2+1) por lo que se han evaluado tanto la posibilidad 2+1 como 3+1. No se han descartado los rectificadores con toma media, que sí precisan de un diodo de salida adicional, porque el número total sería de 3 diodos, todavía menor a los 4 que precisa un rectificador en puente completo.

A la vista de los resultados es posible plantear las siguientes conclusiones:

- Si se puede utilizar frecuencia variable:
 - Convertidor LLC resonante basado en puente completo en el primario con dos transistores en paralelo por cada interruptor.
 - Si se puede utilizar rectificación síncrona (RS):
 - Puente completo en el secundario con dos transistores en paralelo por interruptor
 - Si no se puede utilizar rectificación síncrona:
 - Puente completo o toma media en el secundario.
- Si no se puede utilizar frecuencia variable:
 - Convertidor DAB con el que se podría implementar, con un único convertidor el BCR y el BDR.
- Si no se puede utilizar el DAB:
 - Puente completo en el primario y rectificador en puente completo en el secundario sin rectificación síncrona.

IV. TRANSFORMADOR ELECTRÓNICO

El objetivo de la ESA con el estudio planteado en la sección III es buscar una topología robusta y que pueda emplearse en los tres bloques principales del subsistema (SAR, BDR y BCR). Ello implica que pueda cambiar su ganancia mediante un rediseño del transformador, de forma que el resto de elementos, a priori, no cambien. No obstante, es posible plantear una solución al problema desde una perspectiva diferente. Un convertidor actuando como transformador electrónico (TE), es decir, con una ganancia fija y sin capacidad de regulación, podría ser útil de cara a estandarizar el subsistema de potencia, ya que podría emplearse como una etapa previa al SAR, de forma que el rango de tensiones suministradas por el panel solar (dependiente de sus características constructivas en cada satélite) sea adaptada a un rango normalizado.

Tabla II. Principales características de las topologías básicas

Topología	η	MOSFET	Diodo / MOSFET	OR-ing	Transformador	Bobina
Medio puente con toma media	84 %	IRHMS67160	HFB60HF20	120LQ100	ETD59/31/22	E30/15/7
Medio puente con puente completo	83,5 %	IRHMS67160	HFB60HF20	-	E56/24/19	E30/15/7
Medio puente con toma media RS	80,5 %	IRHMS67160	IRHMS67260	120LQ100	ETD59/31/22	E30/15/7
Medio puente con puente completo RS	79,4 %	IRHMS67160	IRHMS67260	-	E56/24/19	E30/15/7
Puente completo con toma media	87,6 %	IRHMS67160	HFB60HF20	120LQ100	E65/32/54	E30/15/7
Puente completo con puente completo	88,2 %	IRHMS67160	120LQ100	-	E70/33/32	E30/15/7
Puente completo con toma media RS	83,6 %	IRHMS67160	IRHMS67260	120LQ100	E65/32/54	E30/15/7
Puente completo con puente completo RS	87,5 %	IRHMS67160	IRHMS67160	-	E70/33/32	E30/15/7
LLC en medio puente con toma media	87,1 %	IRHMS67160	120LQ100	120LQ100	E56/24/19	E55/28/21
LLC en medio puente con puente completo	87 %	IRHMS67160	120LQ100	-	E49/25/16	E55/28/21
LLC en medio puente con toma media RS	87,9 %	IRHMS67160	BUY15CS57A-01	120LQ100	E56/24/19	E55/28/21
LLC en medio puente con puente completo RS	89,8 %	IRHMS67160	IRHNA57064	-	E49/25/16	E55/28/21
LLC en puente completo con toma media	88,7 %	IRHMS67160 *	120LQ100	120LQ100	E55/28/21	E56/24/19
LLC en puente completo con puente completo	88,6 %	IRHMS67160 *	120LQ100	-	E54/28/19	E56/24/19
LLC en puente completo con toma media RS	89,6 %	IRHMS67160 *	BUY15CS57A-01	120LQ100	E55/28/21	E56/24/19
LLC puente completo con puente completo RS	91,4 %	IRHMS67160 *	IRHNA57064	-	E54/28/19	E56/24/19
DAB	91,5 %	IRHMS67160	IRHNA57064	-	ETD59/31/22	ETD44/22/15

*Denota el que se empleen dos transistores en paralelo por cada interruptor

De esta forma, el SAR no necesitaría ser rediseñado en su totalidad a causa de una variación en el rango de sus tensiones de entrada (se independiza al SAR del panel solar). El TE, gracias a esta independencia que brinda respecto al panel solar, también abre la posibilidad a emplear topologías tripuerto, como las analizadas en [3] y [4]. Otra aplicación de un transformador electrónico está en su uso en la etapa de distribución de potencia. El bus de potencia está bien regulado a su valor nominal. Como ya se dijo, de él extraen energía convertidores sencillos aislados (por normativa) que adaptan la tensión a lo requerido por los distintos subsistemas. Además, se incluye a su salida reguladores lineales. Dado que el bus de potencia ya está regulado y que se incluye un regulador lineal como última etapa, el convertidor intermedio tan sólo debe cumplir con el requisito de aislamiento. Esta función puede ser desempeñada por un transformador electrónico, con las consiguientes ventajas de una mayor sencillez en el control y un mejor rendimiento.

Un convertidor como el planteado se presenta en [5]. Se trata de una topología resonante sin capacidad de regulación, pero capaz de obtener rendimientos muy elevados. La topología se muestra en la Fig. 8. La resonancia se produce entre el condensador de salida (C_O) y la inductancia de dispersión (L_K), lo que permite alcanzar ZVS (*Zero Voltage Switching*), y una situación cercana a ZCS (*Zero Current Switching*) en los interruptores primarios, y ZCS en los interruptores secundarios.

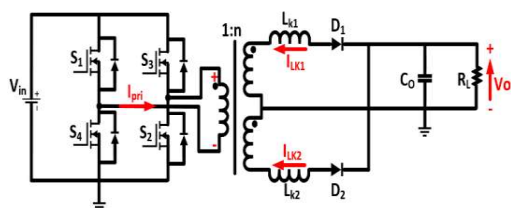


Fig. 8. Esquemático del transformador electrónico presentado en [5]

Esta topología cuenta con un reducido número de componentes ya que las inductancias resonantes están integradas en el propio transformador. Como principales inconvenientes, destacar, por un lado, el rizado de la tensión de salida (V_O), y por otro lado, el hecho de que dicha tensión no pueda ser controlada, ya que siempre satisface la ecuación (1), donde 'n' denota la relación de transformación del transformador.

$$V_O = V_{in} \cdot n \quad (1)$$

En esta aplicación en particular, estos inconvenientes no son relevantes al contar siempre con un convertidor aguas abajo con capacidad de regulación y/o filtrado (SAR o regulador lineal, como ya se ha descrito).

La topología del TE tiene la posibilidad de una rápida modularización. De esta forma, tan pronto como uno de los puertos (entrada o salida) esté conectado en paralelo y su tensión sea fija, el otro puerto puede ser fácilmente conectado en serie o paralelo sin necesidad de aumentar la complejidad en el control, ya que en virtud de la ecuación (1) y del modo de funcionamiento, el ecualizado de tensiones y corrientes no precisa de un algoritmo de control complejo.

Este aspecto resulta muy relevante, puesto que los buses de tensión de salida de los satélites están estandarizados únicamente a tres posibles valores (28 V, 50 V y 100 V), de tal manera que es posible pensar en un convertidor (un módulo) con solo tres posibles configuraciones, una para la tensión de 28 V, otra para la de 50 V y otra para la de 100 V. La tensión de entrada y la potencia nominal serían las necesarias para permitir a cada módulo trabajar a su máxima eficiencia, densidad de potencia etc. De este modo, ante un panel solar cuya tensión de salida sea superior a la tensión de entrada nominal del SAR (dependiente de la tensión del bus), solo sería necesario conectar la entrada de varios de estos módulos en serie (formando un *string* de módulos).

Del mismo modo, ante un único sistema con una potencia nominal mayor que la potencia procesada por cada módulo, se podrían conectar varios de estos módulos en paralelo en sus entradas con el objetivo de que la potencia sea finalmente compartida por todos ellos. El único requerimiento para este tipo de conexiones sería el de emplear la misma señal de control para todos los módulos. En lo que respecta a la propagación de fallos para esta topología, al tratarse de una configuración basada en medio puente o puente completo en el primario los fallos quedan aislados como se ha explicado en la sección II. El secundario puede ser implementado con un rectificador en puente completo o con toma media, de tal manera que también estará protegido ante fallos (en configuración en toma media se asume el uso de un diodo de *OR-ing*). La mejor opción, sin embargo, pasará por emplear un puente completo en el primario, de tal manera que se puedan conectar diferentes módulos en serie o paralelo en la entrada.

A modo de resultados experimentales, se ha desarrollado un prototipo de transformador electrónico de acuerdo al esquema representado en la Fig. 8. Sus principales características, se muestran en la Tabla III. En la Fig. 9 se muestra la tensión puerta-fuente (V_{GS}) del interruptor S_4 , la corriente por los diodos D_1 y D_2 ($I_{D1,D2}$), el rizado de la V_O y la tensión drenador-fuente (V_{DS}) para el interruptor S_4 del prototipo realizado. A través de la Fig. 10, con la representación de la tensión V_{GS} y la tensión V_{DS} para el interruptor S_4 , se indica que se puede conseguir ZVS en los interruptores del primario. Con este prototipo para las especificaciones de trabajo descritas en la Tabla III, se obtiene la curva de rendimientos mostrada en la Fig. 11.

Tabla III. Características del transformador electrónico elaborado

Tensión de entrada (V_{in})	56 V
Tensión de salida (V_O)	28 V
Potencia nominal (P_O)	200 W
Frecuencia de conmutación (F_{SW})	400 kHz
Inductancia de dispersión (L_K)	60 nH
Condensador de salida (C_O)	0,3 μ F
MOSFETS (S_1, S_2, S_3 y S_4)	PSMN063-150D
Diodos rectificadores (D_1, D_2)	NRVBB60H100CTT4G

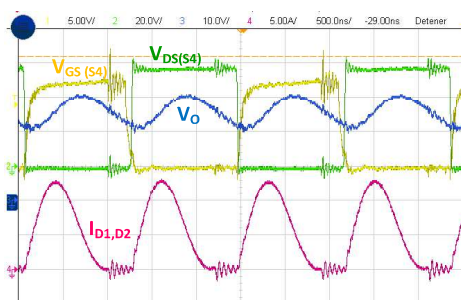


Fig. 9. Representación de la V_{GS} (S_4), la V_{DS} (S_4), la V_O y la $I_{D1,D2}$

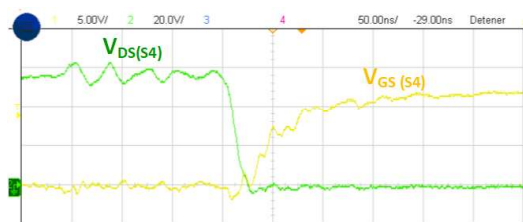


Fig. 10. Representación de la V_{GS} y la V_{DS} en S_4

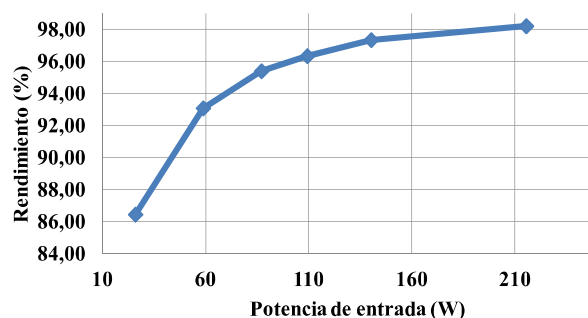


Fig. 11. Rendimiento del TE frente a la potencia de entrada

V. CONCLUSIONES

En este artículo se analizan una serie de topologías con el objetivo de simplificar el subsistema de potencia de los satélites. En lo que respecta a las topologías básicas, se destacarían el LLC resonante en puente completo con rectificación síncrona, así como también el DAB, el cual, al ser una topología bidireccional, podría actuar como BCR y BDR al mismo tiempo. Ambas topologías están protegidas frente a la propagación de fallos de forma inherente (i.e. sin necesidad de elementos adicionales) y presentan el rendimiento más alto de todas las topologías analizadas. Su adaptabilidad a distintos diseños (i.e. satélites) estaría basada en el rediseño de los componentes magnéticos que las forman. Otra posible alternativa se basa en tener un módulo para una determinada potencia y tensión, de tal manera que la adaptación a los niveles de tensión y corrientes de trabajo pase por la conexión en serie o paralelo de varios de estos módulos. Siguiendo con esta segunda línea de diseño, se plantea el uso del TE. Sus principales inconvenientes son el rizado en la tensión de salida (podría reducirse empleando un filtro LC) y la imposibilidad de regular dicha tensión. No obstante, dado su alto rendimiento podría plantearse como un prerregulador que adapte el rango de tensión proporcionado por el panel solar (cambiante de un satélite a otro) a un rango fijo. De esta forma, el SAR no necesitaría ser rediseñado. Otra alternativa que brinda el empleo del TE como prerregulador es el empleo de topologías tripuerto en el subsistema de potencia. Son convertidores complejos en los que su rediseño implicaría un elevado coste en tiempo y dinero. Sin embargo, la independencia que les brinda el uso del TE permitiría tener un diseño único e invariable para cualquier satélite.

REFERENCIAS

- [1] European Cooperation for Space Standardization. Link: https://ecss.nl/wp-login.php?redirect_to=https%3A%2F%2Fecss.nl%2Fget_attachment.php%3Ffile%3Dstandards%2Fecss-q%2FECSS-Q-ST-30-02C6March2009.pdf [Último acceso: 19-02-2019].
- [2] A. F. Mills, "Heat Transfer". McGrawHill.
- [3] C. Zhao, S. D. Round and J. W. Kolar, "An Isolated Three-Port Bidirectional DC-DC Converter With Decoupled Power Flow Management," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 5, pp. 2443-2453, Sept. 2008.
- [4] M. C. Mira, Z. Zhang, A. Knott and M. A. E. Andersen, "Analysis, Design, Modeling, and Control of an Interleaved-Boost Full-Bridge Three-Port Converter for Hybrid Renewable Energy Systems," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 2, pp. 1138-1155, Feb. 2017.
- [5] Yuancheng Ren, Ming Xu, Julu Sun and F. C. Lee, "A family of high power density unregulated bus converters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 5, pp. 1045-1054, Sept. 2005.