

Convertidor modular trifásico CA/CC para aplicaciones LED basado en la suma de luz por fase

Ignacio Castro, Manuel Arias, Diego G. Lamar, Marta M. Hernando y Javier Sebastián
Grupo de Sistemas Electrónicos de Alimentación de la Universidad de Oviedo, Gijón, España
castroignacio@uniovi.es

Resumen – En este artículo se propone el uso de convertidores trifásicos CA/CC basados en una estructura modular para aplicaciones de iluminación con diodos emisores de luz (*Light-Emitting Diodes*, LEDs). Se aprovecha la estructura modular para controlar la luz de tres cargas LED independientes con tres convertidores elevadores con Corrección del Factor de Potencia (CFP), uno por fase. La luz emitida será la suma de las tres matrices de LEDs. Se aprovechará la naturaleza de la potencia instantánea demandada a la red trifásica por parte del convertidor CA/CC modular para la eliminación de su condensador electrolítico, asegurando también la ausencia de parpadeos en la luz emitida (ausencia de *flicker*). Se presentará el análisis estático de la topología propuesta, para finalmente validarla a partir de las pruebas realizadas sobre un prototipo de 300 W.

Palabras clave— LEDs, convertidores CA/CC, red de distribución trifásica y corrección del factor de potencia.

I. INTRODUCCIÓN

Los diodos emisores de luz (*Light-Emitting Diodes*, LEDs) son hoy en día una realidad en los sistemas de iluminación particular, comercial e industrial. Están copando el mercado gracias a sus excelentes características: alta eficiencia, larga vida útil, bajo mantenimiento, no nocivos para el medioambiente, etc. [1]. Este trabajo se va a centrar en luminarias LED de alta potencia, entre 200 W y 10 kW, dónde el acceso a una red de distribución trifásica es posible y el mantenimiento esté restringido a personal cualificado. Por ejemplo, luminarias situadas en túneles, estadios, grandes superficies comerciales, etc.

Los convertidores CA/CC para LEDs conectados a la red de distribución monofásica han de cumplir con una normativa que limite la inyección de armónicos de baja frecuencia en la red de distribución, como son: ENERGY STAR® *program* [2,3] y IEC 61000-3-2 [4]. Esta normativa es muy restrictiva en equipos de iluminación con potencias superiores a 25 W, requiriendo de ellos una demanda de corriente muy sinusoidal (IEC 61000-3-2, Clase C) y un Factor de Potencia (FP) mayor que 0.9 (ENERGY STAR® *program*). Por lo tanto, a este tipo de convertidores se les requiere una Corrección del Factor de Potencia (CFP) activa. Además, ENERGY STAR® *program* demanda una garantía de buen funcionamiento del convertidor CA/CC superior a 50.000

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía a través de del proyecto MINECO-17-DPI2016-75760-R y el Gobierno del Principado de Asturias a través del proyecto SV-PA-17-RIS3-4, la beca “Severo Ochoa” BP14-140 y los fondos FEDER.

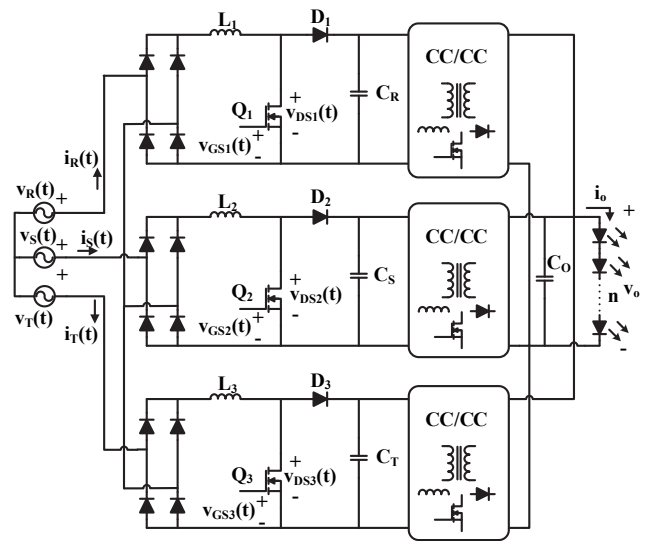


Figura 1. Convertidor modular trifásico CA/CC de tres módulos para aplicaciones LED, cada uno de ellos basado en la tradicional estructura de doble etapa con CFP. Eso significa que los condensadores electrolíticos no pueden ser utilizados para adecuar la potencia pulsada de la red de distribución monofásica a la potencia de continua demandada por la carga LED.

En el caso de las redes de distribución trifásicas la normativa a aplicar no está tan clara. Teóricamente, los convertidores CA/CC para aplicaciones LED no están sometidos a una normativa tan restrictiva (IEC 61000-3-2, Clase A). Sin embargo, la ausencia de condensadores electrolíticos es necesaria. Es aquí, donde estructuras presentadas en el pasado pueden retomarse y modificarse para adaptarlas a las necesidades presentes. Este es el caso del convertidor modular trifásico CA/CC de tres módulos que muestra la Figura 1 [5,6] o su versión de seis módulos para alcanzar mayores rendimientos [6-8]. En la Figura 1 se observa que cada módulo está basado en la tradicional estructura de doble etapa para la CFP. La primera etapa es un convertidor elevador con CFP que demanda de la red una corriente sinusoidal y estabiliza su tensión de salida entorno a los 400 V. La segunda etapa es un convertidor CC/CC con aislamiento galvánico que adecúa los niveles de tensión y corriente a la carga LED. En esta estructura el aislamiento galvánico también permite la conexión en paralelo de cada módulo (uno por fase) para la eliminación del

condensador electrolítico, evitando parpadeos en la luz emitida al doble de la frecuencia de red (ausencia de *flicker*). Sin embargo, el mayor inconveniente del uso de la doble etapa como módulo es su elevado número de componentes, repercutiendo negativamente en la complejidad de su diseño y en su coste [9].

En este artículo se va a proponer como módulo del convertidor modular trifásico CA/CC para aplicaciones LED únicamente al convertidor elevador con CFP (Figura 2). Cada carga LED (tres en esta estructura) se conectará directamente a su salida, apostando por el uso de diodos LED de alta tensión (*High Voltage LEDs*, HV-LEDs) [10]. Así se concretará un módulo más barato y menos complejo en su diseño y, que también permita la eliminación del condensador electrolítico con ausencia de *flicker*.

La sustitución del condensador electrolítico por otra tecnología (normalmente cerámica o de película de plástico) pasa por la reducción de la capacidad de salida de los convertidores elevadores con CFP (es decir, de C_R , C_S o C_T). Sin embargo, con esta reducción sobre la componente de continua de la corriente de salida será apreciable un rizado de dos veces la frecuencia de red en $i_{oR}(t)$, $i_{oS}(t)$ e $i_{oT}(t)$. Aunque dicho rizado no condiciona la vida útil de los LED según [11], se producirá un parpadeo significativo a dos veces la frecuencia de red de la luz emitida por módulo, asumiendo como lineal la relación entre la corriente y la luz emitida por un LED [12]. Por el contrario, si la red de distribución trifásica es equilibrada el parpadeo emitido por cada fase se cancelará, emitiendo el convertidor modular trifásico CA/CC para aplicaciones LED de la Figura 2 luz constante y sin parpadeos a su salida.

Se va a estructurar este artículo con el objetivo de proponer la topología de la Figura 2 como solución simple, eficiente y de larga vida útil para el diseño y construcción de luminarias LED dónde el acceso a una red de distribución trifásica es posible y el mantenimiento esté restringido a personal cualificado (por la ausencia de aislamiento galvánico). En el apartado II, se va a desarrollar el análisis estático de esta solución. En el apartado III se presentarán los resultados experimentales de un prototipo de 300 W que corrobora la idea propuesta. Finalmente, en el apartado IV se concluirá sobre la propuesta presentada.

II. ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA PROPUESTA

El concepto de Resistencia Libre de Pérdidas (RLP) en el contexto de los convertidores CA/CC monofásicos será el punto de partida para el análisis de la topología de la Figura 2. Cada uno de los convertidores elevadores de la Figura 2 emula una RLP en paralelo con cada una de las tensiones de fase rectificadas, lo que supone una demanda de corriente sinusoidal por fase. Este comportamiento se puede conseguir con el denominado Control por Multiplicador (CM) [13] o asegurándose la operación en Modo de Conducción Frontera durante todo el ciclo de red [14]. Así cada convertidor elevador desde cada tensión de fase rectificada es visto como una resistencia (es decir, $R_{LFRR}=R_{LFRR}=R_{LFRT}$ de la Figura 3), transfiriendo toda la potencia a su respectivo puerto de salida (es decir transfiriendo

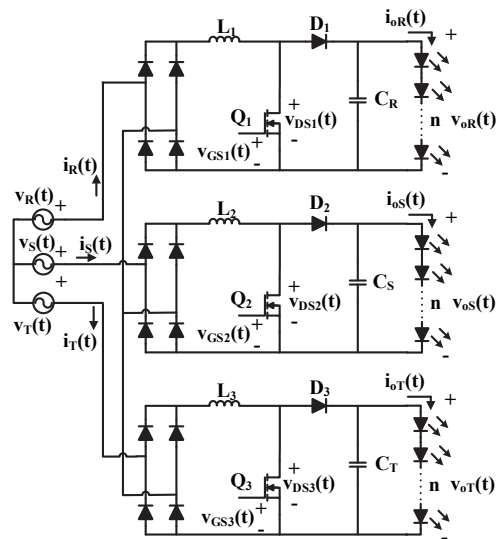


Figura 2. Convertidor modular trifásico CA/CC para aplicaciones LED basado en la suma de luz por fase

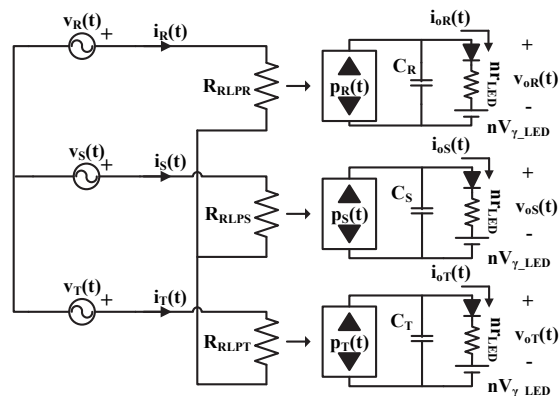


Figura 3. Simplificación del convertidor modular trifásico CA/CC para aplicaciones LED basado en la suma de luz por fase usando el concepto de RLP.

$p_R(t)$, $p_S(t)$ y $p_T(t)$ a sus respectivas cargas LED). Si la red de distribución trifásica es equilibrada, $p_R(t)=p_S(t)=p_T(t)$.

En primer lugar, se analizará la intensidad de luz emitida ($L_o(t)$) por el convertidor CA/CC modular trifásico propuesto. Para el cálculo de $L_o(t)$ se hace necesario el cálculo previo de $i_{oR}(t)$, $i_{oS}(t)$ e $i_{oT}(t)$:

$$L_o(t) = \alpha (i_{oR}(t) + i_{oS}(t) + i_{oT}(t)), \quad (1)$$

dónde α es el factor de proporcionalidad entre la corriente y la luz emitida por un LED, asumiendo ésta como constante. En este punto se abordan dos casos analizar: sin condensador de salida en cada uno de los convertidores elevadores con CFP de la Figura 2 o reduciendo la capacidad de cada uno de ellos.

A. Análisis sin condensador de salida

La potencia instantánea de salida de cada uno de los módulos (Figura 3), suponiendo como carga LED una matriz de LEDs de una sola fila y sin condensador de salida, se puede expresar como:

$$p_X(t) = i_{oX}^2(t)nr_{LED} + i_{oX}(t)nV_{\gamma-LED}, \quad (2)$$

dónde X representa la fase bajo estudio (es decir, X=1 para la fase R, X=2 para la fase S y X=3 para la fase T), r_{LED} representa la resistencia dinámica del LED, $V_{\gamma-LED}$ representa su tensión de codo y n representa el número de LEDs conectados en serie. Resolviendo (2), se puede obtener la expresión de la corriente de salida para cada módulo:

$$i_{oX}(t) = \frac{-nV_{\gamma-LED} + \sqrt{n^2V_{\gamma-LED}^2 + 4nr_{LED}p_X(t)}}{2nr_{LED}}, \quad (3)$$

donde,

$$p_X(t) = i_g v_g \sin^2\left(\omega t - X \frac{2\pi}{3}\right), \quad (4)$$

siendo, i_g y v_g los valores de pico de la corriente y tensión de entrada y ω la frecuencia angular de red. A partir de (1) y (3) se puede reescribir la expresión de $L_o(t)$ a partir de su desarrollo en series de Fourier, tomando el armónico 60 como límite:

$$L_o(t) = \frac{L_{max} + L_{min}}{2} - \frac{L_{max} - L_{min}}{2} \cos(6\omega t), \quad (5)$$

donde,

$$L_{min} = \alpha \frac{-nV_{\gamma-LED} + \sqrt{n^2V_{\gamma-LED}^2 + 3nr_{LED}p_g}}{nr_{LED}}, \quad (6)$$

y

$$L_{max} = \alpha \frac{-nV_{\gamma-LED} + \sqrt{n^2V_{\gamma-LED}^2 + 4nr_{LED}p_g}}{2nr_{LED}} \quad (7)$$

$$+ \alpha \frac{-nV_{\gamma-LED} + \sqrt{n^2V_{\gamma-LED}^2 + nr_{LED}p_g}}{nr_{LED}},$$

siendo $p_g = i_g \cdot v_g$.

Como se puede comprobar en (5), la intensidad de luz emitida está compuesta por un valor constante y un rizado de seis veces a frecuencia de red. El valor de $L_o(t)$ es muy dependiente de la tecnología LED a utilizar como carga (es decir, r_{LED} y $V_{\gamma-LED}$). Tomando valores reales de LEDs comerciales el termino $L_{max} + L_{min}$ es siempre mucho mayor que $L_{max} - L_{min}$, haciendo el rizado despreciable frente al termino constante de $L_o(t)$. Por lo tanto, se puede concluir que la luz emitida por el convertidor CA/CC modular trifásico propuesto es constante. Sin embargo, aunque la luz emitida es constante, existe un gran rizado de dos veces la frecuencia de red en la carga LED de cada módulo, que conlleva su sobredimensionamiento en términos de corriente máxima. Parece pues razonable, sopesar la posibilidad de colocar un condensador de salida (no electrolítico) para limitar dicho sobredimensionamiento.

B. Análisis con condensador de salida no electrolítico

Analizando este caso, (2) se debe expresar como:

$$p_X(t) = C_X v_{oX}(t) \frac{dv_{oX}(t)}{dt} + v_{oX}(t) i_{oX}(t), \quad (9)$$

siendo $v_{oX}(t)$:

$$v_{oX}(t) = nV_{\gamma-LED} + i_{oX}(t)nr_{LED}. \quad (10)$$

donde C_X es cada una de las capacidades de salida de cada módulo. Para la resolución de la ecuación diferencial planteada en (9), es necesario saber de antemano la expresión matemática de $i_{oX}(t)$, que en este caso es la superposición de un valor de continua y un rizado sinusoidal a dos veces la frecuencia de red:

$$i_{oX}(t) = i_{ac} \sin\left(2\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}X\right) + i_{dc}, \quad (11)$$

donde i_{ac} y φ son la amplitud y desfase de la componente de alterna e i_{dc} la componente de continua. Para la obtención de i_{ac} , φ e i_{dc} se sustituye (11) en (9) y se resuelve la ecuación diferencial, despreciando los términos de orden superior. Para la fase R se obtiene:

$$p_g \sin^2(\omega t) = a_1 i_{ac} \cos(2\omega t - \varphi) + a_2 i_{ac} \sin(2\omega t - \varphi) + \left(\frac{i_{ac}^2}{2} + i_{dc}^2\right) nr_{LED} + i_{dc} nV_{\gamma-LED}, \quad (12)$$

donde,

$$a_1 = C_X nr_{LED} (nr_{LED} i_{dc} + nV_{\gamma-LED}) 2\omega, \quad (13)$$

$$a_2 = (2nr_{LED} i_{dc} + nV_{\gamma-LED}). \quad (14)$$

La ecuación (12) se puede reescribir como:

$$\frac{p_g}{2} = \left(\frac{i_{ac}^2}{2} + i_{dc}^2\right) nr_{LED} + i_{dc} nV_{\gamma-LED}, \quad (15)$$

y

$$\frac{-p_g}{2} \cos(2\omega t) = a_1 i_{ac} \cos(2\omega t - \varphi) + a_2 i_{ac} \sin(2\omega t - \varphi). \quad (16)$$

Las ecuaciones (15) y (16) definen un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas: i_{ac} , φ e i_{dc} . Para una fácil resolución del mismo, se va a suponer que i_{ac}^2 en la ecuación (15) es despreciable frente a i_{dc}^2 . Esta suposición se corroboró tras analizar los resultados de la misma en comparación con la resolución real del sistema usando Matlab®, obteniendo un error de menos del 5% en el peor caso. Así, la expresión de i_{dc} se puede deducir como:

$$i_{dc} = \frac{-nV_{\gamma-LED} + \sqrt{n^2V_{\gamma-LED}^2 + 2nr_{LED}p_g}}{2nr_{LED}}. \quad (17)$$

Ahora ya se está en disposición de utilizar la ecuación (16) junto con (17) para obtener i_{ac} y φ :

$$i_{ac} = \frac{-p_g}{2\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}, \quad (18)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{-a_2}{a_1}\right). \quad (19)$$

En este punto, también se puede deducir a partir de (18) la expresión del condensador de salida para la fase R en función de un determinado rizado pico a pico de la corriente de salida (Δi_o). Aunque la expresión ha sido deducida para el módulo conectado a la fase R, se puede generalizar para cualquier módulo:

$$C_X = \frac{1}{n_{rLED} (n_{rLED} I_{dc} + n V_{\gamma,LED}) 2\omega} \sqrt{\frac{P_g^2}{4I_{dc}^2 \Delta I^2} - a_2^2}. \quad (20)$$

A partir de las expresiones deducidas en este análisis estático (es decir (17), (18), (19) y (20)), se puede cuantificar el impacto de la reducción del condensador de salida en la corriente de salida de cada módulo del convertidor CA/CC modular trifásico propuesto. En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos usando las especificaciones del prototipo experimental que se va a proponer en la siguiente sección. Como se puede comprobar con un condensador de salida de 1 μ F, apenas hay diferencia en comparación con el diseño sin condensador. El filtrado empieza a ser significativo a partir de 10 μ F.

Finalmente sustituyendo (11) en (1) se puede describir la expresión de $L_o(t)$ como:

$$L_o(t) = 3\alpha i_{dc}, \quad (21)$$

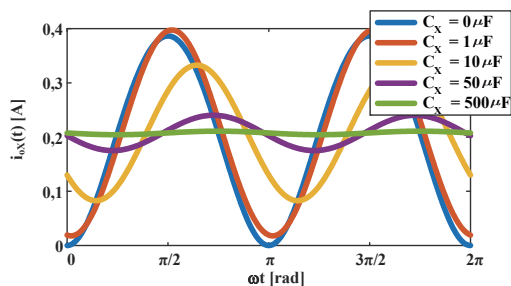


Figura 4. Corriente de salida del módulo en función ωt para diversos valores del condensador de salida.

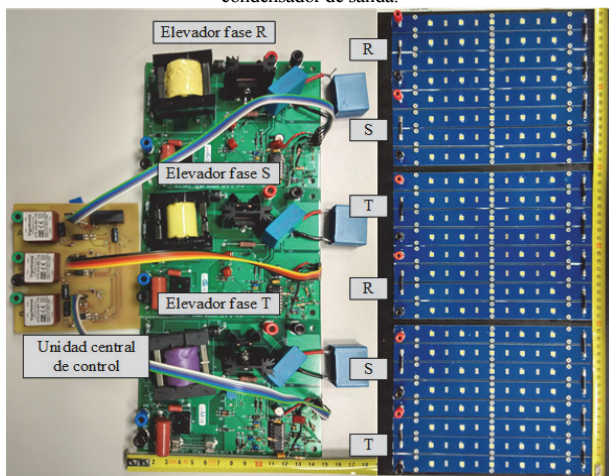


Figura 5. Fotografía del prototipo experimental del convertidor modular trifásico CA/CC para aplicaciones LED basado en la suma de luz por fase.

Por lo tanto, aquí también se puede concluir que la luz emitida por el convertidor CA/CC modular trifásico propuesto se puede considerar constante (ausencia de *flicker*).

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A. Descripción del prototipo experimental.

Un prototipo experimental del convertidor modular trifásico CA/CC de la Figura 2 se construyó con el objetivo de demandar una corriente sinusoidal de cada fase de una red de distribución trifásica europea (230 V eficaces de fase y 50 Hz). Para ello se utilizó como módulo un convertidor elevador con CM (con el circuito integrado UCC3817) operando en Modo de Conducción Continuo (MCC). Cada módulo alimenta una carga de dos filas de 20 LEDs (L150-5770502400000) en paralelo. El número de LEDs por fila se seleccionó para asegurar una tensión de salida siempre mayor que 400 V para la potencia mínima procesada por el módulo (en este prototipo no se puede conseguir un control de la corriente de salida total, *dimming* total). El número de filas en paralelo se seleccionó para procesar una potencia máxima por módulo de 100 W.

La Figura 5 muestra una fotografía del prototipo experimental, cuyos principales componentes se enumeran en la Tabla I. Asimismo, en esta figura se pueden diferenciar los tres módulos, la unidad central de control y las tres cargas LED. La unidad de control central, se encarga del arranque, siguiendo una estrategia muy similar a la presentada en [13], y del control de la corriente de salida por cada módulo. Las cargas LED de cada módulo están entrelazadas para propiciar una mejor mezcla entre las luces emitidas por cada módulo.

TABLA I. COMPONENTES PRINCIPALES DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL

Referencia de la Figura 2	Valor
L_1, L_2 y L_3	1.7 mH
Q_1, Q_2 y Q_3	IPW65R190C7
D_1, D_2 y D_3	IDH06SG60C
C_R, C_S y C_T	10 μ F

B. La reducción del condensador de salida en un módulo

La Figura 6 muestra los resultados experimentales de la corriente de entrada, de la corriente de salida y de la luz emitida (v_L) a máxima potencia por uno de los módulos del prototipo experimental. La luz emitida se va a medir con un amplificador de transimpedancia, en concreto el TSL-257 y situado a 20 cm de la carga de LEDs. En la Figura 6 (a) se muestra como la corriente de entrada está en fase con la tensión de entrada y que en la corriente de salida se aprecia un rizado de dos veces la frecuencia de red debido a la reducción del condensador de salida a 10 μ F, apreciándose ese rizado a su vez en la luz emitida (v_L). En la Figura 6 (b), también se muestra la tensión de salida del módulo, que nunca es menor que 400 V. Esta situación también ha sido comprobada a un cuarto de carga, donde debido al rizado, la corriente por la carga de LEDs llega a cero.

Por otro lado, también se experimentó la disminución del condensador de cada módulo para corroborar los resultados

obtenidos en la Figura 4. En la Figura 7 se muestran los resultados experimentales de la variación del condensador de salida del prototipo (información extraída del osciloscopio). Como se puede apreciar los resultados son los mismo que los de la Figura 4 y, por tanto, los mismos que el análisis estático propuesto. Es importante decir que la diferencia de los desfases entre las formas de onda de las Figura 4 y 7 es debida al disparo del osciloscopio.

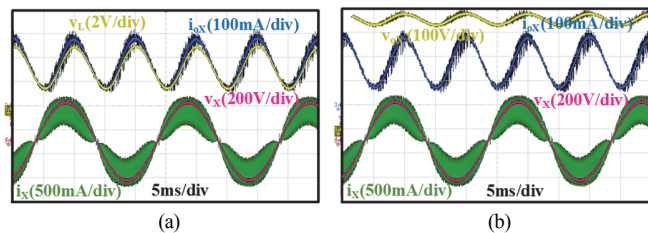


Figura 6. Tensión de entrada, corriente de entrada y corriente de salida por uno de los módulos del prototipo resaltando, a) luz emitida (v_L) y b) la tensión de salida.

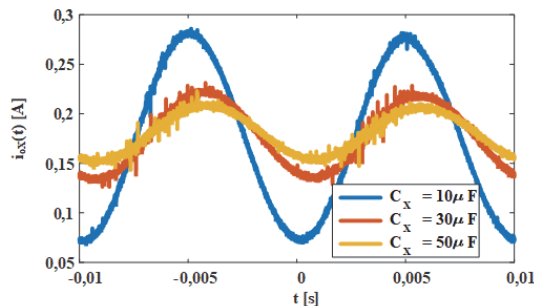


Figura 7. Corriente de salida de un módulo del prototipo en función ωt para diversos valores del condensador de salida.

C. Operación en una red de distribución trifásica

El prototipo construido ha sido probado en una red de distribución trifásica europea (230 V eficaces de fase y 50 Hz) a través de un autotransformador. La Figura 8 muestra las principales formas de onda a plena carga (es decir, a 300 W). La Figura 8a muestra las corrientes de fase usando como referencia la tensión de fase R. Como se puede comprobar, se obtiene un FP unidad en la fase R, que también (aunque no lo muestre la figura) se puede extender al resto de fases. La Figura 8b muestra las corrientes de salida de cada una de las fases y la luz sesada con el fotodiodo y el amplificador de transimpedancia ($v_L(t)$). Como se puede apreciar, el rizado de seis veces la frecuencia de red apenas se aprecia en la luz emitida por el prototipo.

De forma cualitativa se ha demostrado que el prototipo emite una luz constante. Sin embargo, el parpadeo o *flicker* se tiene que evaluar y, así estimar los efectos biológicos perjudiciales para la salud humana. Para ello el valor de la Modulación (%) debe calcularse:

$$\text{Mod.}(\%) (m) = \frac{L_{H,\max}(m) - L_{H,\min}(m)}{L_{H,\max}(m) + L_{H,\min}(m) + L_{dc}} \cdot 100, \quad (22)$$

y debe estar dentro de los límites de la región recomendada en [14]. $L_{H,\max}(m)$ y $L_{H,\min}(m)$ corresponden con el valor máximo y el valor mínimo de la luz emitida por el el armónico m y L_{dc} el

nivel de continua de la luz emitida. Se ha medido la luz emitida en un ciclo de red y, posteriormente se han procesado los datos obtenidos usando Matlab®. La Figura 9 muestra los resultados. Como se puede comprobar, todos los armónicos de la Modulación(%) relativos a las componentes de alterna, en el rango de frecuencia de 50 Hz hasta 3kHz, se encuentran dentro de la región recomendada. Por lo tanto, se puede garantizar una buena calidad de luz y evitar los efectos nocivos para la salud (ausencia de *flicker*).

D. Cumplimiento de la normativa y eficiencia

En este punto se va a analizar el cumplimiento de la normativa IEC 61000-3-2 y ENERGY STAR® program. Para ello se midieron las corrientes de fase y se procesaron los datos obtenidos usando Matlab®. La Figura 10 muestra el cumplimiento de la normativa IEC 61000-3-2 en Clase C para cada una de las fases. Aunque no sería necesario el cumplimiento de la normativa en Clase C (actualmente un equipo trifásico debe estar clasificado

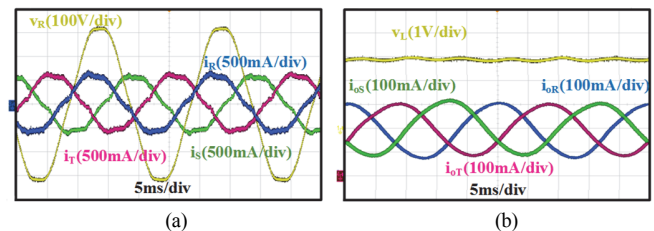


Figura 8. Formas de onda del prototipo conectado a una red de distribución trifásica. a) Tensiones de fase y corriente de la fase R. b) Corrientes de salida y luz emitida.

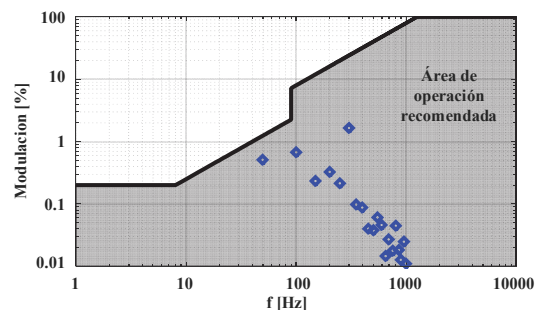


Figura 9. Contenido armónico de la luz (modulación [%]) dentro de la zona segura según.

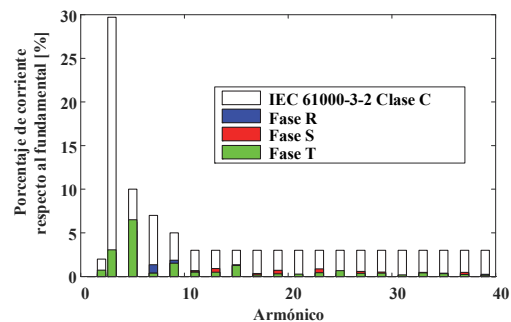


Figura 10. Contenido armónico de la corriente demandada a cada fase comparada con los límites de la normativa IEC 61000-3-2 en Clase C.

como Clase A), se toman estos límites (más restrictivos) por si se modifica la normativa en el futuro ya que no está muy claro la clasificación de equipos trifásicos de iluminación. Por otro lado, en la Tabla II se muestran los resultados del FP y Distorsión Armónica Total (DAT) de cada fase para diferentes valores eficaces de la tensión de entrada. Como se puede comprobar la DAT nunca es mayor del 10% y el FP es siempre mayor que el 0,99, cumpliendo la normativa ENERGY STAR® program.

TABLA II. FP, DAT Y EFICIENCIA

Fase / Valor eficaz tensión de entrada [V]	R	S	T
DAT [%]	6,7	6,8	7
FP	0,997	0,997	0,997
Rendimiento [%]	97		
DAT [%]	6,7	7,1	7,3
FP	0,995	0,995	0,995
Rendimiento [%]	97,5		
DAT [%]	7,4	7,6	7,9
FP	0,992	0,992	0,997
Rendimiento [%]	98,2		

En la Tabla II, también se pueden comprobar los resultados experimentales del rendimiento eléctrico del prototipo para diferentes tensiones de entrada a plena carga. Éstos son siempre mayores del 97 %. En la Figura 11 se muestra los resultados experimentales del rendimiento en función de la carga, mostrando también rendimientos eléctricos muy altos. Por otro lado, también se midió la eficiencia lumínica a plena carga y tensión nominal, obteniendo 140 lm/W.

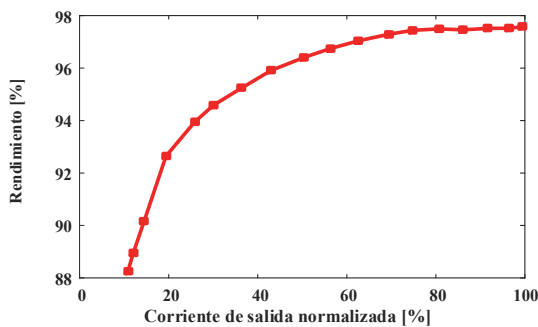


Figura 11. Rendimiento del prototipo en función de la carga.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta un convertidor modular trifásico CA/CC basado en la suma de luz por fase para aplicaciones LED alta potencia, entre 200 W y 10 kW, dónde el acceso a una red de distribución trifásica es posible y el mantenimiento esté restringido a personal cualificado.

Las principales especificaciones a alcanzar son la eliminación del condensador electrolítico con ausencia de flicker, la simplicidad y un elevado rendimiento eléctrico. Esto se consigue partiendo del convertidor modular trifásico CA/CC presentado el [5], eliminando la segunda etapa (convertidor CC/CC con

aislamiento) de la solución clásica de dos que conforma cada módulo. De esta manera se hará apreciable un parpadeo a dos veces la frecuencia de red de la luz emitida por modulo. Sin embargo, si la red de distribución trifásica es equilibrada se cancelará el parpadeo emitido por cada fase, emitiendo el convertidor modular trifásico CA/CC una luz constante y sin parpadeos a su salida. Este artículo demuestra este hecho partir de estudios teóricos y su verificación experimental. El principal inconveniente de la solución propuesta es la eliminación del aislamiento galvánico y el alto rizado de baja frecuencia que circula por la carga LED de cada módulo. Este es el precio a pagar por una solución sencilla y de bajo coste sin condensador electrolítico.

REFERENCES

- [1] M. Arias, A. Vazquez, and J. Sebastian, "An overview of the AC-DC and DC-DC converters for LED lighting applications," *Automatika—J. Control, Measure., Electr., Comput. Commun.*, vol. 53, pp. 156–172, 2012.
- [2] ENERGY STAR® Program Requirements Product Specification for Lamps (Light Bulbs) – Eligibility Criteria, V. 2.0, Oct. 2016.
- [3] ENERGY STAR® Program Requirements Product Specification for Luminaires (Light Fixtures) – Eligibility Criteria, V. 2.0, Jan. 2016.
- [4] Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current < 16 A per phase), document IEC 61000-3-2, 2014.
- [5] R. F. Brewster and A. H. Barret, "Three Phase AC to DC voltage converter with Power Line Harmonic Current Reduction", U.S. patent 4 143 414, March 6, 1979.
- [6] I. Castro, D. G. Lamar, M. Arias; M. M. Hernando, J. Sebastian, "Multi-cell three phase ac-dc driver for HB-LED lighting applications," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. PP, no.99, pp.1-1.
- [7] J. Sebastián, I. Castro, D. G. Lamar, A. Vázquez and K. Martín, "High power factor modular polyphase AC/DC converters with galvanic isolation based on Resistor Emulators," 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, 2016, pp. 25-32.
- [8] I. Castro, D. G. Lamar, M. Arias, J. Sebastian and M. M. Hernando, "Three phase converter with galvanic isolation based on loss-free resistors for HB-LED lighting applications," 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, 2016.
- [9] M. Arias, D. G. Lamar, J. Sebastian, D. Balocco and A. A. Diallo, "High-Efficiency LED Driver Without Electrolytic Capacitor for Street Lighting," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 1, pp. 127-137, Jan.-Feb. 2013.
- [10] C. S. Wong, K. H. Loo, Y. M. Lai, M. H. L. Chow and C. K. Tse, "An Alternative Approach to LED Driver Design Based on High-Voltage Driving," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 3, pp. 2465-2475, March 2016.
- [11] W. Feng, Y. He and F. G. Shi, "Investigation of LED Light Output Performance Characteristics Under Different Alternating Current Regulation Modes," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 17, no. 3, pp. 720-723, May-June 2011.
- [12] N. Pousset, B. Rougie, and A. Razet, "Impact of current supply on LED colour," *Lighting Res. Technol.*, vol. 42, no.4, pp. 371–383, August 2010.
- [13] M. Kumar, L. Huber and M. M. Jovanovic, "Startup procedure for three-phase three-wire isolated ac-dc converter implemented with three single-phase converter modules," 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, 2016, pp. 46-53.
- [14] IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers," in *IEEE Std 1789-2015*, vol., no., pp.1-80, June 5 2015.