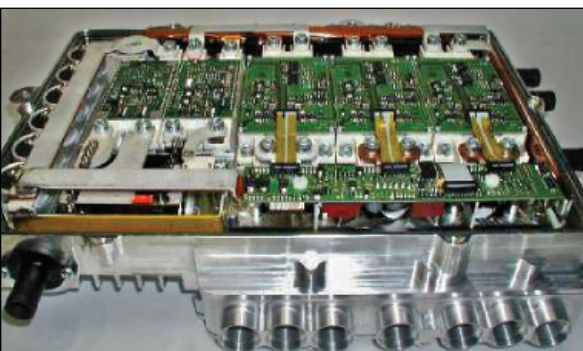


Presente y futuro de la electrónica de potencia (II). Aplicaciones de mediana y pequeña potencia



ABSTRACT

• In the previous paper, published last month [1], the general aspects of Power Electronics and the high power range applications were reviewed. The many existing applications throughout industry, transport, public buildings, communications, computing, home automation and electro-medical devices, mainly in the role of feeding power to equipment and systems, were presented. As shown, the power range is very wide, covering from over five thousand megawatts in High Voltage DC Transmission to a few tenths of a watt in micro-power converters for mobile telephones and electro-medical devices. In this second and last paper the medium and low power range applications, normally with important weight and size restrictions, are reviewed.

• **Key words:** Power electronics, electronic regulators, static converters, power supplies, uninterruptible power supplies, voltage stabilizers, speed motor controllers, line conditioners, static transfer switches, power quality.

Salvador Martínez-García ¹
Enrique Juan Dede-García ²
Juan Carlos Campo-Rodríguez ³
Peter Joseph Bradley ⁴
Pablo Rueda-Boldo ⁵
Santiago Monteso-Fernández ⁶
Carlos Cagigal-Olay ⁷
Rubén Vela-García ⁸

Dr. Ingeniero Industrial
Dr. en Ciencias Físicas
Dr. Ingeniero Industrial
Ingeniero Industrial
Ldo. Ciencias Físicas, Dr. Ingeniería Electrónica
Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Ingeniero Industrial

¹ DIEEC-ETSII-UNED, c/ Juan del Rosal, 12 - 28040 Madrid. Tfno: +34 913 986481; smartine@ieec.uned.es

² GH ELECTROTHERMIA S.A, Vereda Real s/n - 46018 San Antonio de Benagéber (Valencia). Tfno: +34 961 352020; edede@ghe.es

³ UNIVERSIDAD DE OVIEDO, Área de Tecnología Electrónica, Campus de Viesques, s.n. - 33204 Gijón. Tfno: +34 985 182427; campo@ate.uniovi.es

⁴ INTERNATIONAL ELECTRONICS, S.A., Los Pintores, 3 (Pol. Urtsina) - 28925 ALCORCON. Tfno: +34 916 431973; ies_sa@teleline.es

⁵ ESA-ESTEC, Keplerlaan, 1 - Postbus 299 - 2200 AG Noordwijk - The Netherlands. Tfno: +31 715 656565; pablo.rueda.boldo@esa.int

⁶ SEPSA, P.I. "Pinto Estación", c/ Albatros 7 y 9 - 28320 Pinto (Madrid). Tfno: +34 914 957000; smonteso@sepsa.es

⁷ ROBERT BOSCH GASOLINE SYSTEMS, S.A, c/ Raso de la Estrella s/n - 28300 Aranjuez (Madrid). Tfno: +34 918 099700; Carlos.Cagigal@es.bosch.com

⁸ VALED CLIMATE CONTROL, 8 rue Louis Lormand ZA de l'Agiot -70321 La Verrière - France. Tfno + 33 013 0135000. ruben.vela-garcia@valeo.com

Recibido: 01/12/09 • Aceptado: 15/04/2010

Present and future of the power electronics (II). Middle and low-power applications

RESUMEN

En el artículo publicado el mes anterior [1], se ha revisado el presente y futuro de la Electrónica de Potencia en cuanto a sus aspectos generales y aplicaciones de gran potencia. Se constataba la enorme diversidad de usos en la industria, el transporte, la edificación, las comunicaciones, la informática, la domótica y la electromedicina, en el papel subsidiario de alimentar un equipo o una instalación eléctrica o electrónica. El rango de potencia es muy alto, desde más de cinco mil megavatios en la transmisión de energía eléctrica en corriente continua de alta tensión hasta décimas de vatio en los convertidores adaptadores de tensión

de teléfonos móviles y aparatos de electromedicina. En esta segunda y última parte del trabajo se revisan las aplicaciones de media y pequeña potencia, en las que cobra relevancia la reducción de peso y volumen.

Palabras clave: Electrónica de potencia, reguladores electrónicos, convertidores estáticos, fuentes de alimentación, sistemas de alimentación ininterrumpida, estabilizadores de tensión, reguladores de velocidad de motores, acondicionadores de línea, interruptores estáticos de transferencia, calidad eléctrica.

1. INTRODUCCIÓN

En el artículo anterior [1] se ha revisado el carácter de la Electrónica

de Potencia y su presente y futuro en las aplicaciones de gran potencia. En este segundo y último artículo se revisan las aplicaciones de potencia media y baja.

2. APLICACIONES DE MEDIA POTENCIA

Entenderemos por aplicaciones de la Electrónica de Potencia en potencia media las que cubren de 1 a 1000 kVA, aproximadamente.

2.1. SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN ININTERRUMPIDA (SAI)

Hoy es posible constatar el alto grado de desarrollo que han alcanzado los sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI) para ordenadores y otras cargas e instalaciones críticas. La potencia de salida va desde 0,5 kVA hasta varios MVA y suele recurrirse a módulos SAI en paralelo para más de unos 500 kVA. Por encima de 50 kVA la salida es trifásica. Entre las ventajas de los SAI está la corrección de cortes, bajadas de tensión [2] y distorsión de la red. Se emplea principalmente el IGBT, o *Isolated Gate Bipolar Transistor*, como interruptor de potencia en los bloques rectificador e inversor (en detrimento del tiristor) con técnicas de conmutación en alta frecuencia que permiten reducir la distorsión de la corriente tomada de red por el rectificador y de la tensión de salida del inversor. En los interruptores estáticos para interconexión de módulos en paralelo y en los conmutadores estáticos a red se siguen empleando tiristores y, en potencias no muy altas, comienzan a utilizarse también IGBT por su facilidad y rapidez de bloqueo. En las baterías para SAI hay pocas novedades. Su autonomía es de 5 a 30 minutos y suelen elegirse de níquel-cadmio (autonomías de 5 a 10 minutos) o de plomo (autonomías de 10 minutos o superiores). En los más de 10 millones de SAI existentes predominan las baterías de plomo ácido en sus variantes estacionarias abiertas (para potencias altas) y modulares de alta densidad estancas sin mantenimiento (para potencias medias y bajas). Hay tendencia a utilizar variantes de plomo puro con mejor descarga rápida, poco mantenimiento y buen desempeño a temperaturas altas. Suele exigirse un tiempo medio entre fallos de 100.000 horas (unos ocho años) en instalaciones de alta responsabilidad.

En cuanto a los esquemas generales de los SAI y su criterio de operación, conviven hoy dos estrategias importantes: una con topología tradicional con rectificador e inversor de la potencia total de salida y otra con topología basada en filtros activos que interaccionan con la red y manejan potencias inferiores a la de salida. Entre departamentos comerciales de los fabricantes se establecen a veces controversias sobre las ventajas e inconvenientes de una y otra familia topológica y estrategia de operación, así como sobre otros aspectos de los SAI y las cargas, en las que el usuario puede resultar confundido por falta de claridad en la definición de las características del SAI. Existen documentos que pueden ayudar a solventar posibles malentendidos [3]. Es recomendable, en instalaciones grandes, que el usuario se familiarice con la constitución y funcionamiento general del sistema que vaya a adquirir y compare alternativas.

Por su parte, es importante que el suministrador posea los conocimientos técnicos y experiencia necesarios y que disponga de medios y personal de mantenimiento cualificado.

En instalaciones que alimentan equipos y servicios importantes se emplea cada vez más la vigilancia a distancia a cargo de los servicios de mantenimiento, que observan el SAI mediante distintos circuitos de monitorización conectados a través de redes de telefonía comerciales por cable o aire. A su vez, desde la central de mantenimiento remota se pueden realizar algunas medidas y maniobras para prevenir averías y, si estas se producen, minimizar sus consecuencias mientras el técnico de reparación llega al equipo.



Fig. 1: SAI trifásico modelo 90-NET, de 250 a 800 kVA, con alto rendimiento y compatible con LIFE net.

Cortesía de CHLORIDE-CENER, Alcobendas, España

2.2. CALDEO POR INDUCCIÓN

El calentamiento por inducción actúa en materiales ferromagnéticos sometiéndolos a una inducción electromagnética variable. La corriente por el inductor de calentamiento genera, por ley de Ampère, un campo magnético H que, a su vez, por ley de Faraday, induce corrientes en la pieza tratada (corrientes de Foucault) y la calientan por efecto Joule, Fig. 2.

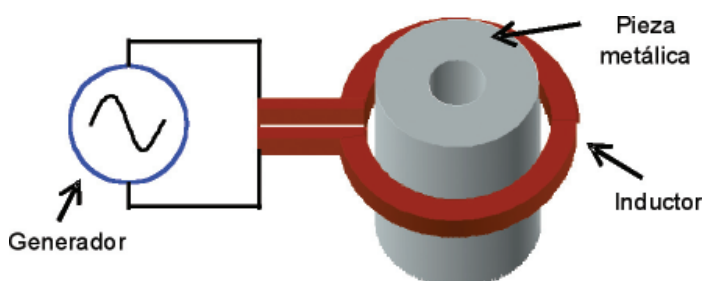


Fig. 2: Principio del calentamiento por inducción

Como la carga del generador electrónico es inductiva, suele compensarse su factor de potencia mediante condensadores en serie o en paralelo con el inductor de calentamiento, dando así lugar a dos topologías habituales en los generadores: los generadores resonantes serie y los paralelo [4].

Los generadores serie se alimentan por tensión y conmutan normalmente a tensión cero (ZVS o *Zero Voltage Switching*) para que el corte de los diodos en antiparalelo sea suave. La regulación de potencia se hace normalmente en el propio inversor, por lo que se alimenta con un rectificador no controlado. Dicha regulación se hace por variación de frecuencia, modulación de densidad de pulsos o mediante un control de ancho de pulso (PWM o *Pulse Width Modulation*).

Los generadores paralelo se alimentan por corriente a través de un choque entre la sección de alimentación y el inversor. Utilizan la inductancia parásita de conexión del oscilador al banco de condensadores como inductancia de conmutación para obtener conmutaciones en conducción suaves. La regulación de potencia no puede hacerse desde el propio inversor y se requiere una fuente de alimentación variable normalmente implementada mediante rectificador totalmente controlado, para altas potencias, o mediante troceador para potencias bajas.

Se utilizan como interruptores tiristores, para potencias de varios MW y frecuencias hasta 3 kHz, IGBT para potencias de hasta 3 MW y frecuencias hasta 150 kHz y MOSFET para potencias del orden de 1 MW o inferior y frecuencias hasta 500 kHz. El nivel de potencia y frecuencia viene determinado por la aplicación y la producción deseada. Cuanto mayor es la frecuencia, menor es el grado de penetración del calor en la pieza. La Fig. 3 ilustra un generador de soldadura de tubo por inducción de 400 kW /400 kHz con fuente e inversor oscilador están separados.



Fig. 3: Generador de 400 kW/400 kHz para soldadura de tubo por inducción. Cortesía de GH Electrotermia, Valencia, España

Ciertas aplicaciones especiales requieren topologías más avanzadas tendientes a incorporar nuevos campos de aplicación y a mejorar las prestaciones. Es el caso de los generadores bi-frecuenciales que excitan al inductor de calentamiento,

secuencialmente o, simultáneamente, con dos frecuencias distintas, una en el rango de media frecuencia (3 a 10 kHz) y la otra en el rango de alta frecuencia (200 a 400 kHz). Se aplican al tratamiento de piezas de superficie irregular como engranajes. La topología de un generador de temple bifrecuencial simultáneo consiste básicamente en dos inversores desacoplados mediante una bobina, tal como puede verse en la Fig. 4.

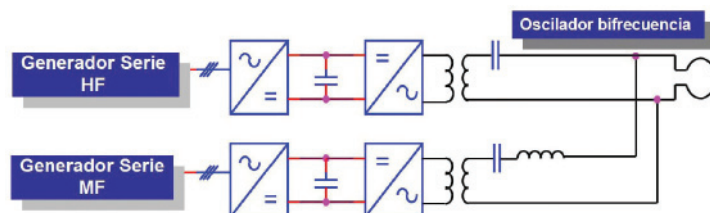


Fig. 4: Diagrama de bloques de un generador de temple por inducción bifrecuencial

La Fig. 5 muestra las dos frecuencias de sintonía del oscilador bifrecuencia, así como la corriente superpuesta que circula por el inductor de calentamiento.

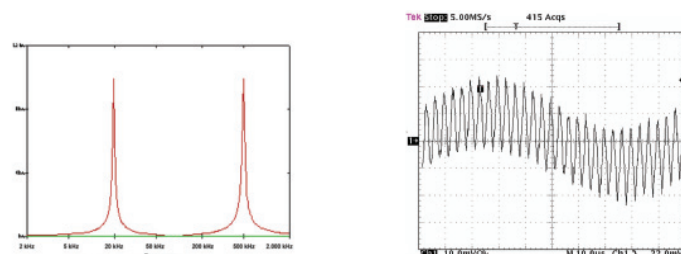


Fig. 5: Respuesta en frecuencia de un oscilador bifrecuencial y corriente por el inductor de calentamiento

Los generadores multi-salida alimentan varios inversores tipo resonante-serie de potencia y frecuencia independiente. Se usan cuando se precisan dos procesos térmicos secuenciales como temple y revenido, o cuando se necesitan varias líneas de tratamiento simultáneas, como en el secado de papel y en el calentamiento de cable.

Los generadores de banda ancha (*wide-band*) operan en un rango de frecuencia amplio, seleccionada por cambio del banco de condensadores para cada aplicación específica, entre 10 y 150 kHz. Son idóneos para tratamientos generalistas que requieren, según la aplicación, un amplio margen de frecuencias para conseguir el perfil de temple deseado.

El circuito de control regula el convertidor y dirige el proceso, pudiendo estar ambas funciones integradas. Hoy se implementa digitalmente mediante Conjuntos de Puertas Programables (FPGA, o *Field Programmable Gate Arrays*) tanto en los bucles rápidos como lentos. Suele disponerse de conexiones (*bus* de señal) para comunicación industriales del tipo *Profinet*, *Interbus*, *Profibus* etc. En ocasiones, cuando se precisa un almacenaje considerable de información y de datos, el proceso se controla desde un computador personal para uso industrial.

Entre las múltiples aplicaciones del caldeo por inducción están las del hogar (por ejemplo, en cocinas de inducción) y de la industria, en sectores tan diversos como los del acero, automóvil, gaseoductos, aerogeneradores, aeronáutica y en la fabricación de tubos, motores eléctricos y semiconductores, entre otros. Se utiliza para la fusión de metales, forja, temple superficial, sellado y soldadura de tubo por inducción. Su uso favorece que el proceso de calentamiento sea rápido, preciso, eficiente y repetitivo, lo cual facilita su automatización a través de máquinas específicas (ver Fig.6).



Fig. 6: Instalación llave en mano para temple de juntas homocinéticas. Cortesía de GH Electrotermia, Valencia, España

2.3. SOLDADURA ELÉCTRICA

La Electrónica de Potencia se utiliza en el control de equipos de soldadura por puntos, arco y láser. En su origen, la soldadura por puntos, que consiste en hacer circular entre dos chapas un impulso de corriente alterna elevado y corto que funde un área pequeña del material, se controlaba con tiratrones. Estos fueron sustituidos más tarde por los tiristores, que exhibían una caída de tensión en conducción más reducida. Pocas novedades importantes se han incorporado desde la aparición de los tiristores, casi todas relacionadas con diversificaciones de las pinzas (móviles, múltiples, por rodillo, etc.) y el mejor control que permiten los modernos circuitos integrados. Los tiristores actualmente disponibles cubren sobradamente en sus distintas variantes (unidireccionales o bidireccionales como TRIAC o *Triode AC semiconductor* y alternistores) las necesidades de la soldadura por puntos. Las potencias transitorias manejadas oscilan entre 1 y 250 to kVA. Para potencias superiores se emplean a veces inversores de media frecuencia realimentados por sensores de la soldadura en tiempo real, que llegan a los 400 kVA [5].

La soldadura eléctrica por arco con electrodo revestido es una de las más extendidas. Casi todos los talleres poseen un equipo de mayor o menor potencia y es muy común encontrarla en la construcción de edificios y de todo tipo

de instalaciones industriales. Consiste en depositar material de un electrodo metálico estableciendo una corriente de alta intensidad y baja tensión entre él y las piezas a soldar. Inicialmente los equipos eran puramente eléctricos, basados en un transformador reductor de tensión con elevada inductancia de dispersión que limita la corriente cuando el electrodo toca la pieza a soldar. La aparición de los tiristores y, más tarde, de los IGBT ha permitido diseñar equipos con flujo de corriente más controlado (disponen de protecciones de sobreintensidad, sobrecalentamiento, sobretensión y



subtensión) para soldadura con electrodo revestido y con gas inerte, tanto en c.c. como en c.a. (alimentados a veces por inversores) que facilitan enormemente el proceso de soldadura y lo hacen menos dependiente de la pericia del soldador. Las potencias manejadas suelen encontrarse entre 15 y 60 kVA [6]. Actualmente se investiga en la mejora del mantenimiento del nivel de corriente óptimo y en la protección general del equipo.

La soldadura por rayo láser es la más precisa, pues permite concentrar alta potencia en pequeñas superficies con un control fino de la potencia y el tiempo. Se emplean también soldaduras híbridas arco más láser que intentan combinar las mejores características de ambos tipos. La Electrónica de Potencia permite realizar fuentes de alimentación del emisor láser que garanticen la precisión y repetitividad del proceso. Basados en IGBT modulados en alta frecuencia, los alimentadores láser proporcionan a la lámpara emisora un elevado impulso de tensión para iniciarla y luego mantienen una adecuada corriente en baja tensión. Las potencias manejadas van desde algunos vatios en medicina y joyería a cientos y miles de vatios en la industria, llegando a potencias muy elevadas en láseres de aplicación militar, fuera ya de la mera soldadura.

2.4. CONVERTIDORES AUXILIARES PARA FERROCARRIL

La principal función de los convertidores auxiliares es proporcionar los niveles de baja tensión —tanto alterna

como continua— necesarios para alimentar los diferentes equipos auxiliares del tren (frenos, acondicionadores de aire, red de iluminación, etc.). Generalmente es necesario aislar galvánicamente las tensiones de salida proporcionadas respecto de la catenaria para equipos alimentados directamente por esta.

Las potencias manejadas por estos equipos varían en función de su aplicación. Para equipos de c.a. las potencias pueden ir desde pocos kVA hasta algunos cientos. Las tensiones de salida suelen ser trifásicas de 220 V a 60 Hz en países anglosajones o de 400 V a 50 Hz en Europa, Fig. 7. Principalmente se emplean puentes inversores trifásicos con modulaciones en alta frecuencia mediante IGBT.

Por su parte, los convertidores generadores de c.c. se emplean para cargar las baterías del tren, así como para alimentar toda su electrónica. Valores típicos de la tensión continua de salida son 24, 38, 72 y 110 V. Las potencias entregadas varían entre algunas unidades y decenas de kW. Estos equipos pueden tener diversas configuraciones y estar realizados en baja frecuencia con tiristores o en alta frecuencia con IGBT. Tanto los convertidores para c.c. como para c.a. se controlan con microprocesadores de diversa complejidad.

Dado que las unidades tractoras y los coches de ferrocarril se diseñan a veces para ser alimentados por distintas tensiones de catenaria (compartiendo incluso alterna y continua), a los convertidores auxiliares se les puede exigir también alimentación múltiple, lo que obliga, para obtener un buen rendimiento eléctrico y de espacio, a verdaderos alardes de topología reconfigurable en su circuito de potencia. Existen convertidores auxiliares de ferrocarril capaces de ser alimentados hasta por cinco tensiones de catenaria de alterna y continua (15.000 V 16 2/3 Hz y 25.000 V 50 Hz, y en c.c., 750, 1500 y 3000 V).

2.5. AUTOMÓVIL

El papel que la electrónica, y, especialmente la Electrónica de Potencia, jugará en los años futuros en el sector industrial del automóvil se anuncia fundamental. Para el 2012 se prevé que el 40% del coste de un vehículo provenga de la electrónica, cifra que se alcanzará gracias a varios factores: la búsqueda de nuevas fuentes de energía, la disminución del consumo y el aumento del confort y la seguridad en el vehículo.

Como primer factor, la búsqueda de energías alternativas a los combustibles fósiles contribuirá al cambio drástico esperado en la concepción del automóvil del futuro cercano, a través del desarrollo del coche eléctrico y del coche propulsado por pila de combustible. En la arquitectura del sistema de tracción de un coche eléctrico puro (ilustrada en la Fig.8), la Electrónica de Potencia se encarga de la gestión del flujo de energía entre la fuente de alimentación (banco de baterías más banco de supercondensadores) y el motor de tracción, mediante convertidores de continua (adaptación de niveles de tensión) e inversores (alimentación de los motores eléctricos de c.a.) [7].

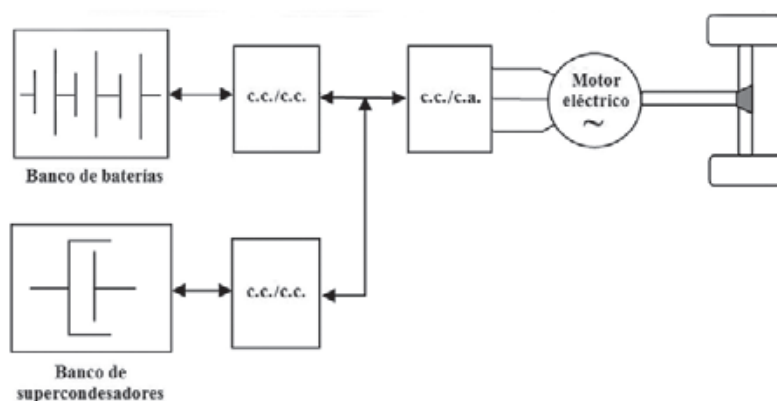


Fig. 8: Arquitectura del sistema de tracción de un coche eléctrico

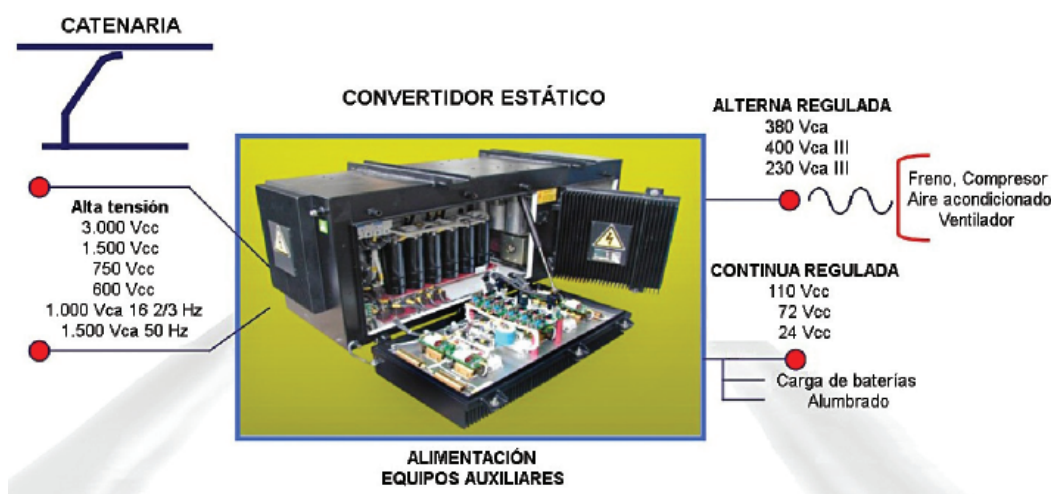


Fig. 7: Convertidor auxiliar de ferrocarril. Tensiones de entrada y salida. Cortesía de SEPSA, Pinto, Madrid

El banco de baterías suministra la potencia media del sistema y los supercondensadores, los transitorios. Dicho sistema es reversible para aprovechar la energía de frenado. En lo que se refiere al segundo sistema, la pila de combustible es la encargada de suministrar la potencia media y actúa en paralelo, bien con un sistema de

supercondensadores, bien con una batería o incluso con un sistema mixto (supercondensador más batería).

Los sistemas anteriores se encuentran todavía en fase de estudio, pues su viabilidad económica no está aún demostrada. En la actualidad, los constructores se centran en el desarrollo de vehículos híbridos, Fig. 9, que poseen un motor de combustión de menor potencia y consumo que los convencionales, operando en paralelo con el sistema eléctrico antes descrito.

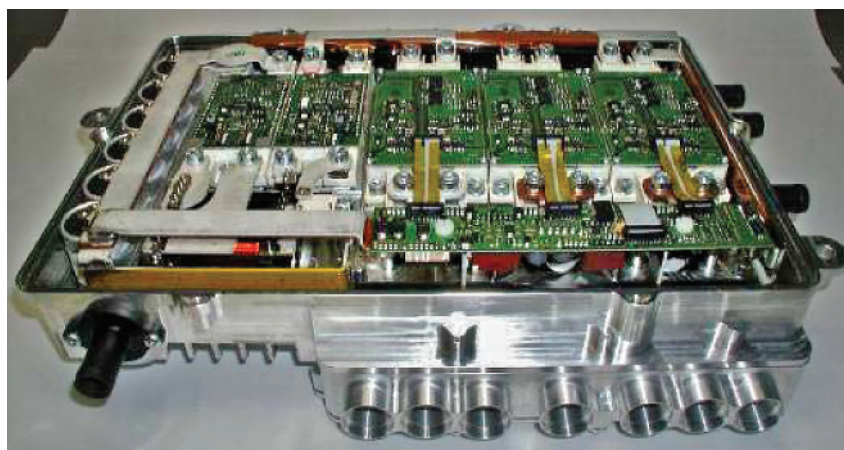


Fig. 9: Convertidor electrónico de potencia refrigerado por agua para vehículo híbrido (full hybrid drive system). Cortesía de Siemens[8]

Además de contribuir al desarrollo de sistemas de tracción más eficientes y ecológicos, la Electrónica de Potencia también se usa hoy para reemplazar los sistemas hidráulicos y electromecánicos del automóvil (siguiendo esta misma estrategia iniciada antes en las aeronaves, véase 2.7), permitiendo así no solo la reducción del consumo en la carga final (gracias a la activación bajo demanda, no permanente), sino también un control óptimo de dichas cargas, con el correspondiente aumento del confort y seguridad. Los ejemplos de dichas aplicaciones son muy variados y entre otros podemos citar: el control de motores de corriente continua (para ventiladores de climatización, elevallas, puertas, asientos...) mediante convertidores c.c./c.c. (balastos lineales o convertidores con control PWM más eficientes para motores de continua); el control de motores sin escobillas, o *brushless*, mediante inversores para las mismas aplicaciones; el control del conjunto formado por un actuador electromecánico o electromagnético y un motor *brushless* (compresor eléctrico, sistema de válvulas en lugar del árbol de

levas, frenado eléctrico, sistemas de dirección eléctrica pura, de amortiguación eléctrica ...) y la sustitución de lámparas incandescentes y halógenas por lámparas de Xenón y LED, más eficientes. Para aquellas se utilizan balastos electrónicos constituidos por un convertidor elevador (con tensiones de salida del orden de 1 kV) y un inversor para convertir la tensión c.c. en PWM, y para los LED se utilizan reguladores de corriente, preferentemente reguladores conmutados para maximizar la eficiencia del conjunto.

Todo lo anterior conlleva el aumento de la demanda de potencia eléctrica, lo que necesita del desarrollo de nuevas arquitecturas eléctricas en el vehículo. El sistema actual, compuesto por una batería de 12 V y un alternador, será reemplazado por un sistema similar al de la Fig. 10, constituido por unas barras (*bus* de alimentación o *bus* de potencia) de alta tensión para la alimentación de las cargas de alta potencia y unas barras de baja tensión para la alimentación de cargas convencionales de baja potencia.

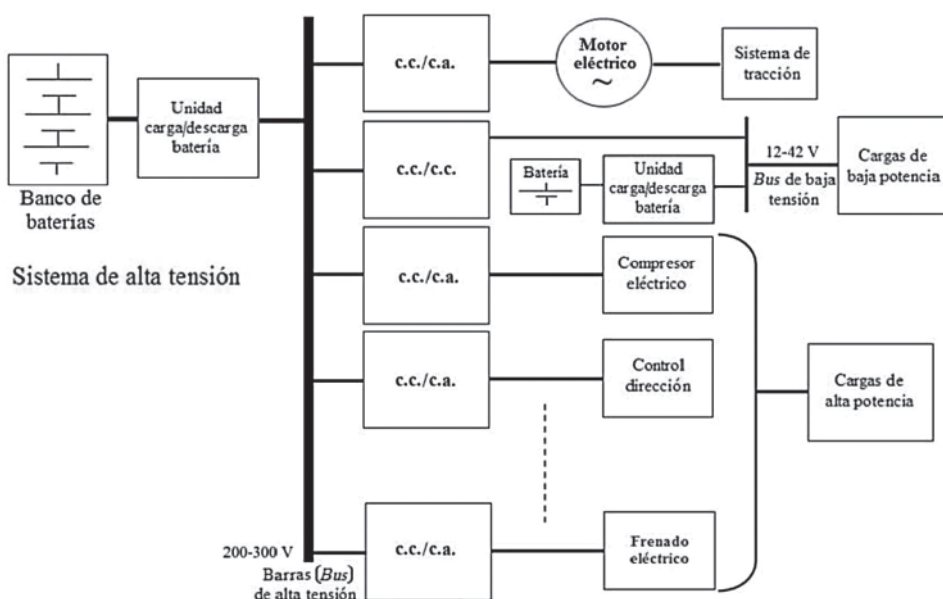


Fig. 10: Esquema de bloques de un automóvil eléctrico con empleo masivo de controladores electrónicos

En las versiones comerciales de coche híbrido, la tensión de las barras de alta tensión se encuentra entre los 200 y 300 V, mientras que el sistema de tracción, después del convertidor

de continua, trabaja con tensiones comprendidas entre 500 y 650 V (Toyota Prius y Toyota RX400h) [9]. Las barras de baja tensión actuales son de 12 V. Debido al incremento del número de cargas y con el fin de aumentar la eficiencia del sistema, se están investigando alternativas a mayor tensión, como la de 42 V.

Los convertidores de potencia no solo se encargan de realizar la adaptación de niveles de tensión, sino también de la transmisión de energía, bien en c.c. o en c.a. El componente activo de potencia más usado en dichos convertidores es el MOSFET. Para las aplicaciones de tracción, a tensiones elevadas, se utilizan IGBT.

2.6. CONTROL DE MOTORES ELÉCTRICOS MEDIANOS Y PEQUEÑOS

Además de estar presente en el control de grandes motores industriales (véase el apartado 6.3 del artículo precedente), la Electrónica de Potencia también figura, en potencias pequeñas y medianas (10 VA a 100 kVA), en el control de motores eléctricos de los más variados sistemas y dispositivos utilizados en la industria, la construcción de edificios, los laboratorios y los hogares. Se estima que en los países desarrollados en torno al 60% de la energía eléctrica que se consume se utiliza en el control de motores eléctricos [10] presentes en aplicaciones tan diversas como la ventilación, los ascensores, las motobombas y los más diversos electrodomésticos. Cada vez resulta más difícil no encontrar un pequeño motor eléctrico en aspiradoras, lavadoras, neveras, afeitadoras..., incluso un lector de DVD cuenta con el motor de rotación del disco y el motor de inserción-extracción.

Casi todos los motores eléctricos mencionados son de c.a. y en las potencias más pequeñas se encuentran motores de c.c. En ambos casos su control puede reducirse a la simple puesta en marcha y parada directa o por pasos intermedios, o puede implicar la variación de velocidad en mayor o menor rango. En los motores grandes de c.a. es habitual disponer de arrancadores estrella-triángulo que reducen la punta de intensidad. Muchos de estos arrancadores, inicialmente hechos mediante contactores, se realizan hoy con tiristores y en algunos casos mejoran el resultado recortando temporalmente la tensión de red.

El control completo de la velocidad de los motores eléctricos de c.a., tanto síncronos como asíncronos (la mayoría), se realiza actualmente mediante inversores con IGBT que aplican al motor, por control de ancho de impulso, una tensión alterna regulada en frecuencia y tensión, Fig. 11. A su vez, este inversor se alimenta de la red eléctrica a través de un rectificador. Para potencias por encima de algunos kilovatios, la rectificación se realiza en alta frecuencia para corregir la distorsión y fase de la corriente tomada de la red. El control limitado de velocidad de motores eléctricos de c.a. pequeños se realiza a veces mediante recortadores de tensión con tiristores que aumentan el deslizamiento.



Fig. 11: Bomba de circulación para calefacción movida por motor eléctrico regulado en velocidad electrónicamente. Cortesía de Grundfos.

2.7. AERONÁUTICA

Las aeronaves disponen de diversos convertidores electrónicos de potencia para, entre otras tareas, iluminar el panel de instrumentos de vuelo (*cockpit converters*, de 30 a 400 W), regular su iluminación (*dimming regulators*) y proporcionar corriente alterna de 50, 60 o 400 Hz y 115 o 230 V a distintas cargas (*avionic inverters*, de 20 a 50.000 VA), todo ello a partir de baterías de 14, 28 o 48 V. La mayor parte de los convertidores e inversores empleados se realizan en etapa única con MOSFET para aprovechar su baja tensión de conducción. En los inversores de mayor potencia existe, no obstante, la tendencia a emplear un convertidor c.c./c.c. previo con MOSFET conmutado a muy alta frecuencia, que eleva la tensión de batería, seguido de un inversor con modulación de ancho de impulso y filtro que puede estar realizado con IGBT, dado que su caída de tensión en conducción es ahora relativamente menor. Téngase en cuenta que la gama de tensiones y corrientes de los IGBT crece continuamente y supera la de los MOSFET. La exploración de topologías está guiada en convertidores para aeronáutica sobre todo por la reducción de tamaño y peso. Puede verse un ejemplo de exploración topológica de inversores de 1 kVA y 400 Hz de salida siguiendo el método expuesto en 5.3 de [1] en [11].

La Electrónica de Potencia está también presente en alimentadores de lámparas de cabina, luces exteriores estroboscópicas, actuadores electromecánicos y motores eléctricos. Desde hace décadas se tiende a construir aeronaves comandadas por dispositivos electromecánicos (*fly-by-wire*) y no tanto mecánicos e hidráulicos, ya que aportan mayor versatilidad, reducen el peso de los conductos de comando y favorecen el control centralizado por computador. Ello aumenta, sobre todo en aeronaves grandes, la necesidad de alimentadores electrónicos de potencia.

Como todos los equipos embarcados, estos convertidores deben pasar pruebas muy rigurosas de vibración y compatibilidad electromagnética, por lo que la mecánica y la fiabilidad son aspectos del diseño fundamentales. Otra parte notable del diseño, característico en la industria aeronáutica, son los bancos de prueba y los manuales de instalación y mantenimiento de todos los equipos embarcados, entre ellos los convertidores electrónicos de potencia, obras verdaderamente prolifas que consumen muchas horas a los diseñadores.

3. APLICACIONES DE PEQUEÑA POTENCIA

Entenderemos por aplicaciones de la Electrónica de Potencia en pequeña potencia las inferiores a 1 kVA, aproximadamente.

3.1. ELECTRODOMÉSTICOS

Además de controlar pequeños motores, la Electrónica de Potencia está presente en muchos aparatos electrodomésticos: controla la temperatura de cocinas, hornos y calefacciones eléctricas, regula la iluminación con lámparas incandescentes o abre y cierra las electroválvulas de las lavadoras, en otras funciones. En la mayor parte de los casos el control y la regulación se hacen mediante tiristores en modo de funcionamiento todo-nada (electroválvulas) y en recorte de fase (calentamiento mediante resistencias y regulación de lámparas incandescentes). Cada vez se tiende más a disponer de circuitos integrados específicos para el control de las distintas funciones, lo que facilita el diseño y la fabricación del equipo final.

3.2. INGENIOS ESPACIALES

La aplicación de la Electrónica de Potencia a los ingenios espaciales se extiende a la práctica totalidad de equipos de abordo, desde los reguladores de los subsistema de potencia hasta los convertidores c.c./c.c. pasando por los controladores de motores, los amplificadores de tubos de onda progresiva y las fuentes para propulsión eléctrica. Por limitaciones de extensión, aquí nos centraremos en lo que se hace en el presente y se realizará en el futuro inmediato en los subsistemas de potencia. Visiones a más largo plazo o más genéricas pueden encontrarse respectivamente en [12] y [13].



Fig. 12: Unidad de control y distribución de potencia del satélite GOCE, ESA, realizada en Crisa, España

El objetivo principal de los subsistemas de potencia de los satélites es suministrar energía eléctrica a todos los equipos durante todas las fases de la misión para la que son diseñados, todo ello con la menor masa y la mayor eficiencia posibles. Sin embargo, puede ocurrir que, en función de las particularidades de un determinado tipo de misión (telecomunicaciones, interplanetarias, satélites de órbita baja...), primen otros objetivos, tales como la reducción del coste de producción o la tolerancia a radiación, entre otros, Fig. 12.

Para satélites geoestacionarios de telecomunicaciones, el concepto de un subsistema totalmente regulado, capaz de distribuir una tensión continua de 50 o 100 V (dependiendo de la potencia del satélite) con una tolerancia del $\pm 2\%$, se ha consolidado y no se espera que cambie a medio plazo. Sin embargo, el alto coste de los paneles solares, su largo tiempo de suministro y, sobre todo, su creciente capacidad parásita puede hacer cambiar el concepto de regulación del panel solar. Si ahora dicha regulación se realiza mediante S3R (*Sequential Switching Shunt Regulators*), en un futuro no muy lejano esta estrategia puede dar paso a MPPT (*Maximum Power Point Trackers*) controlando convertidores elevadores/reductores, lo cual permitiría la estandarización de los paneles con independencia de la potencia del satélite.

En los satélites de órbita baja se ha consolidado en los últimos años el uso de las barras de batería, generalmente con tensiones continuas en el rango de 24 a 36 V, así como el progresivo crecimiento de los MPPT en detrimento de los sistemas de regulación del panel solar mediante técnicas de transferencia directa de energía (por ejemplo, S2R, S3R, S4R), lo cual permite una mejor utilización del panel solar. En este caso, la consolidación de algoritmos digitales y la segregación de los reguladores de panel solar parecen deseables a la hora de ofrecer un producto flexible, y por tanto con bajo coste de desarrollo, en la adaptación de una misión a otra.

Por último, en las misiones interplanetarias (por ejemplo, Rosetta, Mars Express, Venus Express, BepiColombo...) se ha consolidado el uso de barras de alimentación reguladas con MPPT que requieren una capacidad de seguimiento del punto de máxima potencia mayor a la que los algoritmos digitales ofrecen y, por tanto, este se realiza con algoritmos analógicos. En cuanto a la regulación para los MPPT en satélites de órbita baja y de misiones interplanetarias, los diseños basados en convertidores reductores ya han alcanzado un adecuado estado de madurez, mientras que los basados en convertidores elevadores aún tienen margen para su mejora, especialmente en lo que se refiere a su respuesta dinámica.

3.3. FUENTES DE ALIMENTACIÓN DE C.C.

Las fuentes de alimentación de corriente continua más habituales manejan potencias entre decenas y alguna centena de vatios para suministrar tensiones de salida constantes de algunos voltios [14] [15]. Las topologías más usadas son las tradicionales con aislamiento, el método de conmutación de los interruptores se basa en la modulación de ancho de pulso y la regulación es analógica. Las frecuencias de conmutación de los interruptores típicas van de 100 a 500 kHz siendo el

MOSFET el interruptor por excelencia por su baja caída de tensión en conducción. Las topologías resonantes se emplean solo en situaciones muy concretas, por ejemplo aquellas donde se parte de algún tipo de acoplamiento magnético muy deficiente, como sucede en ciertas aplicaciones médicas. En las fuentes alimentadas desde corriente alterna la normativa sobre compatibilidad electromagnética ha obligado a prestar especial atención a la corrección del factor de potencia de la corriente tomada de la red, llevada a cabo generalmente mediante una topología elevadora.

Debido a que los circuitos digitales requieren tensiones de alimentación cada vez más reducidas para aumentar sus prestaciones y su velocidad, los sistemas de alimentación de 5 V tienden a quedar obsoletos y a ser sustituidos por sistemas a 3,3 V, 1 V e incluso menos. Esto supone que las corrientes solicitadas sean cada vez mayores en las fuentes destinadas a la alimentación de sistemas digitales, lo que, además de condicionar las topologías, estimula el avance tanto de los semiconductores como del control, puesto que las corrientes elevadas son más difíciles de controlar. Así, la evolución en la mejora de las características de los MOSFET en quince años ha sido muy notable. Por ejemplo, la resistencia en conducción ha disminuido del orden de 10 veces.



Fig. 13: Prototipo de fuente de alimentación de 208 W y 6 salidas para ordenador, que opera también como SAI de c.c. con 7 min. de autonomía en ausencia de red [16].

Cortesía del Grupo de Sistemas Electrónicos de Alimentación de la Universidad de Oviedo.

En términos generales, las topologías más establecidas hoy seguirán siendo las dominantes en los próximos años aunque cabe esperar una mayor presencia de las topologías resonantes. Si bien en el pasado la evolución de las fuentes de alimentación ha venido de la mano, fundamentalmente, del desarrollo de los semiconductores y de las topologías, en el presente y futuro cobran cada vez más importancia los aspectos relacionados con el encapsulado, la refrigeración y la integración de componentes y subsistemas. Por ejemplo, una tendencia creciente es la modularización de los diversos subsistemas de las fuentes de alimentación, de forma que se pueda diseñar el conjunto de la fuente a partir de diversos bloques sin necesidad de un conocimiento profundo de las características internas de cada

uno de ellos. Otra posibilidad presente en la estructura de las fuentes desde la aparición de los SAI c.a./c.a. para ordenadores es la integración de una batería de emergencia que asegura la alimentación en caso de fallo de red a través de los convertidores c.c./c.c., Fig. 13, una solución mucho más razonable que aquella y posiblemente ignorada desde un principio por intereses de las grandes compañías de ordenadores. De forma intermitente estas topologías [16] son estudiadas sin que acaben por imponerse.

3.4. BALASTOS PARA ILUMINACIÓN

Los sistemas de iluminación están cada vez más condicionados por la eficiencia energética debido a que alrededor de un 20% de la energía eléctrica mundial se utiliza para iluminación. Por este motivo, la eficacia luminosa (relación entre el flujo luminoso emitido y la energía eléctrica consumida) de la fuente de luz es uno de los parámetros de selección más importantes de la lámpara, así como la duración y la calidad de reproducción cromática de los colores que propicia.

La eficacia luminosa de las lámparas incandescentes y halógenas es reducida, de alrededor de 15 lm/W, por lo que están en desuso. Además de las lámparas fluorescentes en barra, las fluorescentes compactas son una buena alternativa debido a que presentan eficacias luminosas del orden de 60 lm/W con buena reproducción cromática y duración de 10.000 horas. El balasto está básicamente compuesto por un convertidor c.a./c.a. resonante, con MOSFET como interruptor, que incluye una etapa discreta o funcional para la corrección del factor de potencia presentado a la red.

Entre las lámparas de alta intensidad de descarga, las de vapor de sodio de alta y de baja presión presentan eficacias luminosas de 100, 120 y 180 lm/W, respectivamente, con duraciones en torno a 18.000 horas, pero con una reproducción cromática un tanto deficiente, sobre todo en el caso de las segundas. Son las más utilizadas en alumbrado público, especialmente las de alta presión. Las lámparas de descarga de mayor crecimiento actual son las de halogenuros metálicos debido a su elevada eficacia luminosa (80 a 100 lm/W) y a su buena reproducción cromática. Se utilizan para la iluminación de centros deportivos, comercios, edificios y zonas públicas. El balasto para las lámparas de alta intensidad de descarga es generalmente electromagnético. El balasto electrónico aún no se utiliza de forma habitual.

En la última década, la fuente de luz con mayor evolución ha sido el LED (*Light Emitting Diode*). Su duración es superior a las 50.000 horas y se consiguen eficacias luminosas crecientes. En la actualidad se comercializan LED de luz blanca con eficacias entre 50 y 100 lm/W (y expectativas a medio plazo de 150 lm/W) con buena reproducción cromática y en proceso de mejora, lo que los convierte en la fuente de luz de referencia para el futuro. Gracias a sus ventajas incontestables, los LED se han impuesto rápidamente como sustitutos de lámparas incandescentes filtradas para obtener un color determinado, como en el automóvil o la señalización semafórica. El balasto está compuesto por un convertidor de salida c.c. realizado con MOSFET, gobernado con

modulación de ancho de pulso y realimentado en corriente para regular el flujo luminoso, además de la correspondiente etapa de corrección de factor de potencia cuando se alimenta desde la red eléctrica, Fig. 14, [17] [18].

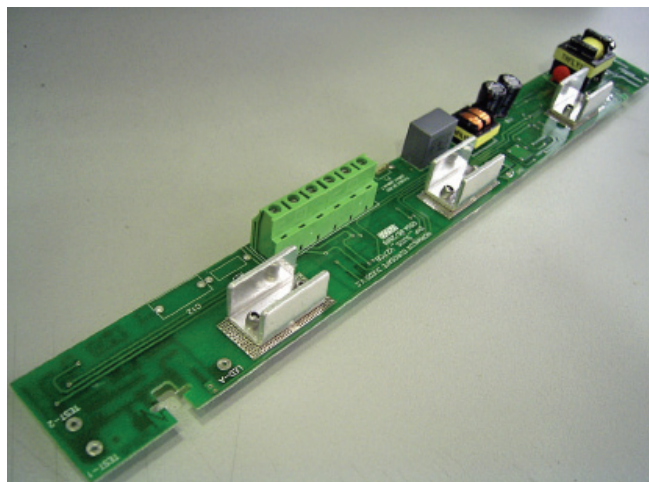


Fig. 14: Equipo de iluminación de emergencia con LED de la firma Normalux tipo Eurosafe 3LED Vo.2. Monta LED tipo XRE WHT-L1 de CREE con 50.000 horas de vida. Cortesía del Grupo de Conversión Eficiente de Energía, Electrónica Industrial e Iluminación de la UO y de NormaLux, Asturias.

3.5. ALIMENTACIÓN DE ORDENADORES PORTÁTILES, CÁMARAS FOTOGRÁFICAS Y TELÉFONOS MÓVILES

El uso de los aparatos personales para informática (ordenadores portátiles, PDA), captura de imágenes (cámaras de foto fija y de vídeo) y comunicaciones (teléfonos móviles) se ha extendido extraordinariamente en el último lustro. Sus circuitos electrónicos funcionan con tensiones continuas de pocos voltios y se alimentan de una batería única. La Electrónica de Potencia está presente en ellos en la adaptación de la tensión de batería a los niveles de c.c. que necesitan los distintos circuitos (procesadores, pantallas, sensores, flashes, etc.). Se emplean convertidores c.c./c.c. de potencias entre 1 y 50 VA conmutados a frecuencias superiores a 100 kHz para reducir el tamaño y peso de los transformadores y bobinas, prescripción prioritaria en estas aplicaciones. Los convertidores pueden estar montados en placas específicas, Fig. 15, o compartidas con otros circuitos. La tendencia es a elevar la frecuencia de conmutación a medida que se dispone de diodos e interruptores más rápidos, en casi todos los casos diodos Schottky y MOSFET.

3.6. ALIMENTACIÓN DE APARATOS PERSONALES DE ELECTROMEDICINA

Los aparatos de electromedicina muy pequeños para uso personal (audífonos, marcapasos, etc) y para exploración médica (sondas diversas) pueden exigir cierto tratamiento electrónico de la energía eléctrica que los alimenta. Ello se realiza mediante convertidores c.c./c.c. de muy alta frecuencia

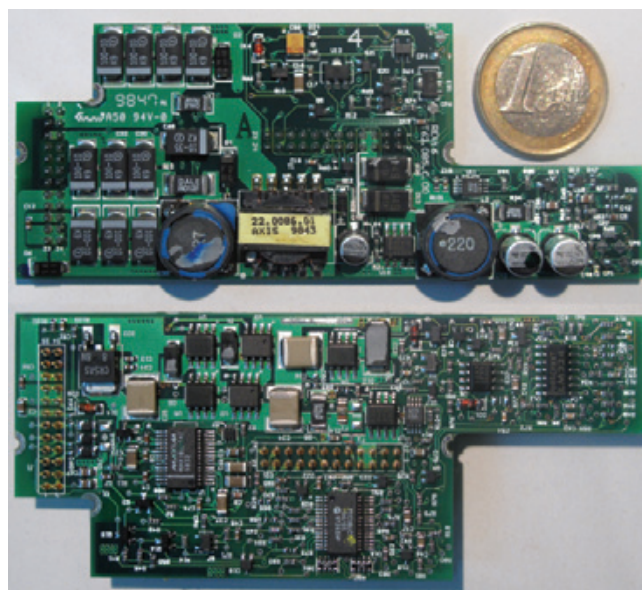


Fig. 15: Fuente de alimentación mediante convertidor c.c./c.c. conmutado con MOSFET para el ordenador portátil ACER Travel Mate 721 TX. Superior: Componentes de potencia. Inferior: Componentes de control y condensadores. Fotos de J. A. Barba, DIEEC, ETSII, UNED.

con FET en los que lo prioritario es la reducción de tamaño y, cuando la alimentación es por pila, el rendimiento. Se investiga en la fabricación de diodos y transistores con caída de tensión más reducida.

3.7. EL RETO DE LA NANOTECNOLOGÍA

La tendencia hacia circuitos pequeños, vista en los dos últimos apartados, llega a su extremo con el reciente desarrollo de dispositivos quasi-microscópicos para las más diversas aplicaciones. Aunque la llamada *nanotecnología* avanza hoy sobre todo por lo mecánico, es previsible que en el futuro próximo su desarrollo se amplíe a lo eléctrico y lo electrónico y, dentro de este ámbito, la Electrónica de Potencia tendrá que afinar su capacidad de tratar eficientemente la energía en potencias y tamaños minúsculos. En estos convertidores muy pequeños es conveniente simplificar el control y reducir su tamaño al máximo, pues un control complejo puede adquirir un tamaño mayor que el propio circuito de potencia. Recientemente se investiga en la aplicación de circuitos integrados digitales de alto nivel para replicar circuitos analógicos sin condensadores ni otros componentes voluminosos [19].

4. CONCLUSIONES

También en el rango de potencia entre 1.000 kVA y décimas de vatio la Electrónica de Potencia sigue extendiendo sus aplicaciones. En su extremo inferior asistimos al desarrollo de técnicas de reducción de peso y volumen implementadas alrededor del empleo de frecuencias de conmutación

crecientes, que superan a veces el MHz [20]. También es importante en estos rangos muy bajos las nuevas técnicas de miniaturización de transformadores y bobinas y el desarrollo de semiconductores de potencia con bajas caídas de tensión en conducción. La ya mencionada reducción espectacular de resistencia de conducción de los MOSFET ha ayudado enormemente a mantener rendimientos adecuados en estos casos.

Como en la primera parte de esta recensión, reservada a los aspectos generales y a las aplicaciones de gran potencia, en esta segunda y última también se ha incidido preferentemente en los aspectos técnicos concretos de cada campo, apoyándose en lo posible en autores que las conocen directamente. Nuevamente agradecemos a C. Piedehierro la corrección y unificación de estilo de las aportaciones individuales.

5. ANEXO: TABLA DE DENOMINACIONES Y ACRÓNIMOS

Se reúnen las denominaciones y acrónimos aparecidos a lo largo de este segundo artículo junto con los del primero.

Acrónimo	Denominación
c.a.	Corriente alterna
c.c.	Corriente continua
CCAT	Corriente Continua en Alta Tensión
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (semiconductor de óxido-metal complementario)
DFIG	Doubly Fed Induction Generator (generador de inducción de doble alimentación)
DSC	Digital Signal Controller (controlador digital de señal)
DSP	Digital Signal Processor (procesador digital de señal)
FACTS	Flexible AC Transmission Systems (sistemas de transmisión flexible de c.a.)
FET	Field Effect Transistor (transistor de efecto de campo)
FPGA	Field Programmable Gate Array (conjunto de puertas programables, preferiblemente a la traducción de la tabla del artículo I)
HVDC	High Voltage DC transmission (transmisión de c.c. en alta tensión)
IG	Induction Generator (generador de inducción)

IGBT	Isolated Gate Bipolar Transistor (transistor bipolar con puerta aislada)
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor (tiristor conmutado con puerta integrada)
IPFC	Interline Power Flow Controller (controlador interlineal de flujo de potencia)
IPM	Intelligent Power Modules (módulos de potencia inteligentes)
GTO	Gate Turn-Off switch (interruptor con apagado por puerta)
LCI	Load Commutated Inverter (inversor conmutado por la carga)
LED	Light Emitting Diode (diodo emisor de luz)
LVDS	Low Voltage Differential Signal (señal diferencial de baja tensión)
MOSFET	Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor (transistor de efecto de campo de semiconductor óxido-metal)
MPPT	Maximum Power Point Tracker (rastreador de puntos de máxima potencia)
PLD	Programmable Logic Device (dispositivo lógico programable)
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator (generador síncrono de imanes permanentes)
PWM	Pulse Width Modulation (modulación por ancho de pulso)
S3R	Sequential Switching Shunt Regulator (regulador paralelo de conmutación secuencial)
SAI	Sistema de Alimentación Ininterrumpida
SAG	Semi-Autogenous Grinding (molino semi-autógeno)
SCR	Silicon Controlled Rectifier (rectificador controlado de silicio)
SG	Synchronous Generator (generador síncrono)
SSSC	Static Synchronous Series Compensator (compensador serie síncrono)
STATCOM	STATic synchronous COMPensator (compensador síncrono)
STS	Static Transfer Switch (conmutador de transferencia de línea)
SVC	Static Var Compensator (compensador de reactiva)

TCSC	Thyristor-Controlled Series Capacitor (condensador en serie controlado por tiristor)
TRIAC	Triode AC semiconductor (semiconductor triodo de c.a.)
TTL	Transistor-Transistor Logic (lógica transistor-transistor)
UPFC	Unified Power Flow Controller (controlador unificado de flujo de potencia, o acondicionador universal)
ZVS	Zero Voltage Switching (conmutación a tensión cero)

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martínez S, Dede EJ, Campo JC, Braley P, Rueda P, Monteso S, Cagigal C, Vela R. Presente y futuro de la Electrónica de Potencia (I). Introducción y aplicaciones de gran potencia, DYNA Ingeniería e Industria. Mayo 2010. Vol 85-4 p.315/330
- [2] Heydt GT, Ayyanar R, Thallman R. Power acceptability, IEEE Power Engineering Review, p. 12-15, Sept. 2001.
- [3] Personal técnico CENER, Tipos de SAI (Sistemas de Alimentación Ininterrumpida) estáticos. Definición y equívocos usuales, Informe técnico-comercial CENER, Madrid, 2002, hoy CHLORIDE-CENER.
- [4] Dede EJ. State of the Art in Power Converter Systems for Industrial Induction Heating Applications, Invited paper in PCIM- China, Shanghai, June, 2009.
- [5] <http://www.seedorffwelders.com/> (6/may/2010)
- [6] <http://morrowsl.en.ec21.com/> (6/may/2010)
- [7] Emadi A, Williamson SS, Khaligh A. Power Electronics Intensive Solutions for Advanced Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicular Power Systems, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 21, nº 3, p. 730-740, May 2006.
- [8] Matsumoto S. Advancement of hybrid vehicle technology, European Conference on Power Electronics and Applications, p. 1-7, Sept., 11-14, 2005.
- [9] Renken F, Wolf J. Power Electronics for Hybrid-Drive Systems, Power Electronics and Applications, EPE 2007, Aalborg, Denmark, p. 1-10.
- [10] Van Wyk JD. Power Electronic Converter for Motion Control, Proc. of the IEEE, vol. 82, nº 8, Aug. 1994.
- [11] Gualda, J., Martínez, S., Inversores con transistores. Distintas soluciones, Mundo Electrónico, nº 86, junio 1997.
- [12] Signorini C, Blancquaert T, Dudley G, Gerlach L, Schautz M, Simoni E, Tonicelloet F. Power and Energy Conversion Technology: ESA R&D Roadmap and Applications, Proceedings of the 8th European Space Power Conference (ESPC), Konstanz, 14-19 Sept. 2008.
- [13] Rueda P. Aplicaciones espaciales de la Electrónica de Potencia: Conceptos básicos y retos, Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (Saei'09), UC3M, Leganés, julio 2009.
- [14] Jovanovic MM. Power Supply Technology – Past, Present and Future, Power Conversion and Intelligent Motion China Conf. for Power Electronics (PCIM China) Proc., Shanghai, China, March 21-23, p. 3-15, 2007
- [15] Fernández A, Sebastián J, Hernando MM, Martín-Ramos JA, Corral J., Multiple Output AC/DC Converter With an Internal DC UPS, IEEE trans. on Industrial Electronics, vol 53, nº1, p. 296-304, Feb. 2006.
- [16] Fernández A, Sebastián J, Villegas P, Hernando MM, Lama DG. Dynamic Limits of a Power-Factor Preregulator, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, nº 1, feb. 2005, p. 77-87.
- [17] Cardesín J, Ribas J, García-García J, Rico-Secades M, Calleja AJ, López E, Dalla MA. LED Permanent Emergency Lighting System Based on a Single Magnetic Component, IEEE PESC, June 5-19, 2008, p. 418 – 423, DOI 10.1109/PESC.2008.4591965
- [18] Calleja AJ, Rico-Secades M, Cardesín J, Ribas J, Corominas EL, Alonso JM, García J.E. Evaluation of a high efficiency boost stage to supply a permanent LED emergency lighting system, IEEE IAS Annual Meeting, Oct. 3-7 2004, vol.2, p. 1390-1395.
- [19] Vela N De J. Nuevo sistema de amplificación y conversión de señales analógicas de bajo nivel basado en circuitos de conmutación, Tesis doctoral dirigida por J. M. Ferrero Corral y J. M. Ferrero Loma-Osorio, UPV, noviembre, 2008.
- [20] Matzberger M. Convertidor bifásico de 4,5 MHz para equipos portátiles, Mundo Electrónico, nº 407, p. 42-46, abril 2009.