

05-014

## TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY STUDY ON MV CONVERTERS FOR LARGE PV FACILITIES

Nieto Morote, Ana M<sup>a</sup> <sup>(1)</sup>; Villarejo-Mañas, José Antonio <sup>(1)</sup>; Ruz-Vila, Francisco de Asís <sup>(1)</sup>; de Jódar-Bonilla, Esther <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad Politécnica de Cartagena

With the development of renewable energy industry during recent years, the capacity of photovoltaic (PV) generation systems is increasing dramatically; nowadays, it is not difficult to find facilities of tens of megawatts and several hectares of surface, which complicates the collection of the generated energy and, as well as, increases the losses. Consequently, inverters should trend to reach the demands of high input voltage and wide input power ranges; then, the possibility of using MV grid-tied inverters is considered. Among the normalized voltages, a line voltage of 6 kV is considered since reaching higher voltages with limited input power up to 1MVA seems unaffordable with the semiconductor technologies available on the market at a reasonable cost. This paper analyzes the feasibility of the solution from both, technical and economic point of view. This change requires not only a change in inverter technology, but also an adaptation of the whole installation, the costs associated with replacing low voltage with medium voltage switchgear, including connections, protections, etc. will be analyzed.

*Keywords: MV converters; grid-tied inverters; feasibility analysis*

## VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA PARA CONVERTIDORES EN MT PARA GRANDES INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS

Las instalaciones fotovoltaicas están incrementando su potencia de forma muy rápida. En la actualidad, no es difícil encontrar instalaciones de decenas de megavatios y varias hectáreas de superficie, lo que complica la extracción de la energía generada y a la vez incrementa las pérdidas. Se plantea la posibilidad de incluir inversores para conexión a red que permita la conexión directa en media tensión. De entre las tensiones normalizadas se trabaja sobre una tensión de 6 kV como ya que llegar a tensiones superiores en las potencias utilizadas parece inalcanzable con los semiconductores actuales a un coste razonable. En el presente trabajo se analiza la viabilidad de la solución desde un punto de vista técnico-económico. En la medida que este cambio representa no solo un cambio en el inversor, sino también un cambio en la totalidad de la instalación se analizarán los costes asociados a sustituir apartamento de baja tensión por la de media tensión, incluyendo conexiones, protecciones etc.

*Palabras clave: convertidores en MT; inversores conectados a red; análisis de viabilidad*

Correspondencia: Ana M<sup>a</sup> Nieto Morote ana.nieto@upct.es



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

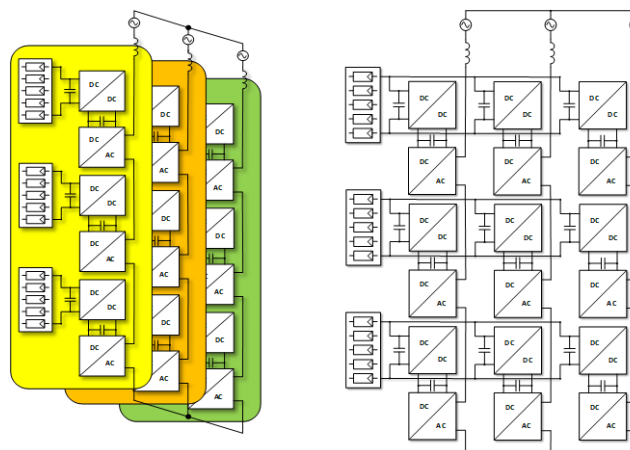
## 1. Introducción

Una instalación fotovoltaica típica de 1,5MW con inversor centralizado, ocupa una superficie sobre el terreno de entre 10.000 y 20.000m<sup>2</sup>. Agrupando el cableado de los paneles en cajas de conexión de 150kW se tendrán 10 instalaciones de baja tensión (aproximadamente 750V en trabajo, 1kV en circuito abierto) con una distancia entre las cajas de conexión y el inversor central que puede variar entre 100 y 200m, dependiendo de la distribución y la orografía del terreno. Si sumamos las distancias de todas las cajas de conexión al inversor central, podemos estimar para la instalación una longitud equivalente de 1500 metros y una corriente que puede superar los 200A. Es sencillo estimar que los cables que llevan la energía al convertidor central pueden suponer unas pérdidas del 1,5% de la potencia que por ellos circula. Evidentemente, esta ineficiencia es conocida y por ella se produce el cambio de la tensión máxima que soportan los módulos respecto a tierra que va a pasar de 1000 a 1500V. Este aumento de la tensión en un 50%, aunque reduce el problema no lo hace de forma significativa, sobre todo teniendo en cuenta que los mismos inversores se seleccionan por diferencias en el rendimiento menores del 0,5%. Una opción interesante a priori sería sustituir las cajas de conexión por convertidores CC/CA con salida en media tensión, para reducir las pérdidas en continua.

Para analizar la viabilidad técnico-económica de esta solución deberemos (1) seleccionar una topología viable para la inversión a media tensión con la tecnología disponible en el mercado y (2) realizar una comparación de costes entre el sistema actual y el propuesto.

Respecto del primer punto, de entre las topologías posibles para la inversión e MT, la que aparece con mayor frecuencia en la bibliografía son los inversores conectados en cascada utilizando convertidores CC/CC con aislamiento (CHB). El aislamiento es necesario ya que los paneles pueden sufrir degradaciones si soportan tensiones demasiado altas; por otra parte facilita, el diseño modular del convertidor. Esta estructura es la mostrada en la Figura 1 (Izquierda).

**Figura 1. (Izquierda) Asociación con inversores monofásicos; (Derecha) Asociación de convertidores trifásicos.**



Un desglose inicial de costes señala que el correspondiente a los condensadores de la topología propuesta es muy alto (80%) respecto del correspondiente a los semiconductores de potencia (15%), y al filtro (5%). La razón de este dato es que los condensadores deben

ser tener mucha capacidad porque en una instalación monofásica deben filtrar una pulsación de energía de baja frecuencia (100Hz); esto se ve agravado con la necesidad de aplicar una tensión continua al generador fotovoltaico de gran calidad, lo que unido a la baja frecuencia de la perturbación hacen necesario un condensador de las características mencionadas. Este reparto hace que, comparando estos resultados con los que presenta para un inversor “tradicional” de la misma potencia, el convertidor CHB es un 30% más caro, principalmente por el uso de los condensadores. Esta circunstancia, junto con otros problemas técnicos como el posible desequilibrio en la inyección energía en la red en condiciones de desigual radiación en los generadores fotovoltaicos (Chavarria, 2013; Foureaux, 2015), hace que esta solución se haya desechado. El problema del desequilibrio se resuelve mediante la conexión de los tres inversores monofásicos a un generador común. Además, si los convertidores CC/CC son bidireccionales o unidireccionales trabajando con factor de potencia unitario, los condensadores de desacoplo podrán ser diseñados como los de cualquier inversor trifásico para fotovoltaica actual, permitiendo con valores pequeños de capacidad obtener rizado muy bajo en el generador, asegurando una buena extracción de energía.

Esta solución, acertada desde el punto de vista electrónico, pierde parte de la “modularidad” que facilita la construcción y mantenimiento de estos grandes convertidores, y además realmente se penaliza la extracción de energía ya que habrá un único punto de máxima potencia para todo el generador. Algunos autores proponen resolver este problema introduciendo un convertidor CC/CC por subgrupo de paneles de manera que se maximice la extracción de energía (Van der Merwe, 2009; Ortiz, 2010). Sin embargo, se está añadiendo una etapa extra en la cadena de conversión con la consiguiente penalización en rendimiento y posiblemente coste. Si se pretende mantener un cierto grado de libertad en la búsqueda del punto de máxima potencia según zonas y, además, mantener unos condensadores de desacoplo pequeños con una inyección equilibrada de energía en la red, la mejor solución será hacer asociación en serie de convertidores trifásicos. Esta solución es la idea inicial sobre la que se desarrolla este artículo (Figura 1, derecha). Son varias las soluciones basadas en esta topología y en ellas se asocia a la misma las siguientes ventajas (Prasanta, 2019):

- Inyección de potencia equilibrada incluso con diferentes radiaciones en los generadores.
- Modularidad de manera que pueda existir tolerancia a fallos o rápida reparación.
- Posibilidad de disponer de diferentes buscadores del punto de máxima potencia.
- Tensión de salida con baja distorsión armónica y por tanto, filtro de salida más sencillo. Incluso con frecuencias de conmutación bajas para el convertidor CC/CA.
- Condensadores de desacoplo de reducido tamaño debido a la configuración trifásica y la demanda “constante” de potencia.

Aunque la propuesta es técnicamente interesante, hay que profundizar en ella ya que las ventajas descritas son en ocasiones engañosas e incluso en algunas ocasiones simplemente verdades a medias. Por ejemplo, trabajar con diferentes puntos de máxima potencia significará que las modulaciones de los puentes conectados en serie no son idénticas y por tanto no se producirá la cancelación de armónicos que da lugar a la buena calidad de tensión a la salida. De forma similar, la compensación de corrientes en los condensadores de desacoplo se produce si los convertidores CC/CC son bidireccionales o unidireccionales trabajando con factor de potencia unidad no apareciendo información sobre el cálculo de los condensadores cuando el factor de potencia no es la unidad. Muchas otras preguntas son también difíciles de contestar, por ejemplo: ¿cuál es el número apropiado de etapas que deben conectarse en serie?, ¿a partir de que potencia puede llegar a ser rentable esta topología?, ¿qué convertidor CC/CC es apropiado? En este trabajo se

pretende resolver algunas de estas preguntas con objeto de facilitar la comparativa entre soluciones y de poder valorar la viabilidad de la topología seleccionada para el convertidor.

## **2. Metodología.**

Para el objetivo definido en esta comunicación, el trabajo se organiza analizando los principales aspectos del diseño del convertidor, a partir de una propuesta sobre las características deseadas para el mismo, realizada teniendo en cuenta una referencia de rendimiento y coste basado en las tecnologías y los componentes utilizados en la actualidad. Por ello, el trabajo consta de las siguientes etapas:

- a) Determinación, en base a las tecnologías más utilizadas actualmente para la inversión en sistemas fotovoltaicos, de las referencias de rendimientos y costes que podrían hacer viable la propuesta.
- b) Determinación de las características deseadas para el nuevo inversor, en base a la referencia elegida en el apartado anterior.
- c) Diseño preliminar de los principales subsistemas del inversor:
  - Diseño preliminar del CC/CA, incidiendo especialmente en el número apropiado de etapas conectadas en serie.
  - Diseño preliminar del CC/CC para que puedan trabajar con grandes inductancias de dispersión.
  - Diseño preliminar de los condensadores de filtro y desacoplo.

En esta etapa se determinarán los principales parámetros de diseño y se estimará el rendimiento global del sistema de inversión propuesto.
- d) Selección de los circuitos auxiliares asociados.
- e) Selección de la arquitectura de control y comunicaciones.
- f) Estimación de coste de la solución propuesta.

### **2.1. Determinación de la referencia de coste y rendimiento.**

El coste promedio de un inversor de gran potencia 500-1500kW es aproximadamente 0,045€/W mientras que para el transformador de “distribución” puede aproximarse por 0,015€/W (Fu, 2018). Estos precios por vatio se incrementan a medida que se reduce la potencia llegando a los 0.08€/W cuando nos aproximamos a instalaciones de 100kW en el inversor y 0,03€/W para el transformador. Si el coste del transformador y el inversor es el 100%, el inversor representa el 75% y el transformador el 25%.

El rendimiento actual de estos inversores es próximo al 98,5% y el de los transformadores puede llegar al 99% incluso al 99,5% para las tecnologías de núcleos con materiales amorfos. Todo esto nos deja un rendimiento del 97,5% para el conjunto transformador-inversor.

### **2.2. Características deseadas para el convertidor analizado.**

Como ya se ha mencionado, la potencia debe ser de 150kW o múltiplos de la misma (300-450kW como máximo). La tensión de entrada máxima de los convertidores CC/CC será de 1500V, ya que es la que proporcionan las instalaciones fotovoltaicas actuales. Aunque sería deseable una tensión de salida similar a la obtenida con los convertidores con transformador de baja frecuencia (20kV) es prácticamente irrealizable a un coste competitivo. Quedará por lo tanto como objetivo alcanzar 6kV o en su defecto 3kV, que son las tensiones más bajas en el rango de media tensión. Es de especial interés alcanzar los 6kV ya que existen motores de dicha tensión y por tanto será más sencillo encontrar material eléctrico

apropiado. El convertidor deberá poner trabajar con diferentes factores de potencia para prestar apoyo a la red eléctrica, siendo capaz de aportar energía reactiva tanto en adelanto como en atraso, con un factor de potencia mínimo de 0,75. Los inversores actuales están ofreciendo rendimientos europeos próximos al 98,5% en potencias entorno a los 100kW. El rendimiento de un transformador de 1MW será aproximadamente del 99%, lo que daría un rendimiento en conjunto del 97,5%. Este valor nos aporta el valor del rendimiento aproximado que se debería exigir al convertidor.

### **3. Diseño preliminar de los principales subsistemas del inversor.**

#### **3.1. Convertidor DC/AC. Determinación del número de etapas óptimo.**

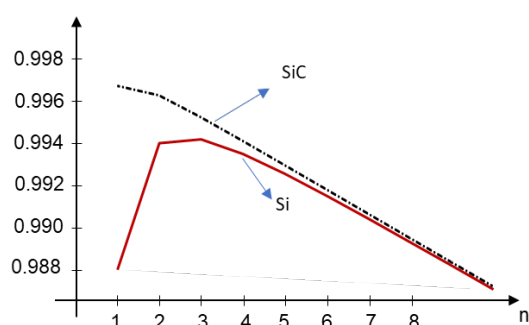
Para diseñar el mismo convertidor CC/CA se pueden tomar dos estrategias: utilizar pocas etapas conectadas en serie, con semiconductores de alta tensión o utilizar componentes de baja tensión pero conectar muchas etapas en serie. Es evidente que el rendimiento va a depender en gran medida del número de etapas y éste depende de la tecnología de los semiconductores. En una primera aproximación supondremos que, independientemente de la tensión que soportan, tienen una caída de tensión constante  $V_{ce}$  y que la corriente que circula no depende del número de etapas y podemos suponer un valor  $I_o$ . Según esta aproximación, de forma simplificada, las pérdidas en conducción en función del número de etapas  $n$  pueden expresarse como  $2 \cdot I_o \cdot V_{ce} \cdot n$  ya que en cada puente completo (FB en adelante) pasa por dos componentes. Cuando el número de etapas es elevado las pérdidas en conmutación se hacen despreciables y son las pérdidas en conducción las que fijan el rendimiento del convertidor. Esto es especialmente interesante en una época donde están apareciendo componentes basados en SiC que permiten una frecuencias y tensiones nunca alcanzada hasta este momento aunque también hay que decir que estos componentes se encuentran en desarrollo y que su utilización en un convertidor industrial está fuera de discusión (podemos encontrar MOSFETS de SiC hasta 1700V en los catálogos de diferentes fabricantes, pero lo más normal es encontrar componentes hasta 1200V, diseñados para sustituir a los IGBTs existentes).

Se ha evaluado el número de etapas para el convertidor objetivo en el caso de 450kW. Se ha supuesto una tensión continua un 20% superior a la tensión de pico de red, una velocidad de crecimiento de la tensión de 8,5kV/ $\mu$ s y una velocidad de crecimiento de la corriente de 1000 A/ $\mu$ s. La caída de tensión tanto en el diodo como en el transistor se ha supuesto de 2,5V. La Figura 2 muestra el rendimiento en función del número de etapas de un convertidor multinivel con puentes completos asociados en serie para diferentes tecnologías de componentes. Es un cálculo aproximado, pero puede apreciarse como para los componentes rápidos (SiC) sería interesante utilizar una sola etapa, mientras que para los basados en Si sería mejor utilizar un convertidor con tres etapas en serie.

El rendimiento que puede alcanzarse (sin incluir el convertidor CC/CC, ni el filtro de salida) con tres etapas podría ser de aproximadamente el 99,5%, mientras que con cinco etapas en serie el rendimiento bajaría al 99,3%. Con componentes rápidos se podría alcanzar el 99,8%. Si utilizamos solamente tres etapas en serie, serían necesarios transistores de 3300V. El más ajustado a este requisito de tensión lo fabrica ABB (5SNG 0250P330305) y tiene una corriente nominal de 250 A. Si tenemos en cuenta que la corriente eficaz de los transistores en este diseño será aproximadamente 30 A, tenemos un sobredimensionado innecesario y un sobrecoste asociado (los componentes están normalmente escalados en potencia, ya que se considera que niveles elevados de tensión van a corresponder a niveles proporcionalmente mayores de potencia). Aumentar el tamaño del convertidor nos alejaría de la idea inicial y nos aproximaría al convertidor centralizado, donde sería muy difícil

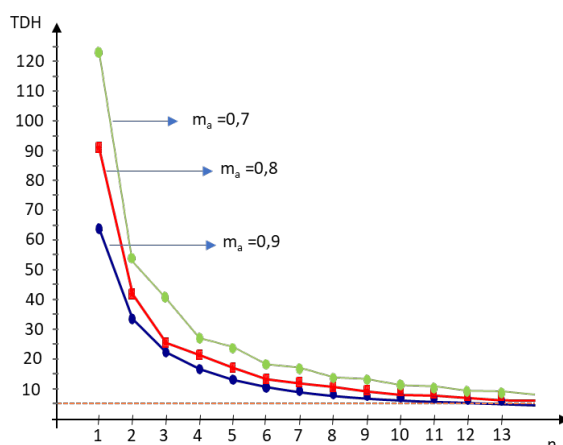
competir con la solución tradicional. Esto nos obliga a aumentar el número de etapas hasta encontrar transistores disponibles en el mercado. Aunque actualmente prácticamente todos los fabricantes están incluyendo en su oferta transistores de SiC, estos no tienen una tensión superior a 1700V y en la mayor parte de las ocasiones la tensión es de 1200V. Este salto de tensión, que no supondría una gran diferencia en cuanto al número de etapas óptimo, conlleva un incremento del coste apreciable al menos en la circuitería auxiliar necesaria para disparar los transistores habiéndose observado en algunos fabricantes un incremento del 100%: la ventaja del incremento del rendimiento (muy pequeño) se ve penalizada con creces por el sobrecoste.

**Figura 2. Rendimiento frente a número de etapas**



La calidad de la tensión depende de muchos factores entre los que destaca el índice de modulación en amplitud ( $m_a$ ) que cuantifica el cambio máximo de amplitud de la forma de onda de voltaje de salida ya que controla el valor de pico de los armónicos de baja frecuencia. Hemos simulado el comportamiento convertidor con distintas etapas, para una frecuencia de conmutación de 5kHz, parametrizando según el valor del índice de modulación, calculando para cada caso la tasa de distorsión armónica (TDH). Los resultados están resumidos en la Figura 3. Con un índice de modulación en amplitud de 0,9 o superior se puede obtener la distorsión armónica del 5% considerada como límite con 10 etapas. Distorsiones armónicas superiores necesitarían la incorporación de filtros de salida.

**Figura 3. Tasa de distorsión armónica frente a número de etapas**



El número de etapas también está relacionado con el diseño del convertidor CC/CC. En la mayor parte de los casos, el convertidor trabaja como un transformador de continua y por lo tanto las variaciones de la tensión de los generadores fotovoltaicos se verán reflejadas en la tensión de alimentación de los inversores. Esto tendrá un fuerte impacto en el número de

etapas, ya que la variación del punto de máxima potencia estará entre 700-1200V, sin mencionar que además el convertidor debe soportar una tensión máxima en la entrada de 1500V. Cuando el convertidor CC/CC fija la tensión de salida (tensión de entrada del puente completo) el número de etapas es menor y se determina por la tensión máxima de los componentes independientemente de la variación de tensión del generador.

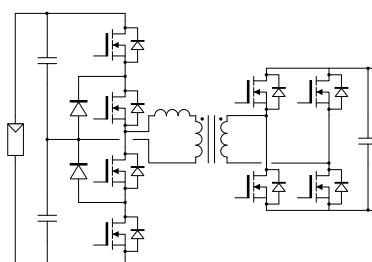
Hemos comparado las etapas necesarias en ambos casos y en el primero requeriríamos 14 etapas, mientras que en el segundo se necesitarían 8 con un rendimiento en torno al 99%. Se opta por la segunda opción.

### 3.1. Convertidor CC/CC.

Selección de la topología. La idea principal es asociar inversores trifásicos de forma que las corrientes reflejadas en el primario del convertidor CC/CC estén desfasadas  $120^\circ$  buscando que la demanda de potencia que se realice al generador fotovoltaico sea constante o casi constante. No puede pensarse en un convertidor fotovoltaico que no sea capaz de trabajar con factores de potencia diferentes a la unidad. Si el inversor trabaja con factor de potencia unitario el flujo de potencia que atraviesa el convertidor CC/CC es unidireccional pero si el factor de potencia es diferente, el flujo de potencia es bidireccional y el convertidor CC/CC también debe ser bidireccional.

La topología denominada Dual Active Bridge (DAB) es muy interesante para aplicaciones fotovoltaicas ya que puede optimizarse para una zona de trabajo determinada y aunque el generador fotovoltaico tenga un amplio margen de funcionamiento, es cierto que la localización del punto de máxima potencia suele estar en una zona muy localizada ya que la variación de temperatura en las zonas donde habitualmente se instalan las grandes plantas fotovoltaicas, no es muy grande. En relación a las conmutaciones suaves debe indicarse que la zona donde interesa optimizar el DAB coincide con la zona donde todos los transistores entran a conducir a tensión cero (ZVS) lo que es un dato muy interesante desde el punto de vista del rendimiento y las interferencias. Por último, existen múltiples métodos de control para el DAB que permiten reducir el valor de la corriente eficaz y mejorar las conmutaciones suaves. Todo lo comentado anteriormente nos lleva a la utilización de la topología DAB.

Figura 4. Topología del convertidor CC/CC

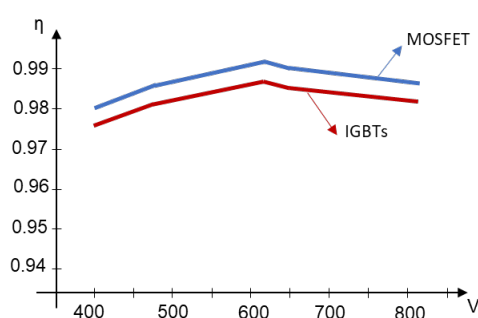


Bajo la premisa de utilizar semiconductores de 1200V una posible construcción de nuestro convertidor unidireccional sería utilizar un puente o un semipuerto de tres niveles como el mostrado en la Figura 4. El condensador de salida impone la tensión de los transistores por lo que no sería necesario utilizar una doble salida. Para este convertidor se ha calculado la relación de transformación de manera que se minimice la corriente eficaz en la bobina teniendo en cuenta todos los puntos de funcionamiento previstos resultando la misma  $r_t = 1,45$ .

Selección del método de control. Hemos seleccionado un control para minimizar la energía reactiva del primer armónico. Este método trata de buscar los anchos de pulso y desfase apropiados para que el factor de potencia para el primer armónico sea la unidad, manteniendo la máxima tensión posible en los puentes para minimizar la corriente de entrada (Hu, 2017). Este algoritmo no tiene solución para todas las combinaciones de potencias y tensiones, pero se trunca para seguir al funcionamiento como desplazamiento de fase en caso de necesidad; es decir, busca unas formas de onda y desfase que cumplan con el criterio de minimización de corriente reactiva del primer armónico y si no las encuentra, utiliza el control por desplazamiento de fase. La principal razón para la selección de este tipo de control es que, tiene un buen comportamiento a baja potencia y la curva de rendimiento es algo más “plana” y homogénea y ofrece muy buenas prestaciones cuando el margen de variación de la tensión de entrada no es grande.

Selección de componentes y su influencia en el rendimiento del convertidor CC/CC. Definidas tanto topología como el algoritmo de control, hemos comparado la influencia que en el rendimiento tiene la utilización de IGBTs y de MOSFETs de SiC, sobre un convertidor con tensión de entrada entre 800 y 1500V, lo que tendrá como resultado una tensión en el primario del transformador que oscilará entre 400 y 750V. A la salida la tensión tiene un valor constante de 1200V. Para realizar este convertidor se utilizarán transistores de 1200V en la etapa multinivel y de 1700V en la salida. Se ha elegido una frecuencia de conmutación relativamente baja 5kHz, esta es especialmente necesaria en el diseño que se realiza utilizando IGBTs. Cuando se utilicen transistores MOSFET de SiC puede subirse esta frecuencia hasta un valor de 10-15kHz sin comprometer apreciablemente el control. Para mantener la comparativa se ha diseñado también con 5kHz, así se pueden utilizar los datos de transformador diseñado. En la Figura 5 se aprecia la diferencia en el comportamiento y que, teniendo en cuenta las restricciones impuestas por el rendimiento global del sistema y el que hemos estimado para el convertidor CC/DC, la única alternativa viable es la utilización de MOSFET de carburo de silicio.

**Figura 5. Rendimiento del convertidor CC/CC**



### 3.2. Condensadores de filtro y de desacoplo.

En el apartado 3.1. hemos determinado que, para que el número de etapas no fuera alto, la tensión de salida del convertidor CC/CC tendrá unos márgenes estrechos para lo que se debe introducir un lazo de control que lo permita. Mientras se mantenga constante la tensión en dicho condensador no circulará por él corriente de baja frecuencia y la carga se verá reflejada hacia los condensadores de entrada del CC/CC que hacen las veces de filtro de desacoplo.

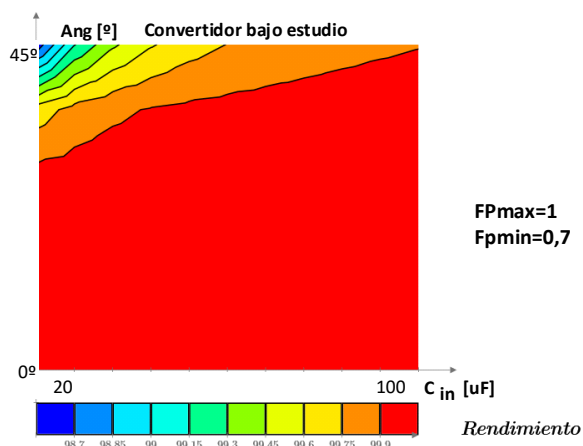
En caso de que el convertidor CC/CC sea unidireccional y el inversor trabaje con factor de potencia unitario, la potencia demandada al generador fotovoltaico será constante y por



tanto la necesidad de filtrado será muy baja. Esto lleva asociado una reducción sustancial del tamaño de los condensadores conectados al generador fotovoltaico, quedando reducidos a un valor mínimo relacionado más con la estabilidad de lazo de control que con el propio filtrado de rizado de corriente. Recordemos, como hemos dicho en la introducción, que el coste de estos componentes es una parte significativa del total. Para la topología utilizada basada en convertidores CC/CA trifásicos, obtenemos valores de la capacidad del condensador de desacoplo que son 20 veces menores que los correspondientes utilizando convertidores monofásicos.

El rizado de corriente que hemos comentado hace que el convertidor presente una pequeña oscilación en las proximidades del punto de máxima potencia, lo que puede hacer disminuir el rendimiento de la extracción, independientemente del algoritmo de seguimiento utilizado. Esta cuestión hace necesaria la estimación de dicho rendimiento para verificar si la hipótesis de no necesitar filtro es correcta o no. En la siguiente figura se muestra, para distintos valores del condensador de desacoplo y entre los límites establecidos para el factor de potencia, el rendimiento del convertidor.

**Figura 6. Rendimiento del convertidor en función del factor de Potencia y del valor del condensador de acoplo.**



Con un condensador de 50  $\mu F$  el rendimiento en extracción de energía sería superior al 99,7% incluso con el menor factor de potencia considerado. Este resultado confirma la no necesidad de utilizar convertidores bidireccionales como etapas aisladoras en los convertidores CHB para aplicaciones fotovoltaicas. El filtro de desacoplo es suficientemente pequeño incluso trabajando en condiciones desfavorables de factor de potencia.

#### 4. Circuitos auxiliares del convertidor DC/AC.

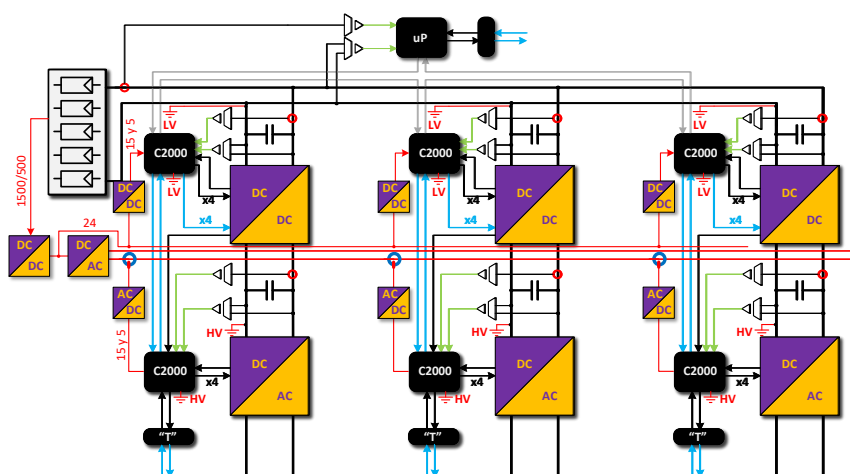
Todo transistor debe llevar asociado su circuito de disparo e inicialmente se han contemplado dos opciones: utilizar circuitos especialmente diseñados para eso o diseñar nuestro propio circuito de disparo. Si decide construir el driver utilizando componentes discretos y de esta manera reducir costes, se observa que se necesitan componentes que aislen aproximadamente tres veces esta tensión lo que nos llevará a fuentes de alimentación (o transformadores de pulsos) con tensiones de aislamiento de 4kV o superiores. Estos componentes tienen también unos costes importantes. Además, será necesario incluir circuitos de disparo que amplifiquen la señal del control y proporcionen el

aislamiento necesario. Por ello se decide utilizar circuitos de disparo ya existentes en el mercado.

## 5. Arquitectura de control y comunicaciones.

La arquitectura propuesta genera las señales de disparo de los diferentes puentes completos a partir de una señal de referencia que se envía de forma digital a través de tres anillos de fibra óptica, uno para cada fase. La información se envía de forma síncrona por el maestro junto con un código de identificación que le indica a cada etapa el inicio de su "timer". Cada etapa tiene su propio reloj de cuarzo, por lo que no es necesario sincronizarse cada periodo de conmutación, esta información estará disponible, por lo que el esclavo decidirá cuándo debe ajustar su contador. Este método de control permite realizar un "Feedforward" de la tensión de continua que alimenta al puente completo, lo que asegura un valor muy aproximado de tensión a la salida incluso con valores de rizado importantes en los condensadores de entrada del puente completo. El esquema de control y comunicaciones se muestra de forma simplificada en la Figura 7 (únicamente se muestra una fase formada por tres etapas conectadas en serie). En el maestro se encuentra el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia que requiere la medida de la tensión de entrada, esta podría circular a través de un anillo de baja frecuencia (no dibujado) o incluso a través de cualquiera de los anillos existentes. El maestro impondrá la potencia que debe inyectarse en la red y generará las tensiones de referencia que debe poner cada fase a partir de las medidas que le lleguen desde el PLL. El PLL no solo realiza la sincronización, sino que mide la corriente y envía los valores de la medida de tensión y corriente en formato DQ, junto con el ángulo estimado. El convertidor CC/CC tendrá su propio controlador. Sin embargo, al no existir sistemas de medida con un aislamiento lo suficientemente grande como para soportar la tensión de aislamiento del transformador se ha optado por utilizar una comunicación punto a punto entre el controlador del puente completo y el convertidor CC/CC de manera que puedan intercambiar los valores medidos de corriente y tensión.

Figura 7. Arquitectura de control



Las tensiones de aislamiento que debe soportar el transformador es un punto muy relevante en la elección del "sistema nervioso" de convertidor, no solo deben existir comunicaciones sino también alimentaciones y medidas. En cada conjunto convertidor CC/CA+CC/CC se han definido dos masas LV (baja tensión) situada en la referencia del generador conectado al convertidor CC/CC y HV (alta tensión) situadas en la rama negativa de la tensión de alimentación del puente completo. Esta arquitectura permite la utilización de "drives"

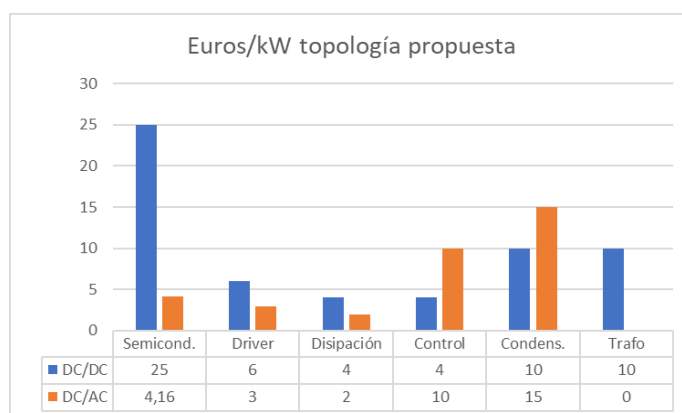
convencionales para el disparo de los transistores excepto si se utiliza un DAB. En ese caso los disparos están generados desde la parte de LV y necesitarán enlaces de fibra óptica. Dado que las medidas que necesita el convertidor CC/CC son enviadas por el controlador del convertidor CC/CA es necesario que todo el sistema esté alimentado antes de intentar arrancar. Para poder disponer de fuentes de alto aislamiento a un precio “aceptable” se propone utilizar un bucle de corriente con un cable de alta tensión. La energía se tomará desde el generador fotovoltaico mediante un convertidor con alta relación de transformación y se generarán un lazo de corriente de alta frecuencia al que se acoplarán toroides que permitirán disponer de una fuente de alto aislamiento. Los convertidores que comparten referencia (la entrada) se alimentarán a través de un convertidor CC/CC con bajo aislamiento. Se incluye aislamiento para evitar lazos de masa en un circuito donde las corrientes serán altas.

## 6. Estimación del coste para la topología de inversión propuesta.

Es muy difícil estimar cual sería el coste en producción del inversor diseñado para poder compararlo con los inversores que actualmente están en el mercado, por lo que la comparación la realizaremos sobre los costes de los elementos principales del conjunto del sistema inversor. Los precios de los semiconductores se han obtenido de las páginas de los fabricantes y los distribuidores para el mismo número de unidades solicitadas.

Para calcular el coste del sistema de disipación se ha supuesto un coste de 0,2 euros por vatio disipado.

**Figura 8. Estimación del coste de los subsistemas del convertidor**



Hay que mencionar que los costes de control del convertidor propuesto son muy superiores como consecuencia de todas las comunicaciones de fibra óptica necesarias para el control. Se han intentado reducir con la “arquitectura” propuesta, pero de cualquier forma al repetirse en todos los convertidores se multiplica el gasto total. Algo similar sucede en el convertidor CC/CC el control debe superar la barrera de aislamiento del transformador para enviar medidas y señales de disparo, lo que hace de nuevo necesario la utilización de fibra óptica en convertidores de relativa baja potencia. Esto tiene un fuerte impacto en el coste del convertidor.

Para mantener un rendimiento elevado en el convertidor CC/CC se hace necesaria la utilización de convertidores con semiconductores de SiC. Se han calculado los costes con precios de catálogo pero prácticamente son componentes “prototipo” y su coste es desorbitado. En caso de no utilizar componentes de SiC para el convertidor CC/CC y utilizar

una topología unidireccional el coste se reduciría en la parte de semiconductores, pero el rendimiento se vería fuertemente afectado. El coste del transformador de alta frecuencia ha sido estimado en función de los materiales utilizados.

## 7. Resultados.

Desde el punto de vista de la **viabilidad técnica**, la solución propuesta presenta los siguientes aspectos positivos: es compatible con el objetivo de rendimiento marcado. La extracción de energía de los paneles no se vería penalizada y se solventarían sobre todo los problemas de desequilibrio en la inyección de la misma a la red. Una ventaja adicional es que la reducción del tamaño de los condensadores y el ajuste del diseño del transformador de aislamiento, hacen que el peso total del conjunto sea mucho menor que en un sistema convencional de inversión (es una condición importante si se quiere la integración de los convertidores en el sistema de seguimiento). Como aspecto negativo, la mayor complejidad del sistema y el mayor número de componentes utilizados hace que las probabilidades de fallo aumenten disminuyendo la fiabilidad.

Desde el punto de vista de la **viabilidad económica**, aún sin entrar en detalle de los costes del control y la fibra óptica necesaria para la comunicación entre las etapas y simplemente centrándonos en la relación de coste existente entre el circuito de disparo y el transistor de potencia, las etapas CC/CA del convertidor propuesto son mucho más caras que para el convertidor multinivel (3 niveles) que actualmente se está instalando. Pero supongamos que, en el mejor de los casos, la reducción del tamaño del filtro que presenta esta topología compensara dicho valor (el filtro puede ser hasta 4 veces más pequeño). En ese caso, sería necesario construir un convertidor CC/CC con el 98,5% de rendimiento con un coste similar al de un transformador, es decir, por aproximadamente la mitad del coste de la etapa CC/CA. Con los costes actuales de semiconductores esto es extremadamente difícil de conseguir. Como se ha mostrado en el documento, para acercarnos a dichos rendimientos es necesario utilizar transistores de SiC. El coste de los transistores MOSFET de SiC junto con el transformador de alto aislamiento supera el coste de la etapa CC/CA. A pesar de que se ha demostrado que con la topología propuesta el coste de los condensadores no penaliza la solución (respecto a la solución tradicional), y de demostrar que puede ser utilizada una topología unidireccional que reduciría el número de transistores, el coste de la solución propuesta no puede ni aproximarse al de la solución actual.

## 8. Conclusiones

Aunque la solución propuesta es técnicamente viable si bien ve penalizada la confiabilidad del conjunto por la complejidad del sistema, desde el punto de vista económico no es todavía competitiva en absoluto debido a los semiconductores de potencia disponibles hoy día en el mercado. No hay dispositivos semiconductores de alta tensión y baja potencia y esto nos obliga a elevar el número de etapas en el convertidor CC/AC. Esta circunstancia no sólo afecta al coste de los elementos de potencia sino que también multiplica el del sistema auxiliar de comunicaciones, que al ser por fibra óptica para garantizar poder enviar de forma sincrónica todas las señales de disparo eleva mucho el coste.

Si en un futuro se reduce el coste de los transistores de SiC y se fabrican componentes de mayor tensión y baja corriente en dicha tecnología, esta solución podría ser aplicable, ya que aumentaría la potencia de los semiconductores, se reduciría en número de etapas y con ello mejoraría el ratio potencia/control.

## Agradecimientos

Este trabajo es parte del trabajo realizado en el proyecto TEC2016-80136-P, financiado por el Programa estatal de fomento de la investigación científica y técnica de excelencia, subprograma estatal de generación del conocimiento.

## REFERENCIAS

- Chavarria, J., Biel, D., Guinjoan, F., Meza, C., Negroni, J. (2013). Energy balance control of PV cascaded multilevel grid-connected inverters under level-shifted and phase-shifted PWMs, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60(1), 98–111. DOI: 10.1109/TIE.2012.2186108
- Foureaux, N.C., Filho, B.J., Brito, J.A. (2015). Cascaded multilevel SST medium voltage converter for solar applications, *9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*, 801-808.
- Fu, R., Feldman, D., Margolis, R. (2018). U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark. *Technical Report NREL/TP-6A20-72399*. National Renewable Energy Laboratory
- Hu, J., Joebges, P., De Doncker, R.W. (2017). Maximum power point tracking control of a high power dc-dc converter for PV integration in MVDC distribution grids, *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 1259-1266. DOI: 10.1109/APEC.2017.7930857.
- Islam, M., Guo, Y.G., Zhu, J.G. (2012). 11kV series-connected H-bridge multilevel converter for direct grid connection of renewable energy systems, *Journal of Int Conf. Elec. Mach. Systems*, 1, 211-219. DOI: 10.11142/jicems.2012.1.2.070.
- Ortiz, G., Biela, J., Kolar, J. (2010) Optimized Design of Medium Frequency Transformers with High Isolation Requirements, *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 631–638. DOI: 10.1109/IECON.2010.5675240.
- Prasanta K., Brian, A., Jonhson, B., Seo, B.S., Maksimovic, D. (2019). A Multilevel DC to Three-Phase AC Architecture for Photovoltaic power Plants, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34(1) 181-190. DOI: 10.1109/TEC.2018.2877151.
- Rivera, S., Kuoro, S., Leon, J.I., Wu, B., Rodriguez, J., Franquelo. L.G. (2011). Cascaded H-Bridge Multilevel Converter Multistring Topology for Large Scale Photovoltaic Systems, *20th IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Poland. DOI: 10.1109/ISIE.2011.5984437.
- Sastry, J. Bakas, P. H. Klim, H., Wang, I., Marinopoulos, A. (2014). Evaluation of cascaded H-bridge inverter for utility-scale photovoltaic systems". *Renewable Energy*, 69, 208-218. DOI: 10.1016/j.renene.2014.03.049.
- Van der Merwe, W., Mouton T. (2009). Solid-State Transformer Topology Selection, *Proc. IEEE Int. Conf. on Ind. Technology (ICIT)*, Gippsland, Australia, 1–6. DOI: 10.1109/ICIT.2009.4939592.