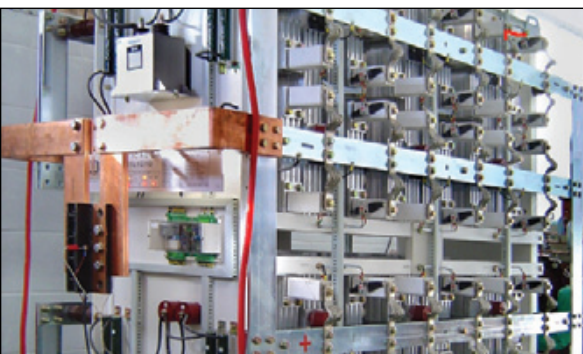


Presente y futuro de la electrónica de potencia (I). Introducción y aplicaciones de gran potencia



ABSTRACT

• Power Electronics has been gaining relevance in countless fields throughout industry, defence, transport, public buildings, communications, computing, home automation and electro-medical equipment. Although usually unnoticed, due to its subsidiary role of supplying energy to electrical equipment and systems, its applications and implantation are continuously growing. 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 personal electro-medical devices. Its multidisciplinary character and universality makes of power electronics a technological synergic vortex where semiconductor physics, electrical engineering, thermal management, control theory, industry communications, transport and most industrial disciplines are brought together. This paper, first of two, covers general aspects of Power Electronics and its applications in the high power range.

• **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 ELECTROTERMINA 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", d 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 VALEO 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 (I). Introduction and high-power applications

RESUMEN

La Electrónica de Potencia ha ido ganando aplicación en innumerables ámbitos de la industria, la guerra, el transporte, los edificios públicos, los equipos de comunicación, la informática, la domótica y la electromedicina. Al cumplir normalmente el papel subsidiario de alimentar un equipo o una instalación, suele pasar desapercibida, pero lo cierto es que sus campos y su grado de implantación en ellos crecen incesantemente. El rango de potencia que cubre es también enorme, pues va 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 personales de electromedicina. Su carácter multidisciplinaria y el papel omnipresente (por ser subsidiario) de alimentación la convierte conceptualmente en un importante vórtice sinérgico donde confluyen la física de semiconductores, la electrotecnia, la termotecnia, la automática, las comunicaciones industriales, el transporte y casi todos los procesos industriales. Este artículo, primero de dos, revisa los aspectos generales y las aplicaciones de gran potencia.

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. CONCEPTO

La *Electrónica de Potencia* modifica, regula o convierte los distintos modos de uso de la energía eléctrica (corriente continua de distintas tensiones y corriente alterna de distintas tensiones y frecuencias) mediante dispositivos electrónicos, semiconductores casi siempre y, a veces, válvulas de vacío y de gas. Si bien el cometido regulador puede coincidir con el de algunos equipos electromecánicos (por ejemplo los reguladores de tensión alterna para baja tensión mediante transformadores con tomas seleccionadas mecánicamente), los componentes activos empleados para esa regulación son electrónicos (así, en los reguladores de tensión del ejemplo anterior, las versiones electrónicas emplean tiristores o transistores en lugar de interruptores mecánicos). Las funciones y potencias abarcadas por los convertidores electrónicos de potencia dependen de sus topologías y de los componentes electrónicos activos disponibles para implementarlas. A veces, determinadas topologías para resolver una determinada función se han inventado antes de que se dispusiera de componentes activos idóneos para su realización práctica. Es el caso de algunos circuitos inversores ingenierados en la época de las válvulas de gas que tuvieron que esperar a la aparición de los transistores de potencia y de los tiristores para que fueran prácticos, debido a la elevada caída de tensión de las válvulas. Los equipos electrónicos de potencia suelen contener tres partes principales, Fig. 1: el *circuito de potencia* donde tiene lugar la regulación o conversión de la energía eléctrica mediante semiconductores o válvulas, el *circuito de control* que manda dichos semiconductores y el *circuito de medida y visualización* que, a veces, incluye también vigilancia (incluso maniobra elemental) remota. En equipos sencillos pueden faltar los circuitos de medida y visualización, y el circuito de control puede estar poco diferenciado del de potencia.

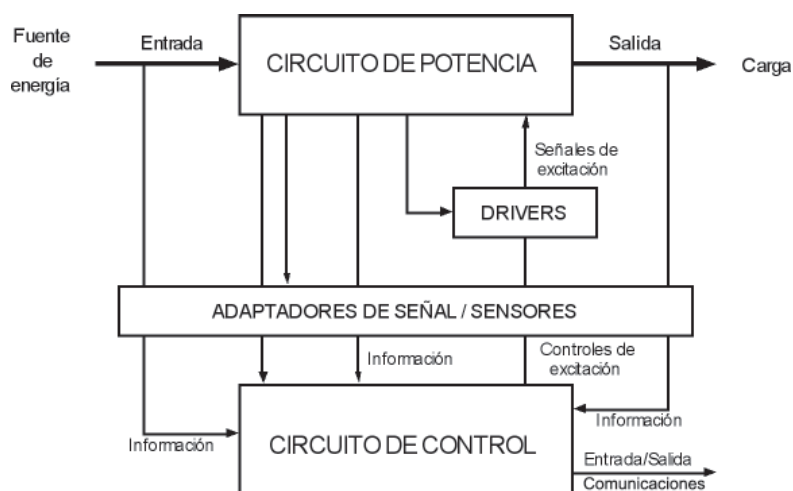


Fig. 1: Esquema de bloques de un equipo genérico de Electrónica de Potencia

2. DEFINICIÓN

Antes de dar una definición, notemos que entre las aplicaciones de la *Electrónica de Potencia* se encuentran muchas que manejan menos de un vatio, como los convertidores de corriente continua para aparatos pequeños de electromedicina, implantados en el paciente o externos. Y es que la característica definitoria de esta rama de la electrónica no es que maneje mucha potencia eléctrica con dispositivos electrónicos, sino que realice sus funciones de transformación o de control con elevado rendimiento. Así, el amplificador de salida a antena de una potente emisora de radio o TV, que puede manejar cientos de kilovatios, no pertenece a la *Electrónica de Potencia* sino a la *Electrónica de Señal*, pues el criterio clave de su diseño es que la fidelidad en la amplificación de la tensión y corriente sea alta, resultando secundario (aunque no indiferente) el rendimiento eléctrico. Y, contrariamente, el convertidor electrónico que adapta la tensión de batería de un teléfono móvil a sus distintos circuitos no pertenece a la *Electrónica de Señal* sino a la *Electrónica de Potencia*, aunque la potencia que maneje sea inferior a 1 vatio, cantidad parecida a la de los receptores de radio portátiles. Aquí el criterio de diseño es que esa adaptación de tensiones se realice con elevado rendimiento para que la batería dure lo más posible y lo secundario (hasta cierto punto) es que los niveles de tensión continua generados sean perfectos. Aclarado esto, una definición razonable de *Electrónica de Potencia*, consensuada por distintos expertos, puede ser la siguiente [1], p. 4: *Técnica de las modificaciones de la presentación de la energía eléctrica conducida, mediante controladores de corriente actuantes sobre el flujo de electrones, que busca en primer lugar rendimiento elevado y en segundo lugar fidelidad a las formas de onda buscadas.*

3. BREVE HISTORIA

Aunque el artículo se enfoca hacia su presente y futuro, no conviene olvidar los orígenes de la *Electrónica de Potencia*, pues, como en cualquier otra parcela del saber, el relato de su nacimiento y evolución aclara mejor que cualquier definición tanto su objeto y naturaleza como su posible devenir. La *Electrónica de Potencia* comenzó con la aplicación de los primeros dispositivos de control todo-nada del paso de la corriente eléctrica por flujo de electrones (diodo y válvulas de vacío para poca potencia, y válvulas de gas para mayor potencia, Fig. 2) a la conversión y control de la energía eléctrica para diversos usos (alimentación de radiotransmisores y radiorreceptores, soldadura y procesos industriales). Son hitos importantes la invención del bulbo rectificador de mercurio en 1901 por P. **Cooper** y del diodo de vacío en 1904 por J. A. **Fleming** (se aplicó a la alimentación de radiorreceptores y emisoras) del tiratrón entre 1914 y 1928 por I. **Langmuir** y A. **Hull** (pronto se aplicó a la rectificación controlada) del diodo de selenio en 1930 de forma artesanal y anónima (aplicado a la rectificación no controlada) y del ignitrón en 1940 por la *Westinghouse* y otras compañías (para la rectificación controlada y la soldadura eléctrica, entre otros). Con el ignitrón se controlaron intensidades de varios miles de amperios y

tensiones de 20.000 V con baja relación (del orden del 0,1%) entre la tensión en conducción (unos 18 V) y la soportada en estado no conductor, reduciendo por tanto las pérdidas relativas de las aplicaciones y consolidando la electrónica como una tecnología eficiente y capaz de muy alta potencia.

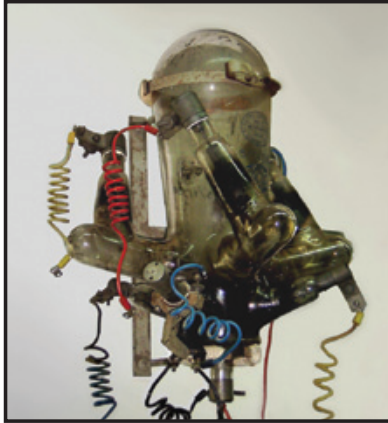


Fig. 2: Bulbo rectificador trifásico de vapor de mercurio de 150 A y 150 V construido hacia 1940 por Electric Construction Company LTD, Inglaterra. Cortesía del Laboratorio Mahedero, EII, Badajoz.

Sin embargo, serían los semiconductores de potencia los que facilitarían la construcción de equipos al tener menor volumen que las válvulas y reducir los requerimientos de circuitos auxiliares y refrigeración. Tras la invención del transistor y diodo de unión por W. B. Shockley, J. Bardeen y W. H. Brattain en 1950, entre los años 50 y 70 se desarrollaron transistores bipolares, Fig. 3, que pronto alcanzarían 200 A y 2000 V. Las combinaciones en cascada propuestas por S. Darlington en los Laboratorios Bell en 1951 mejoraron la baja ganancia de intensidad a costa de menor velocidad de conmutación. Serían, no obstante, los semiconductores de cuatro capas (tiristores en sus distintas variantes: SCR o *Silicon Controlled Rectifier*; GTO, o *Gate Turn-Off switch*; TRIAC, o *Triode AC semiconductor*) los que permitirían manejar intensidades y tensiones más elevadas. Tras el lanzamiento del SCR por General Electric en 1957 pronto se consiguieron diodos semiconductores y dispositivos controlados de varios miles de amperios y voltios, igualando así a los ignitrones en intensidad aunque no en tensión. Sin embargo, la tensión en conducción de estos semiconductores, entre 1 V y 2 V, mucho menor que la del ignitrón, abrió las puertas a las aplicaciones de baja tensión con pérdidas bajas.



Fig. 3: Primeros transistores bipolares de potencia de germanio en cápsula TO-3 de Sylvania, 1956. Alcanzaban varios amperios y decenas de voltios. Cortesía J. A. Knight.

El inconveniente principal de los tiristores es su apagado, que, salvo en el GTO, necesita circuitos auxiliares. Los transistores Darlington y más tarde los de efecto de campo (FET, o *Field Effect Transistor*, introducidos en versiones de potencia por Siliconix, International Rectifier y Siemens en

los años setenta) disponen de control de encendido y apagado por puerta con baja energía, pero no alcanzan intensidad y tensión importantes. Han sido los transistores híbridos IGBT, o *Isolated Gate Bipolar Transistor* (bipolares en su estructura de potencia y FET en la de control), los que entre los años 70 y 80 alcanzaron potencia notable con control sencillo. Él y sus variantes se perfilan hoy, con miles de amperios y hasta 6.000 V, como el interruptor sólido quasi-ideal del futuro.

A partir de los años 80 se han desarrollado semiconductores de potencia que integran en su cápsula circuitos auxiliares de protección, excitación o bloqueo. Es el concepto de interruptor inteligente de potencia (*smart power*) que facilita su aplicación.

La historia de la *Electrónica de Potencia* debe mencionar el desarrollo de circuitos integrados de nivel de complejidad creciente que han permitido la sofisticación de las funciones de control y su facilidad de implementación casi sin limitación. En un principio (años 60), los circuitos de control se realizaban con transistores y diodos de señal discretos. La llegada de las primeras puertas, *flip-flops* y amplificadores operacionales integrados en los 60 supuso un enorme alivio para el diseñador. Particularmente interesante fue la aparición de los integrados CMOS con alimentación de 15 V (años 70) por la inherente inmunidad al ruido que ofrecían y su gran difusión. Erradicaron otras familias especiales de integrados digitales TTL, o *Transistor Transistor Logic*, con zeners de protección incorporados. En 1971 Intel comercializó el microprocesador 4004 que, con 2300 transistores y 60.000 operaciones por segundo, iniciaba la carrera hacia los variados dispositivos programables disponibles hoy (microprocesadores, microcontroladores, procesadores digitales de señal DSP, o *Digital Signal Processors*, y dispositivos lógicos programables PLD, o *Programmable Logic Device*), realmente potentes y económicos. Nótese que, normalmente, los dispositivos de control de un equipo electrónico de gran potencia no cuestan lo que uno solo de sus interruptores de potencia. Simplificando, se puede decir que en un equipo electrónico de potencia que maneje más de 100 kVA el circuito de potencia cuesta económicamente tanto por el trabajo de diseño como por el precio de sus componentes valiendo la pena optimizar el diseño para elevar la fiabilidad y reducir el coste, mientras que el circuito de control cuesta económicamente por el trabajo de diseño y no por los componentes, valiendo la pena optimizarlo para elevar las prestaciones y la fiabilidad del conjunto, pero no para reducir el coste del propio control, que es despreciable frente al del conjunto.

4. MULTIDISCIPLINARIEDAD

En la *Electrónica de Potencia* concurren muy distintas disciplinas: la física del estado sólido (pues la mayor parte de los componentes activos son semiconductores); la teoría de circuitos (los circuitos electrónicos son sus derivados) y la electrotecnia (se emplean relés, contactores, condensadores de corrección de factor de potencia, etc.); la electrónica digital (cada vez más presente en los circuitos de control) y la analógica (presente en los circuitos de medida y en el control no digital);

la teoría de control (aplicada a los circuitos de control); las máquinas eléctricas estáticas (transformadores y bobinas simples o multidevanado) y dinámicas (motores eléctricos y generadores que deben ser regulados); la electroquímica (baterías y condensadores electrolíticos); la termotecnia (refrigeración del equipo y de determinados componentes); las comunicaciones industriales (empleadas en la supervisión y control remotos de convertidores y sistemas electrónicos de potencia críticos); la mecánica y la construcción industrial (los equipos electrónicos de elevada potencia pueden pesar miles de toneladas y ser tan grandes como un campo de fútbol, como los convertidores para transmisión de energía eléctrica en corriente continua de alta tensión); la teoría de la fiabilidad (que aconseja la asociación funcional de componentes y subsistemas para elevar la seguridad de operación y la facilidad de reparación); la compatibilidad electromagnética (el circuito de potencia no debe perturbar otros equipos ni al propio circuito de control y, además, este no debe ser alterado por perturbaciones propias ni ajenas); las técnicas de simulación (al ser los equipos electrónicos de potencia costosos, es conveniente emplear simuladores bien contrastados que ahorren averías en las fases primeras del desarrollo).

La concertación de saberes ejercida por la *Electrónica de Potencia* [2] [3] entre los mundos de mecánica, la electrónica, la electricidad, la mecánica y la química es similar a la que ejerce la *Robótica* entre los mundos de la automática, la informática y la inteligencia artificial, si bien esta segunda concertación se establece en un nivel de abstracción superior y toma como subconjuntos constitutivos dispositivos mecánicos, eléctricos y electrónicos. Si en un principio un mismo diseñador podía abarcar todos o casi todos los aspectos de la *Electrónica de Potencia*, hoy es habitual la especialización en potencia, control o mecánica y refrigeración, sobre todo en compañías medianas y grandes, considerándose como más crítico el diseño del circuito de potencia porque es el que más define las posibilidades del equipo y el más costoso. Por otra parte, es más fácil pasar del diseño de potencia al de control que viceversa porque el primero involucra más aspectos técnicos y más decisivos.

5. PRESENTE Y FUTURO EN COMPONENTES, TOPOLOGÍAS, CONTROL Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

Las realizaciones en *Electrónica de Potencia* dependen de la disponibilidad en los distintos aspectos de los equipos [4] [5] [6], como son los componentes con que se cuenta, las topologías que los diseñadores han inventado (en las que cada vez es más difícil innovar), los dispositivos de control disponibles (muy sofisticados hoy), los métodos de control conocidos y las técnicas

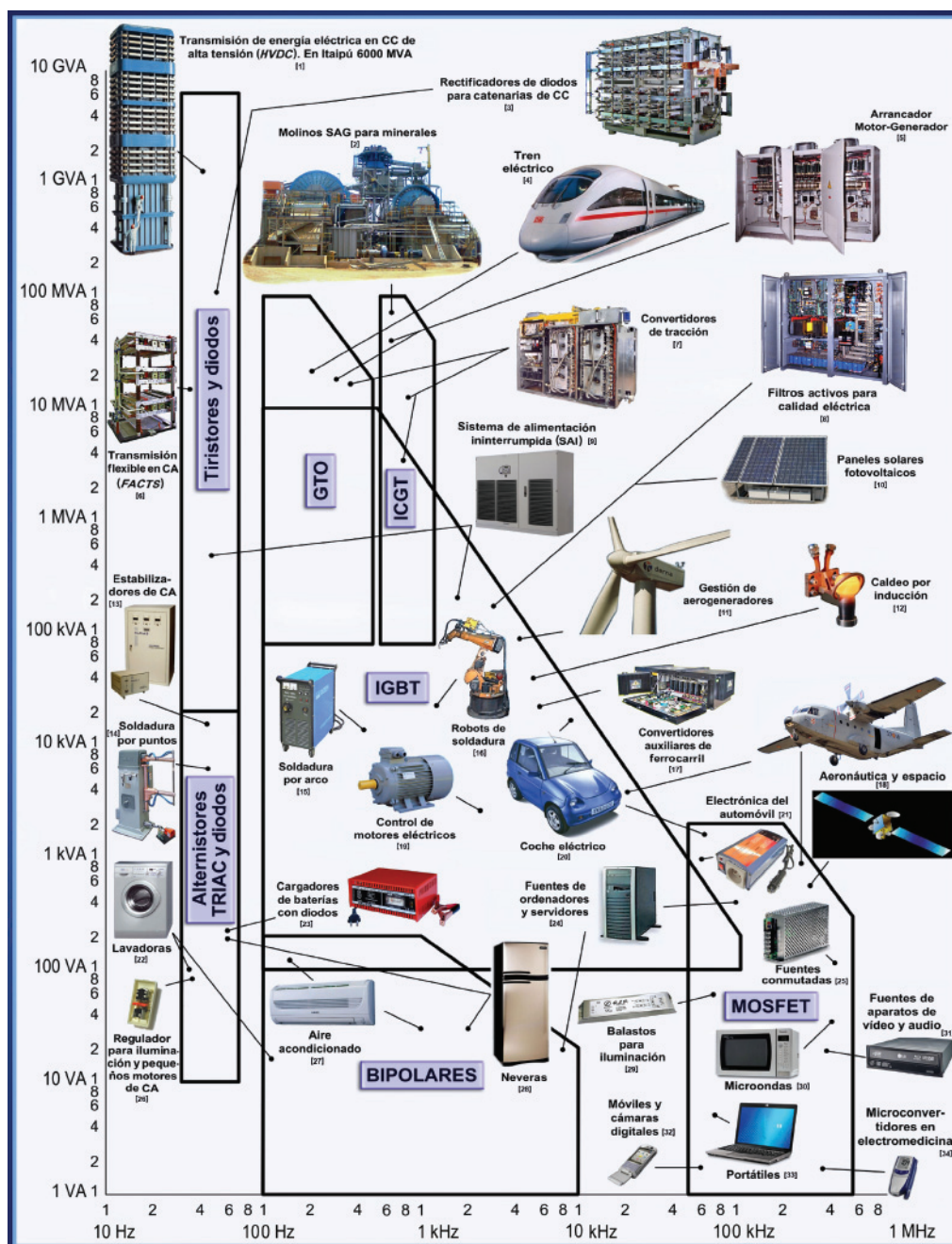


Fig. 4: Equipos de Electrónica de Potencia ordenados por potencia de salida (eje vertical) y frecuencia de conmutación interna de los semiconductores (eje horizontal). Por J. C. Campo, S. Martínez y S. Monteso. Disponible como cartel de alta resolución en la página web de DYNA.

de construcción (que en el caso de los interruptores de potencia, transformadores y bobinas alcanzan fiabilidades elevadas, y no tanto en los condensadores).

5.1. DISPOSITIVOS DE POTENCIA

Los componentes específicos utilizados en *Electrónica de Potencia* son los interruptores de c.c. y de c.a. basados en semiconductores, los condensadores, bobinas y transformadores de potencia. También las resistencias de potencia están presentes a veces en los circuitos amortiguadores y de carga o descarga de filtros.

5.1.a. Interruptores de potencia

La evolución de los interruptores de potencia ha sido muy marcada desde la aparición de los primeros transistores de potencia y rectificadores de silicio controlados hasta los interruptores estáticos actuales para circuitos de continua (transistores, tiristores) y de alterna (TRIAC y alternistores). Han influido principalmente la elevación de la intensidad y tensión manejadas, la reducción de la caída de tensión en conducción y el aumento de la velocidad de conmutación. El diseño de dichos componentes se realiza en buena medida de forma específica según el campo de aplicación final, es decir, para circuitos de continua se diseñan interruptores de continua del tipo transistor y tiristor asimétrico y para circuitos de alterna interruptores de alterna del tipo TRIAC y alternistor. Sin embargo, muchos transistores y tiristores de mediana y gran potencia pueden ser utilizados con éxito tanto para circuitos de continua como para circuitos de alterna (en el segundo caso mediante la conexión en antiparalelo).

Actualmente se trabaja para reducir al máximo la caída de tensión en conducción y los tiempos de cierre y apertura, tanto en los transistores bipolares como en los MOSFET (*Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor*) y los IGBT. Estos últimos pueden alcanzar valores de corriente y tensión de hasta 4 kA y 5 kV. Asimismo, se investiga en otros semiconductores base como el carburo de silicio (SiC) que permitan dispositivos de más de 10 kV. En cuanto a los tiristores, se buscan variantes mejoradas del GTO, tales como el IGCT (*Integrated Gate Commutated Thyristor*), preferido a aquél en controladores más rápidos de grandes motores. Los campos de aplicación y las potencias y frecuencias de conmutación manejadas por los tipos de semiconductores mencionados pueden verse en el cartel *Campo de aplicación de la Electrónica de Potencia*, Fig. 4 (esta imagen se puede ver en alta resolución en www.revistadyna.com como material adicional al artículo).

En el actual desarrollo de los semiconductores de potencia destacan, por un lado, los avances relacionados con la programabilidad de características dinámicas de los interruptores de muy alta potencia, la cual permite protegerlos y ajustarlos a cada aplicación y, por otro lado, la integración de varios semiconductores en puentes programables. Ello permite que el diseño del convertidor de potencia final se realice cómodamente atendiendo más a las meras exigencias de la carga y no tanto a las características dinámicas del

propio interruptor, que pueden ser ajustadas. Tampoco hay necesidad de entrar en el diseño de los excitadores, que están ya integrados en el conjunto. Ambos avances, junto con la mejora de las características dinámicas de los interruptores (que permite reducir e incluso eliminar las redes amortiguadoras de sobretensiones y sobreintensidades) hacen que el tiempo de desarrollo dedicado a la protección del interruptor se rebaje considerablemente y se mejore la fiabilidad. El futuro de los interruptores parece pasar por semiconductores con una anchura de banda prohibida mayor que la del silicio. Para ello, el carburo de silicio y el diamante sintético se vislumbran como los materiales más satisfactorios, especialmente para altas potencias, debido a que pueden soportar tensiones y temperaturas mucho mayores que el silicio y así permitir mayor integración y eficiencia [7].

5.1.b. Integración de alto nivel de semiconductores de potencia y de componentes en general. Convertidores básicos “precocinados”.

Entre las tendencias que mayor dinamismo están aportando al diseño de convertidores electrónicos está la integración de semiconductores de potencia no solo con componentes de señal para su excitación y protección individual —lo que dio lugar hacia los ochenta a los llamados semiconductores de potencia inteligentes (*smart power devices*) y más recientemente a los ya mencionados semiconductores de potencia con características programables— sino también con circuitos de control avanzados y componentes de protección (pequeñas bobinas, condensadores, resistencias) para conformar subconjuntos complejos muy variados (como puentes inversores polifásicos completos y fácilmente programables). Véase un ejemplo en la Fig. 5, la cual representa un puente inversor trifásico con IGBT pensado para aplicaciones en el automóvil y que integra dispositivos de protección y de control de alto nivel.

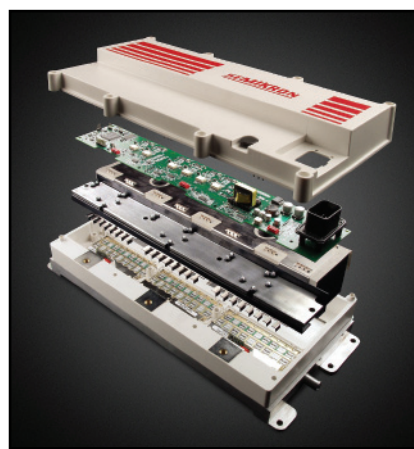


Fig. 5: Módulo puente inversor trifásico con IGBT desplegado diseñado para control de motores eléctricos en automóviles. Con los IGBT integra excitadores, redes protectoras y circuitos para funciones de control básicas. En la placa superior se puede apreciar el alto grado de integración alcanzado. Cortesía de Semikron.

5.1.c. Transformadores y bobinas para *Electrónica de Potencia*. Magnetismo integrado

Al emplearse en *Electrónica de Potencia* frecuencias de conmutación cada vez más elevadas, los transformadores y bobinas han derivado en muchas aplicaciones hacia

componentes con núcleos y devanados especiales, capaces de operar a veces por encima de los 100 kHz. Son frecuentes los núcleos de ferrita y de materiales ferrosos sinterizados que, trabajando a inducción convenientemente reducida, presentan densidades de pérdidas admisibles a frecuencias altas. En los devanados de componentes de potencias superiores a 1 kVA son habituales los conductores multi-hilo, o cables de Litz, que minimizan el efecto pelicular reductor de la sección efectiva.

Otro aspecto a destacar es la integración, cuando es posible, de distintos transformadores y bobinas en un mismo núcleo, tendente a reducir el tamaño global y aumentar la fiabilidad, lo que es muy interesante para equipos de potencia superior a algunos kilovoltamperios porque reduce el tamaño global, aumenta la fiabilidad y disminuye el coste. Para realizar esta «integración magnética» se aprovechan, entre otros, las inductancias magnetizantes y de dispersión de los transformadores para obtener bobinas paralelo y serie de características adecuadas a funciones de filtrado, Fig. 6. Se tiende a emplear estas técnicas cuando importa la reducción de espacio (como en los convertidores auxiliares de ferrocarril y en la aeronáutica) o la fiabilidad (como en los estabilizadores ferroresonantes de c.a. y de c.c. y en los S.A.I. tripuerta, o *triport*, para centrales eléctricas, plantas químicas y ferrocarril, que siguen siendo muy apreciados cuando el mantenimiento es problemático).



Fig. 6: Inclusión de una columna auxiliar de hierro entre primario y secundario del transformador de un convertidor auxiliar de ferrocarril de 750 V c.c. y 90 kVA + 17 kW para aumentar la inductancia dispersa entre ellos e integrar una bobina de filtro serie. Cortesía de SEPSA y Valdepinto S.L., Madrid.

En equipos de menos de 100 VA y muy alta frecuencia se imponen los transformadores planos integrados en los circuitos impresos, que reducen enormemente los costos de producción y montaje. Los núcleos, normalmente de ferrita, son de reducida altura y los devanados se implementan mediante una o varias capas de circuito impreso. A través de esta tecnología, el concepto de “componente o circuito embebido” o incrustado (*embedded circuit*), que nació en la fabricación de los circuitos digitales y pasó más tarde a la de los analógicos, alcanza poco a poco a los transformadores y bobinas de muy baja potencia.

En el desarrollo de componentes magnéticos para *Electrónica de Potencia* juegan un papel cada vez mayor los programas de cálculo basados en elementos finitos, que permiten prever con detalle las distribuciones de corriente, tensión, flujo magnético y pérdidas, evitando la aparición de puntos calientes y consiguiéndose diseños muy optimizados.

5.1.d. Condensadores para *Electrónica de Potencia*. Condensadores de conmutación y supercondensadores

La *Electrónica de Potencia* exige de forma creciente condensadores para funciones de conmutación de

semiconductores capaces de manejar elevadas intensidades y tensiones a frecuencia alta. Ello impone una construcción cuidadísima para soportar los esfuerzos electrodinámicos en las placas y reducir la resistencia e inductancia serie asociadas, Fig. 7. Es común emplear plásticos metalizados para implementar placas arrolladas, fuertemente sinterizadas en los bordes y con latiguillos interiores cortos y multi-hilo para reducir resistencia e inductancia parásitas. Otras aplicaciones, como el filtrado de alterna, son menos exigentes y se cubren bien con los condensadores secos clásicos. La función autorregenerativa de microcortos que ofrecen muchos condensadores con placas metalizadas es muy conveniente, pues asegura vida larga.



Fig. 7: Condensadores de conmutación y de amortiguación en GTO. Soportan elevados picos de intensidad y tensión a frecuencias altas. Cortesía de WIMA y FACTRON.

En los condensadores de c.c., o condensadores polarizados, la aparición de variantes con elevada capacidad, gracias a un espesor del aislante entre capas extremadamente delgado, conseguido químicamente mediante técnica de doble capa iónica, [1] p. 277, ha extendido el rango de aplicaciones al almacenamiento de energía para tiempos de autonomía cortos, inferiores a 1 minuto, en los cuales las baterías de descarga rápida de Ni-Cd y de plomo tienen dificultades. Son los llamados supercondensadores, Fig. 8. Su inherentemente pequeño espesor de aislante hace que las tensiones de trabajo sean bajas, del orden de decenas de voltios, y se recurre a la asociación serie cuando se requiere mayor tensión. Se emplean en el frenado regenerativo de los automóviles eléctricos, entre otros.



Fig. 8: Supercondensador electrolítico, o de doble capa, de elevada capacidad. Suplantando a las baterías rápidas para tiempos de descarga inferiores a 1 minuto. Cortesía de EPCOS.

La fabricación de condensadores de potencia fiables es tarea ardua y en la práctica el número de fabricantes se ha reducido. Son los componentes menos seguros de un convertidor electrónico de potencia y mediatizan altamente su fiabilidad

global. Se impone un dimensionamiento generoso en su elección y recurrir a marcas acreditadas.

5.1.e. Baterías y otros dispositivos de almacenamiento de energía

Algunos equipos electrónicos de potencia exigen dispositivos de almacenamiento de energía con tiempos de autonomía superiores al minuto alcanzable con supercondensadores. Entre ellos están los sistemas de alimentación ininterrumpida, los coches eléctricos, los aparatos electrónicos portátiles (todos ellos se tratarán en un segundo artículo) y ciertas aplicaciones industriales.

En baterías existe una intensa investigación, impulsada sobre todo por los aparatos portátiles (ordenadores, cámaras fotográficas y teléfonos móviles) y por el desarrollo del coche eléctrico. En este último se compagina hoy el uso de las baterías tradicionales de plomo y de níquel-cadmio con las de níquel-hidruro metálico y las de litio-ion, y se intenta introducir baterías de ánodo de cinc porque proporcionarían una elevada potencia específica. Por otro lado, tanto en el coche eléctrico como en otras aplicaciones industriales se investiga la utilización de pilas de hidrógeno, que generan c.c. que es posteriormente adaptada mediante convertidores electrónicos de potencia diversos. En aplicaciones donde se requiere un tiempo de almacenamiento largo, como las militares, se emplean baterías de plata-cinc.

Para aplicaciones de elevada potencia asociada a la calidad eléctrica y para los sistemas de alimentación ininterrumpida (ambos se verán en un segundo artículo) se investiga en el almacenamiento de energía mediante aire comprimido, bombeo de agua, superconductores y volantes de inercia [8]. Solo algunas aplicaciones están comercialmente disponibles.

5.2. TOPOLOGÍAS

Los componentes eléctricos y electrónicos de un equipo electrónico de potencia están interconectados conformando circuitos que cumplen misiones determinadas. Cuando el equipo es complejo, como el acondicionador universal de las Fig. 13 y 14, el circuito completo suele dividirse en circuitos parciales con papeles y nombres determinados, como, en la citada figura, el “convertido paralelo” y el “convertidor serie”. Si el equipo es muy complejo suele denominarse “sistema”, como es el caso de los “sistemas de alimentación ininterrumpida” para alimentación de cargas críticas, que se verán en un segundo artículo.

Se llama topología de un equipo electrónico a la organización circuital y funcional de sus componentes. El nombre deriva del griego τόπος, o lugar, y se emplea por analogía del esquema eléctrico del equipo sobre un papel, donde se representan distintos componentes y circuitos, con un mapa geográfico que represente distintos lugares y regiones. Con significado similar al de ‘topología’ suele emplearse también ‘configuración’. Ambos nombres se aplican no solo a los circuitos eléctricos, sino también a los circuitos magnéticos de transformadores y bobinas complejos, como los derivados del empleo de las técnicas de magnetismo integrado ya mencionadas en 5.1.c.

De la topología de un equipo electrónico de potencia derivan sus propiedades fundamentales, por lo que su elección adecuada guía en gran medida la adaptación del equipo a la misión encomendada. La investigación en topologías para equipos electrónicos de potencia requiere un amplio conocimiento de las distintas posibilidades circuitales, dominio de las leyes eléctricas de transformación entre ellas [9] [10] y experiencia industrial en la fabricación de convertidores, de manera que siempre se tengan presentes las ventajas e inconvenientes prácticos de cada solución.

El no cumplimiento de cualquiera de esos requisitos puede llevar a enfoques o diagnósticos erróneos o incompletos en el ámbito de las topologías, algo que ocurre con relativa frecuencia. Por ejemplo, ciertos informes del EPRI (*Electric Power Research Institute*) [11] [12] que estudiaban la posibilidad de eliminar las engorrosas labores de mantenimiento periódico en los estabilizadores de líneas de media tensión sustituyendo los conmutadores de tomas electromecánicas por interruptores de estado sólido, han concluido que la sustitución directa sobre las topología al uso en electrotecnia, si bien es teóricamente posible, no resulta práctica. Esta exigía numerosísimos tiristores para implementar las abundantes tomas multiplicadas por la asociación serie obligada por la elevada tensión. Sin embargo, la aplicación al mismo problema de topologías con transformador compensador ya utilizadas en estabilizadores de tomas electrónicos para baja tensión, [13] patente 522.497, no contempladas por el EPRI, ha dado como resultado una solución técnica y económicamente adecuada [14] que, además, añade la ventaja de instalación en vivo del estabilizador electrónico en cualquier punto de la línea.

No es posible describir en este apartado general las tendencias de los desarrollos topológicos en toda la *Electrónica de Potencia*. Después de señalar ahora algunas de ellas, se comentarán algunos puntos relevantes en las aplicaciones que lo requieran.

En general, los desarrollos de las topologías han llegado, salvo algunas excepciones, a una etapa de cierto estancamiento [5] [7]. Las mayores innovaciones en los convertidores de potencia surgen hoy de la integración de alto nivel (véase 5.1.b), de los controles complejos implementados mediante DSP o FPGA (véase 5.4), del autodiagnóstico y autoajuste (véase 5.4) y del control y vigilancia remotas de sistemas (véase 5.7). Podemos no obstante detallar algunos de los aspectos en que la investigación de topologías mantiene vigencia:

- circuitos reconfigurables que economicen componentes y desplieguen tareas como los convertidores de tracción descritos en 6.5 y de funciones auxiliares del ferrocarril, que a veces deben adaptarse a distintas tensiones de catenaria; los sistemas de alimentación ininterrumpida, o SAI, fuera de línea, u *off-line*, cuyo inversor para alimentación de la carga cuando no hay tensión de red se emplea como cargador de batería cuando sí la hay; los controladores unificados (UPFC, *Unified Power Flow Controller*), o acondicionadores universales, con capacidad de reconvertirse a SAI cuando falta la red, que se verán en 6.1;

- convertidores multinivel que reducen la tensión de los interruptores y la distorsión de las ondas de tensión y corriente involucradas;
- alimentación distribuida para reducción de caídas de tensión en las barras, o *buses*, de alimentación, aspectos, todos ellos, que van acompañados a veces de investigación en
- mejora de las técnicas de modulación en alta frecuencia para reducción de distorsiones en las ondas de tensión e intensidad;
- elevación de la frecuencia en los transformadores de potencia para reducir su tamaño y coste.

5.3. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN EN TOPOLOGÍAS CON CONTROL INMEDIATO DEL COSTE

De poco sirve crear nuevos circuitos electrónicos de potencia si sus cualidades técnicas son peores que las de soluciones anteriores o su coste los hace inaplicables. La mayor parte de las publicaciones sobre nuevos circuitos y equipos carece de autocomprobación en este sentido y el tiempo se encarga de evidenciar la utilidad de algunos y la inutilidad de buena parte. En un marco de investigación y desarrollo racional y ético, la propuesta de una nueva topología debería estar acompañada de la comprobación de que, al menos, es tan buena como las anteriores tanto técnica como económicamente. Para ello es útil contar con algún método de investigación en *Electrónica de Potencia* con control inmediato del costo. A continuación presentamos el resumen de un método tal [15], desarrollado a lo largo de más de treinta años de proyectos prácticos en distintas empresas y universidades. Más de diecisiete patentes han visto la luz gracias a su aplicación, entre ellas [13] y [18], y los equipos construidos derivados se han exportado, según el testimonio de los fabricantes, a más de cuarenta y cinco países. El método consta de cinco fases.

1. Análisis del circuito: se analiza el funcionamiento de la nueva topología estableciendo las ecuaciones de evolución temporal de las variables eléctricas y resolviéndolas por los medios al uso: cálculo diferencial e integral, transformadas de Laplace, etc.
2. Síntesis de las solicitaciones en los componentes: se deben elaborar ecuaciones que den los parámetros de definición y las solicitaciones eléctricas de los componentes en función de las especificaciones del convertidor. Tales ecuaciones permiten conocer de forma inmediata la adecuación práctica de una topología a una aplicación concreta. Es una etapa que exige un esfuerzo y disciplina de trabajo notables, pero su aplicación mide inmediatamente el interés práctico del nuevo circuito (destapando a veces que este es escaso o nulo) y simplifica enormemente el posterior diseño.
3. Estandarización de componentes y cálculo de su costo: definidos los componentes y sus solicitaciones, es necesario valorarlos económicamente, lo que se facilita transformándolos en componentes estándar del mismo costo, de modo que este se pueda obtener de forma inmediata de

listas de precios en vigor. Por ejemplo, de cada transformador y bobina resultantes de la síntesis debe deducirse la potencia de un transformador de aislamiento de 50 Hz ordinario hecho con la misma cantidad de hierro y cobre exigida por aquél (concepto de “potencia equivalente en 50 Hz”, *equivalent 50 Hz power, effective power* [17] [18]), de modo que su coste pueda conocerse directamente consultando una lista de precios de transformadores de aislamiento de 50 Hz, de los que hay distintos fabricantes. Similares transformaciones se aplican a otros componentes de potencia.

4. Transformación en variantes topológicas: un mismo circuito electrónico de potencia suele tener asociadas distintas variantes topológicas que, aunque de aspectos circuitales y campos de aplicación diferentes, se rigen por ecuaciones similares que pueden ser deducidas unas de otras. Algunas propuestas de nuevas topologías ignoran que son variantes de otras anteriores, lo que lleva a veces a repetir investigaciones innecesariamente. El caso de los inversores con tiristores es ejemplar. Salvo excepciones [19] se propusieron en los sesenta y setenta numerosos circuitos como novedosos que luego se revelaron parientes próximos de otros ya conocidos [8] [9] [20]. Existen propuestas metodológicas especiales para esta deducción [24]. Para cada variación topológica resultante debe procederse de nuevo a aplicar las etapas de síntesis y de estandarización de componentes.
5. Comparación y tabulación técnico-económica de soluciones: en el desarrollo industrial de un equipo de *Electrónica de Potencia*, el análisis, la síntesis y la estandarización de componentes debe realizarse para un número adecuado de soluciones topológicas, estén emparentadas o no. Una tabla final con las características técnicas y económicas de las soluciones es de enorme utilidad. Véanse ejemplos en [22] [23] [14].

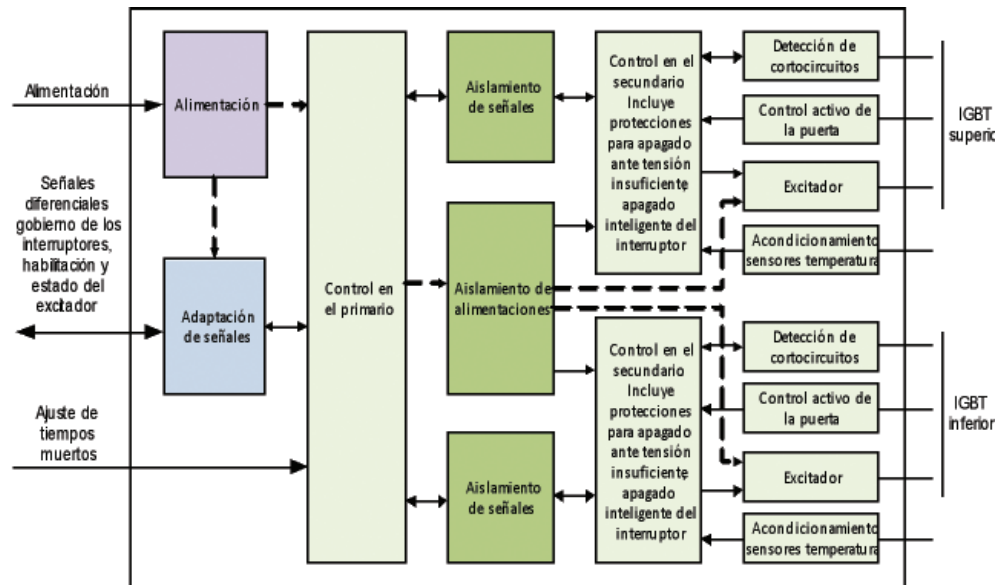
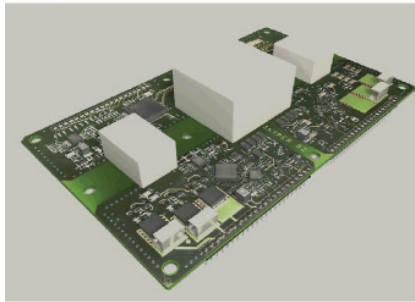
5.4. DISPOSITIVOS Y FUNCIONES DE CONTROL

El subsistema de control de un equipo electrónico de potencia está formado por los elementos que implementan los mecanismos de regulación de las variables de interés, como la tensión o la corriente de salida, y por los dispositivos para excitar los interruptores, activar las protecciones, realizar funciones sobre los interruptores de potencia según algún criterio especial y, si fuera necesario, informar y establecer comunicaciones con usuarios u otros subsistemas.

La regulación se realiza generalmente de forma analógica en los sistemas electrónicos de hasta algunas centenas de vatios. Se suelen emplear circuitos que integran diversas funciones tales como la generación de las señales para la modulación de ancho de pulso, la excitación de los interruptores, el arranque suave del convertidor o la comparación de error para efectuar el control. El UC1525 es un ejemplo de este tipo de circuitos integrados para convertidores c.c./c.c. Sin embargo, la tendencia es la incorporación de un control en parte o

totalmente digital debido a que permite un aumento notable en las prestaciones de los equipos con un coste cada vez más reducido [24].

Para implementar el control digital se utilizan dispositivos electrónicos programables como microprocesadores, microcontroladores, procesadores digitales de señal (DSP, *Digital Signal Processor*) o dispositivos lógicos o matrices de puertas programables



en campo (FPGA, *Field Programmable Gate Arrays*). Como el control digital precisa la realización de determinados cálculos a una velocidad elevada, la frontera entre algunos microcontroladores y los DSP ha tendido a borrarse incorporando cada uno instrucciones y funciones propias del otro. En consecuencia se cuenta hoy con controladores digitales de señal (DSC, *Digital Signal Controller*), tales como la familia 56800 de *Freescale* y la C2000 de *Texas Instruments*, muy adecuados para convertidores de potencias medias.

Las FPGA han entrado recientemente con gran fuerza en el campo del control en competencia directa con los procesadores digitales y los controladores digitales de señal. Su mercado es uno de los más dinámicos actualmente y de ellas cabe esperar un papel cada vez más importante en el campo del control. Su mayor ventaja es que permiten realizar “dispositivos a medida” de las necesidades de la aplicación, con gran velocidad y potencia de procesado, y con la posibilidad de implementar cualquier función o dispositivo digital, incluso procesadores digitales de señal. Algunas familias recientes, como la *Actel Fusion*, también incorporan funciones analógicas.

Los controles digitales permiten que funciones clásicas de control, como las protecciones, se lleven a cabo con mayor eficiencia y actúen sobre el sistema de potencia de forma adaptada a las características del fallo concreto que se produzca. También tienen cada vez más importancia las funciones de autodiagnóstico mediante la comprobación de las señales críticas y de las alimentaciones reforzada con comunicaciones entre los subsistemas del equipo de potencia y entre este y otros sistemas. La disponibilidad actual de excelentes y económicas referencias de tensión e intensidad integradas permite también incorporar en los controles funciones de autoajuste de variables críticas, como la tensión de salida de las fuentes de c.c. y c.a.,

de los sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI) y de los acondicionadores de potencia. La Fig. 9 muestra un moderno excitador de *Semikron* que incorpora una FPGA.

Fig. 9: Fotografía y esquema de bloques del excitador digital para IGBT Skyper 52 de *Semikron* con núcleo FPGA que incorpora comunicaciones mediante bus de señal LVDS, protecciones diversas, tiempos muertos ajustables y entradas para sensores de temperatura o autodiagnóstico, entre otras funciones. Cortesía de *Semikron*.

5.5. CONSTRUCCIÓN MECÁNICA

En los equipos y sistemas electrónicos de potencia, sobre todo en los de potencia elevada, confluyen problemas constructivos, de refrigeración, de aislamiento eléctrico, de interferencia electromagnética, de fiabilidad y de facilidad de reparación, todo lo cual obliga a un diseño esmerado de su soporte mecánico. A veces, como sucede en convertidores para aplicaciones de alta tensión, Fig. 10, y en algunos equipos para aviones y misiones espaciales, el diseño mecánico es tan costoso o incluso más que el electrónico y los ingenieros de una y otra disciplina deben mantener una estrecha comunicación a lo largo de todo el desarrollo y construcción. En estos ejemplos, y en otros muchos con valor añadido elevado, el soporte mecánico es específico para cada equipo o familia de equipos.



Fig. 10: Convertidor electrónico c.a./c.c. reversible de un sistema de transmisión de energía eléctrica de alta tensión. Cortesía de *ABB*.

En el otro extremo, en equipos de relativamente poca difusión y en los que se requiere un bajo coste, se prefiere a veces recurrir a sistemas de montaje universales prefabricados, como los denominados “mecanos de montaje”, disponibles en *racks*, gabinetes y cajas para electrónica. Estos han experimentado notabilísimos progresos y existen hoy módulos específicos para *Electrónica de Potencia* tales como soportes para semiconductores de potencia, unidades de refrigeración, cajas disipadoras, Fig. 11, etc. Aunque la frecuencia con que estos sistemas de montaje se aplican está contenida, la tendencia es a disponer de una diversidad cada vez mayor de módulos, cajas y accesorios.

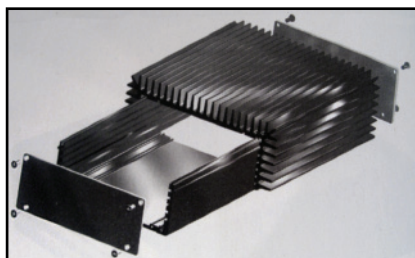


Fig. 11: Caja prefabricada con disipadores para montaje de pequeños convertidores electrónicos de potencia. Cortesía de Fischer elektronik.

5.6. FIABILIDAD, REPARABILIDAD, USO COMÚN

La fiabilidad exigida a los equipos electrónicos de potencia depende del servicio al que alimentan o regulan. Está definida principalmente por el tiempo medio entre fallos, que oscila entre 1 y 8 años (12.000 a 100.000 h) y el tiempo medio de reparación, muy variable dependiendo del tipo de equipo, siendo frecuentes tiempos de 1 a 5 h. La alta fiabilidad está relacionada con un diseño electrónico escrupuloso que limite al máximo las averías en el equipo y con un buen diseño mecánico que facilite su eventual reparación. Los componentes electrónicos críticos son los semiconductores de potencia y los condensadores (ya sean éstos últimos de conmutación o electrolíticos de filtrado y almacenamiento). Para aumentar la fiabilidad se usan tácticas de diseño tales como el sobredimensionamiento en intensidad y en tensión. En los semiconductores de potencia, como es el caso del IGBT, se manejan factores de “sobredimensionado” de 3 y 2.5 para la corriente y para la tensión respectivamente [25]. Entre las estrategias para reducir el tiempo de reparación está el empleo de componentes y subconjuntos comunes bien contrastados por el uso y de fácil adquisición, así como la modularización mecánica que permita sustituir dichos subconjuntos fácilmente. En equipos de alta responsabilidad es deseable el empleo de módulos en paralelo con cierto grado

de redundancia que puedan sustituirse incluso con el resto del equipo en funcionamiento. Es el caso de los sistemas de alimentación ininterrumpida, o SAI, de gran potencia (más de 300 kVA).

5.7 CONTROL Y VIGILANCIA REMOTAS DE SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA

La creciente complejidad y responsabilidad de funciones de los sistemas electrónicos de potencia han llevado a equiparlos con dispositivos de control, supervisión y mantenimiento a distancia que están en pleno desarrollo. Bajo el nombre genérico de *conectronica*, los fabricantes suelen ofrecer una gama de aparatos auxiliares para sus convertidores que permiten monitorizarlos y comandarlos desde un centro remoto por comunicaciones terrestres o hercianas. En los sistemas de alimentación ininterrumpida la vigilancia remota se ha desarrollado con profusión, dada la importancia de los servicios que suelen alimentar. El telecontrol abarata los costos de mantenimiento. En la Fig. 12 se da un esquema conceptual del control remoto.

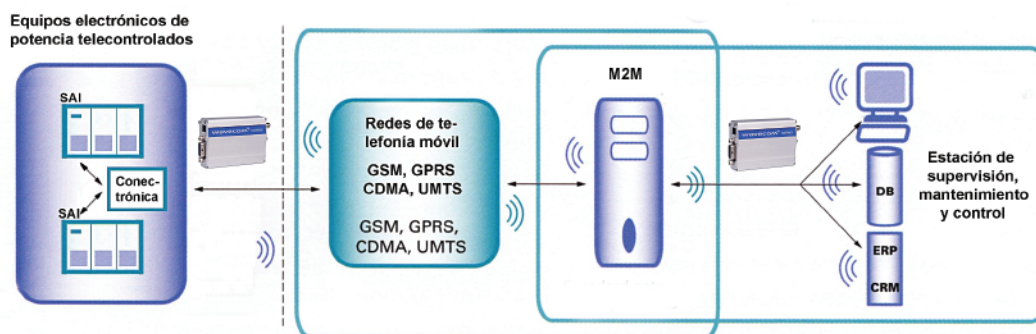


Fig. 12: Concepto del control y mantenimiento remotos de un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) a través de comunicaciones hercianas. Instalaciones similares son también posibles comunicadas por telefonía alámbrica y por fibra óptica. Adaptado de figuras cedidas por Wavecom y Diode.

6.- PRESENTE Y FUTURO EN LAS APLICACIONES DE GRAN POTENCIA

En este apartado quisiéramos iniciar la exposición de las numerosas aplicaciones de la *Electrónica de Potencia*, las cuales pueden organizarse técnicamente teniendo en cuenta la potencia de salida y la frecuencia de conmutación que los interruptores emplean internamente, tal como aparece presentado en el cuadro de la Fig. 4 (puede verse en alta resolución en www.revistadyna.com). En lo que se refiere a las aplicaciones de gran potencia nos centraremos, aunque no estrictamente, en aquellas por encima de 1 MVA. Las aplicaciones de mediana y pequeña potencia se verán en un artículo subsecuente.

6.1. FACTS Y TRANSMISIÓN DE CCAT

Las limitaciones de la transmisión de energía eléctrica en c.a. en cuanto a distancia, estabilidad y control del flujo de energía

han llevado a buscar soluciones basadas en la *Electrónica de Potencia* que se han englobado bajo el término “transmisión flexible de c.a.” (FACTS o *Flexible AC Transmission Systems*) [26]. Dicho término surgió en los años 80 al buscar convertidores para aumentar la capacidad de transporte de energía de las redes y controlar los flujos de potencia por rutas definidas. Se pueden distinguir dos tipos principales de equipos FACTS agrupados en torno a dos familias topológicas: los formados por impedancias reactivas o capacitivas y transformadores con tomas controlados por tiristores y los que utilizan convertidores estáticos con conmutación forzada como fuente de tensión controlada.

En el primer grupo se encuentran el compensador de reactiva (SVC, *Static Var Compensator*), el condensador en serie controlado por tiristor (TCSC, *Thyristor-Controlled Series Capacitor*) y el desplazador de fase (*Phase Shifter*). Cada uno de ellos actúa principalmente sobre uno de los tres parámetros que determina la transmisión de potencia: la tensión, la impedancia de línea y el ángulo de transmisión, respectivamente.

Los equipos del grupo de los convertidores estáticos ofrecen mejor rendimiento y permiten intercambiar potencia activa con el sistema, además de controlar la potencia reactiva. En este grupo se encuentran el compensador síncrono (STATCOM, *STATic synchronous COMpensator*), el compensador síncrono serie (SSSC, *Static Synchronous Series Compensator*), el controlador unificado (UPFC, *Unified Power Flow Controller*) o acondicionador universal, Fig. 13, y el controlador inter-línea (IPFC, *Interline Power Flow Controller*). Cada uno controla parámetros diferentes: tensión con compensación de reactiva en paralelo, impedancia de línea con compensación en serie, los tres parámetros conjuntamente (tensión, impedancia y ángulo) o la transferencia de potencia entre líneas, respectivamente. Los interruptores utilizados suelen ser IGBT y las potencias manejadas se encuentran entre las decenas y las centenas de MVA.

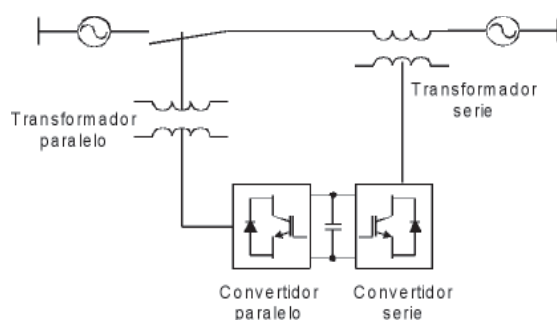


Fig. 13: Esquema básico del controlador unificado de flujo de potencia (UPFC) o acondicionador universal, el equipo FACTS más versátil

En los controladores unificados se ha realizado una notable investigación en topologías que ha conseguido no solo acondicionar la tensión entregada a la carga y la intensidad tomada de línea sino también que, en caso de anulación de la tensión de línea, el circuito se reconfigure como sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) y alimente la parte de

la carga considerada crítica a partir de los condensadores de las barras de continua durante 500 ms (el tiempo máximo de despeje de falta). Véase el primer UPFC reconfigurable a SAI [16] [18] en la Fig. 14.



Fig. 14: Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC), o acondicionador universal, con filtros activos serie (para tensión) y paralelo (para corriente) de 400 kVA. Primer UPFC reconvertible a SAI [16] [18] en caso de fallo total de la tensión de red mediante la reconfiguración de su topología sin recurrir a interruptores estáticos de entrada y de salida. Cortesía de IBERDROLA, proyecto ACCIONE.

También se puede considerar dentro de este grupo de dispositivos los sistemas de transmisión de corriente continua en alta tensión (CCAT o HVDC, de *High Voltage DC transmission*) [27]. El transporte de energía eléctrica a grandes distancias presenta problemas de desfase y caída de la tensión debido a la inductancia de la línea. En el transporte en c.c. no hay caída de tensión en la inductancia y el cable utilizado es menos costoso. El sistema se basa en rectificar la c.a. trifásica, transportarla por un cable (retornando por tierra) o dos de c.c. y convertirla de nuevo en c.a. con un rectificador funcionando como inversor. Los equipos clásicos estaban formados por tiristores asociados en paralelo y en serie, pero ahora han surgido nuevos equipos con mayores prestaciones basados en interruptores IGBT que pueden regular la potencia activa y reactiva independientemente. Mientras los primeros tienen potencias por encima de los 6000 MW, los segundos pueden llegar hasta los 1200 MW.

Al margen de ambos grupos están los conmutadores de transferencia de línea (STS, *Static Transfer Switch*) que procuran el cambio de alimentación sin cortes entre dos líneas de media tensión a instalaciones críticas como hospitales, aeropuertos, industrias con procesos continuos, etc. Se realizan con tiristores con bloqueo forzado (GTO) o estándar con circuitos de bloqueo auxiliares. El principal inconveniente es la asociación serie para hacer frente a la elevada tensión de

línea. La esperada comercialización de semiconductores de alta tensión a base de carburo de silicio simplificará enormemente estos dispositivos.

6.2. PLANTAS SOLARES

En las plantas generadoras solares la *Electrónica de Potencia* se encarga fundamentalmente de extraer la máxima energía de los paneles y de adaptar la tensión continua que generan a las tensiones continuas de uso (caso de plantas domésticas) o a la tensión alterna de la red de distribución (caso de grandes plantas) [28]. La adaptación a continua se realiza mediante convertidores c.c./c.c. tradicionales con transistores, normalmente con aislamiento galvánico entrada/salida para evitar problemas de seguridad personal y protección. Aunque los IGBT se van haciendo presentes en estos convertidores, se siguen prefiriendo los MOSFET cuando la minimización de pérdidas en conducción es preferente. Actualmente se investiga en la reducción de dichas pérdidas mediante el empleo de semiconductores con caída de tensión especialmente baja.

La adaptación a alterna se realiza mediante sencillos inversores no autónomos con tiristores cuando la potencia inyectada a red es relativamente pequeña. Si la potencia relativa es grande se emplean inversores autónomos conmutados en alta frecuencia con IGBT que reducen la distorsión de la corriente inyectada y permiten un completo control de su módulo y fase para reducir los armónicos y ajustar el factor de potencia.

En instalaciones por encima de los 500 kW punta los inversores se suelen separar en módulos paralelo para facilitar la fabricación y aumentar la fiabilidad. La tensión continua suministrada a los inversores por el conjunto de paneles solares depende de la potencia de la instalación y su valor nominal suele estar entre 200 y 1000 V. La inyección a red se realiza en media tensión cuando la planta supera los 500 kW, eliminándose a veces los transformadores del inversor para mejorar el rendimiento. Ello obliga a topologías de inversores multinivel para alcanzar con los IGBT actuales la tensión de línea (entre 15 y 21 kV), Fig. 15.



Fig. 15: Inversor para plantas solares fotovoltaicas Sunny Central HE de 1250 kW conectable a líneas de media tensión. Cortesía de SMA Ibérica Tecnología Solar.

6.3. PARQUES EÓLICOS

La obtención de energía eléctrica a partir de generadores eólicos está creciendo incesantemente. En algunos países, como Dinamarca, alcanza actualmente el 20% de la energía consumida, lo que representa seguramente un porcentaje cercano al máximo razonable teniendo en cuenta la inconstancia de esta fuente. La potencia del generador va desde cientos o miles de vatios en aplicaciones domésticas e industriales pequeñas autónomas de c.c. hasta unos 500 kW en generadores para inyección en la red eléctrica. Existen

aerogeneradores experimentales de 5 MW. Los parques eólicos llegan a cientos de megavatios y en estos contextos los problemas de interacción eléctrica con la red son importantes. En los aerogeneradores pequeños de c.c. la *Electrónica de Potencia* presente consiste en sencillos reguladores de la tensión e intensidad entregada a la instalación que alimentan, normalmente una batería y varias cargas.

En aerogeneradores grandes de c.a. para inyección en red, la *Electrónica de Potencia* cobra importancia debido a que el carácter inconstante de la velocidad del viento hace imposible el empleo de un generador conectado directamente a una red de frecuencia fija (50 o 60 Hz). El generador síncrono se vería afectado de oscilaciones, fatiga mecánica y riesgo de *embalamiento*. El asíncrono puede amortiguar las oscilaciones de par, pero presenta factor de potencia inductivo y alto par de arranque. En la práctica se emplean cuatro tipos de generadores de alterna: generador síncrono de imanes permanentes (*permanent magnet synchronous generator*, PMSG) en el rango de kilovatios, generador de inducción de doble alimentación (*doubly fed induction generator*, DFIG) de kilovatios a megavatios, generador de inducción (*induction generator*, IG) de kilovatios a megavatios y generador síncrono (*synchronous generator*, SG) de kilovatios a megavatios. El generador va acompañado de un convertidor electrónico de potencia que regula la inyección de energía en red y controla las tensiones e intensidades involucradas. Para cada uno de los cuatro posibles tipos de generadores citados el convertidor puede adoptar varias topologías. Para los dos primeros se emplean inversores con tiristores tradicionales e inversores con IGBT conmutados en alta frecuencia. Para el segundo pueden emplearse también convertidores matriciales, aunque “uno de sus principales problemas es que se necesitan 18 interruptores, lo que aumenta el coste en semiconductores del convertidor” ([29] pág. 2378, traducido por los autores). Aunque se investiga en mejoras de los convertidores matriciales mediante topologías multinivel ([30] Fig. 2-6) los problemas de número de interruptores se agravan, pues el número de IGBT necesarios se eleva a 72 de la Fig. 2-6 de [30]. Fig. 16.

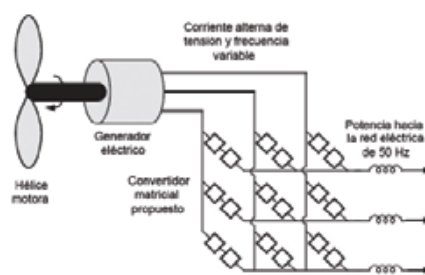
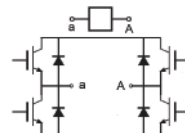


Fig. 16: Arriba: convertidor matricial con topología multinivel para control de aerogeneradores de velocidad variable propuesto por el National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA; modificado a partir de ([30], Fig. 2-6).



Abajo: Cada interruptor señalado por un cuadrado en la figura anterior contiene cuatro diodos de potencia y cuatro IGBT (72 en total) con sus respectivos circuitos excitadores y fuentes flotantes de alimentación ([30], Fig. 2-2).

Aunque los convertidores matriciales son matemáticamente atractivos y su utilidad para control de motores de c.a., entre

otras aplicaciones, aparece inmediatamente, la complejidad de su implementación práctica quedó patente ya en las primeras investigaciones [31], no sólo por el elevado número de semiconductores activos, sino por la necesidad de dotarlos de excitadores flotantes cuya alimentación propicia acoplamientos capacitivos indeseados. Para que estas topologías rindan todo su potencial teórico parece que debe esperarse la aparición de interruptores de estado sólido bidireccionales, rápidos y con excitación simplificada y aislada ópticamente.

6.4. CONTROL DE GRANDES MOTORES ELÉCTRICOS INDUSTRIALES

Grandes motores son aquellos de potencias comprendidas entre 1 y 100 MW alimentados en media tensión. Se aplican en grandes bombas, ventiladores y compresores, así como en cementeras y en minería para moler mineral revolviéndolo con bolas de metal (molinos SAG), Fig. 17 y 18. Se utilizan motores de jaula de ardilla hasta 15 MW a velocidades altas y medias, motores de rotor bobinado hasta 15 MW en velocidades medias y motores síncronos entre 10 y 100 MW en velocidades medias y bajas.

Los motores de jaula utilizan convertidores de frecuencia que controlan el vector de flujo magnético. Las topologías utilizadas son tres:

- Convertidores constituidos por transformador y rectificador de diodos de 12 pulsos e inversor de tres niveles con IGCT asimétricos o de conducción inversa o IGBT de alta tensión operando a 4,16 kV.
- Convertidores formados por transformadores de múltiples devanados que alimentan rectificadores de diodos e inversores con IGBT de baja tensión para su conexión en serie hasta alcanzar la tensión del motor, normalmente de 6 kV.
- Convertidores constituidos por transformador y rectificador controlado por tiristores de 12 pulsos e inversor con IGCT de bloqueo inverso y fuente de corriente que mediante PWM y condensadores obtienen una onda de tensión sinusoidal para alimentación del motor, normalmente a 6 kV.

Los motores de rotor bobinado utilizan los sistemas doblemente alimentados con inversores de IGCT o IGBT controlados en PWM, uno conectado al rotor y otro a la red a través de transformador. Se pueden utilizar con motores de hasta 15 kV ya que operan con la tensión del rotor reducida. El factor de potencia del motor se puede hacer incluso capacitivo.

Los motores síncronos utilizan convertidores con topología formada por transformador y rectificador de 12 pulsos controlado por tiristores e inversor conmutado por la carga (LCI o *Load Commutated Inverter*) operando como fuente de corriente con tiristores. Se aprovecha la característica del motor para sobreexcitarlo y presentar una característica capacitiva que bloquea los tiristores por conmutación natural. Estos motores pueden alcanzar alimentaciones de 15 kV. Hay aplicaciones de baja velocidad, como las cementeras, que utilizan cicloconvertidores con tiristores conmutados por la red. Para potencias muy elevadas (más de 9 MW) se recurre a

inversores en paralelo o motores especiales de doble bobinado estático.

Los convertidores a.c./a.c. matriciales sin restricción con interruptores bidireccionales en tensión y corriente podrían teóricamente aplicarse al control de grandes motores de baja velocidad y motores de rotor bobinado, como los utilizados en minería. Sin embargo, factores tales como la conexión serie de los IGBT e IGCT y sus diodos de bloqueo inverso disponibles hoy, necesaria para hacer frente a la elevada tensión de alimentación, hacen que en la práctica su aplicación sea muy compleja y se desaconseje, por ende, su uso. Los fabricantes, a la espera de semiconductores de potencia de más tensión y control facilitado, prefieren en general mantenerse en los convertidores a.c./a.c. con cicloconvertidores más convencionales con tiristores e IGBT, como puede verse en la reciente recensión [32].



Fig. 17: Instalación de molinos SAG (Semi Autogenous Grinding) de 12 MW (izquierda) y de bolas de 6 MW (derecha) para minería accionados por motores de rotor bobinado en Kansanshi Mine, Zambia. Cortesía de International Electronics, Alcorcón, Madrid.



Fig. 18: Armario de regulación de velocidad para molino de bolas de 6,5 MW con IGCT. Cortesía de International Electronics, Alcorcón, Madrid.

6.5. TRACCIÓN

Se llaman convertidores de tracción los que alimentan los motores impulsores de un tren. Han sufrido una gran evolución en los últimos años y, en su origen, los motores eran de continua y se alimentaban directamente de la catenaria. Controlaban la velocidad intercalando en serie resistencias y variando la conexión serie-paralelo de los motores. La energía producida por estos durante el frenado se disipaba en las llamadas resistencias de frenado. Posteriormente, con la aparición y mejora de los semiconductores de potencia, los motores de continua se alimentaron mediante topologías troceadoras (*chopper*) basadas en tiristores que variaban la tensión del motor. Se comenzó a incluir sistemas de recuperación de la energía de frenado, lo que aumentaba la eficiencia del sistema. [33]-[36].

Hoy los sistemas de tracción suelen basarse en motores de alterna trifásicos asíncronos con rotor en jaula de ardilla alimentados mediante inversores con GTO o IGBT controlados por microprocesadores potentes. Se tiende a usar dichos semiconductores ensamblados en módulos que integran dispositivos de excitación y protección, o módulos inteligentes de potencia (IPM, *Intelligent Power Modules*). Han sido muy empleados los inversores controlados en corriente con GTO.

Nuevas topologías con inversores multinivel y técnicas de control (como el control vectorial) consiguen optimizar la marcha y la recuperación de la energía de frenado reduciendo así la energía disipada en las resistencias.

Los circuitos inversores emplean complejas estrategias de modulación en alta frecuencia para variar la tensión y la frecuencia de la componente fundamental de la tensión de salida, controlando de este modo la respuesta del motor de tracción y manteniendo una baja distorsión de la tensión de salida. En el campo de los semiconductores de tracción se tiende actualmente a utilizar cuantiosamente transistores IGBT y diodos asociados, a medida que aumentan sus corrientes y tensiones de trabajo y disminuyen sus pérdidas de conmutación.

La topología del circuito de conexión del inversor a la catenaria depende de las características de esta. En la catenaria de corriente continua el inversor se puede conectar directamente o a través de un troceador (*chopper*) con objeto de variar la tensión de entrada al inversor dentro de un mayor rango. Con catenarias de alterna su alta tensión se reduce mediante un transformador de entrada. A la salida se conecta un troceador rectificador que a su vez alimenta al inversor trifásico. Incluso es posible prescindir del troceador rectificador empleando modernas topologías derivadas de los convertidores c.a./c.a. matriciales y técnicas de modulación de alta frecuencia. Algunos trenes son capaces de alimentarse de distintas tensiones de catenaria gracias a la reconfiguración de la topología de sus convertidores, Fig. 19. Los equipos de tracción incorporan importantes filtros de entrada para disminuir la distorsión provocada en la línea así como diferentes protecciones.

La potencia total máxima de tracción disponible en los trenes actuales varía desde unos 500 kW con catenaria en continua para algunos metros y tranvías hasta cerca de los 10 MW con catenaria en alterna para ciertos trenes de alta velocidad. El número de convertidores y motores en una unidad tractora depende de la aplicación y los requerimientos de fiabilidad y disponibilidad del servicio.



se consigue mediante una topología reconfigurable muy ingeniosa del convertidor electrónico. Cortesía de Patentes TALGO, Madrid.

6.6. ALIMENTACIÓN DE CATENARIAS

La *Electrónica de Potencia* está presente en la alimentación de las catenarias de trenes eléctricos, ya sean estos de superficie o subterráneos. Las catenarias se pueden dividir en dos tipos

fundamentales: de corriente alterna y de corriente continua.

Las catenarias de corriente alterna se emplean principalmente en trenes de alta velocidad o en largas distancias. Son habituales tensiones de 25 o 50 kV a 50 Hz suministradas por subestaciones conectadas mediante transformadores de potencia a redes cuyo voltaje puede variar entre 132 kV y 400 kV. Entre sus ventajas cabe citar la reducción de pérdidas por efecto Joule, lo que permite un mayor espaciado entre las subestaciones, así como la fiabilidad del sistema debido a su simplicidad. Entre los inconvenientes, las caídas inductivas en la catenaria, entre otros. La *Electrónica de Potencia* tiene poca presencia específica en estos sistemas basados en tecnología eléctrica tradicional, salvo en aspectos de regulación de la tensión.

Por su parte, las catenarias de continua se emplean principalmente en ferrocarriles metropolitanos, así como en líneas de cercanías y de media distancia, con valores típicos de tensión de 600, 750, 900, 1200, 1500 y 3000 V, si bien en países anglosajones es común el uso de tercer carril (600 o 750 V) en lugar de catenaria. Las instalaciones de continua son inherentemente más complejas que las de alterna debido, principalmente, a la inclusión de una etapa rectificadora, que suele estar formada por puentes de Graetz de 12, 18 o 32 diodos, Fig. 20. Inicialmente se emplearon válvulas de vapor de mercurio, de mucho menor rendimiento debido a la mayor caída de tensión en conducción, unos 18 V frente a 1 V en los diodos. El rendimiento actual es excelente debido a esta baja caída de tensión de los diodos de silicio y a su elevada tensión de bloqueo (puede superar los 6000 V) que evita la necesidad de asociación en serie. La elevada intensidad alcanzada en un diodo moderno (puede superar los 6000 A, Fig. 21) reduce la necesidad de recurrir a su asociación en paralelo y simplifica el montaje. La entrada del rectificador se conecta a un transformador de potencia que, a su vez, se engancha a redes de tensión alterna comprendida entre 15 y 40 kV. Tanto en los alimentadores de alterna como de continua son necesarias protecciones y filtros para su correcto funcionamiento.



Fig. 20: Rectificador trifásico de 6 MW para catenaria de ferrocarril de 3000 V con 96 diodos en doble puente y 8 diodos en paralelo por célula. Cortesía de ADIF y CUADRELEC, Madrid.



Fig. 21: Diodos de silicio de recuperación estándar. Llegan a 5500 V y 4700 A, o a 2800 V y 7385 A, con cápsulas de diámetro exterior de 140 mm. Cortesía de ABB.

7. CONCLUSIONES

Hace tiempo que la *Electrónica de Potencia* expande sus aplicaciones a prácticamente todos los campos de la tecnología. Su crecimiento se observa asimismo en los rangos de potencia empleados, llegándose a potencias cercanas a los 7000 MVA (región de potencia reservada en el pasado casi exclusivamente a la electrotecnia pura) como ocurre en los convertidores de conexión de líneas eléctricas de alta tensión en c.c. A todo ello ha contribuido en gran medida el importante desarrollo de los componentes empleados, especialmente en el caso de los interruptores de estado sólido, que han visto elevadas de manera importante tanto su potencia como su rapidez. Los circuitos para control y sus estrategias de aplicación se renuevan constantemente, casi siempre dentro del ámbito de lo digital. Las topologías de los convertidores también se renuevan, aunque más raramente.

El continuo avance en la investigación de la *Electrónica de Potencia* ha favorecido que las recensiones sobre su presente y su futuro sean frecuentes [2]-[6]. En estas páginas, con el fin de ofrecer un panorama menos general que el que presentan otras publicaciones pero que ofrezca al lector un recorrido que abarque la situación actual y las aplicaciones concretas más relevantes en el presente y futuro de la *Electrónica de Potencia*, hemos reunido la experiencia de un grupo de autores que está en contacto directo con las últimas tendencias y hallazgos de buena parte de los campos.

Agradecemos a C. **Piedehierro** la corrección y unificación de estilo de las aportaciones individuales.

8. ANEXO: TABLA DE DENOMINACIONES Y ACRÓNIMOS

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 configurable de puertas)
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)
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)
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)
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)

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] MARTÍNEZ S, GUALDA JA. Electrónica de Potencia – Componentes, topologías y equipos, Madrid, Thomson-Paraninfo, 2006.
- [2] SUDRIÁ A, GALCERÁN S, MONTESINOS D. Electrónica de Potencia, Automática e Instrumentación, nº 361, p. 54-61, abril 2006.
- [3] CALLE N. Electrónica de Potencia: el pujante encuentro entre electrónica, electricidad y el control, Mundo Electrónico, nº 407, p. 24-30, abril 2009.
- [4] BOSE BK. Power Electronics – An Emerging Technology, IEEE trans. on Industrial Electronics, vol. 36, nº 3, p. 403-412, Aug. 1992.
- [5] BLAABJERG F, CONSOLI A, FERREIRA JA, VAN WYK J. The Future of Electronic Power Processing and Conversion, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, nº 1, p. 3-8, Jan./Feb. 2005.
- [6] VAN WYK JD, FERREIRA JA. Some Present and Future Trends in Power Electronic Converters, Proc. IEEE-IECOM'92, vol. 1, p. 9-15, 1992.
- [7] BOSE BK. Power Electronics and Motor Drives Recent Progress and Perspective, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, nº 2, p. 581-588, Feb. 2009.
- [8] GUERRERO MA, ROMERO E, MILANÉS MI, GONZÁLEZ E. Overview of Medium Scale Energy Storage Systems, IEEE Compatibility and Power Electronics CPE2009 International Conference, Badajoz, Spain, p. 93-100, May 2009.
- [9] VERHOEFF A. Basic Forced Commutated Inverters and their Characteristics, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-9, nº 5, p. 601-606, Sep./Oct. 1973.
- [10] MARTÍNEZ S. Clasificación de inversores de potencia con S.C.R., Mundo Electrónico, nº 63, p. 47-58, mayo 1977.
- [11] WOOD P, BAPAT V, PUTKOVICH RP. Study of Improved Load-Tap-Changing for Transformers and Phase-Angle Regulators, EPRI Report EL-6079, 148 pages, Palo Alto, Cal. USA, Nov. 1988.
- [12] EPRI Staff, Study of Improved Load-Tap-Changing for Transformers and Phase-Angle Regulators, EPRI Report EL-6764, 108 pages, Palo Alto, Cal. USA, Apr. 1990.
- [13] MARTÍNEZ S para E. BOAR S.A., "Perfeccionamientos en Equipos Electrónicos para Regulación de Tensión Alterna ...", Patentes Españolas 500.523 (Oct. 1981), 500.524 (Oct. 1981), 522.497 (Oct. 1984).
- [14] MARTÍNEZ S, CAMPO JC, JARDINI JA, VAQUERO J, IBARZÁBAL A, MARTÍNEZ PM. Feasibility of Electronic Tap-Changing Stabilizers for Medium Voltage Lines – Precedents and New Configurations, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, nº 3, p. 1490-1503, July 2009.
- [15] MARTÍNEZ S, BARRERO F, VAQUERO J, CAMPO JC, YEYES F, GUALDA JA. Invención en Electrónica de Potencia – Método con control de costo, Mundo Electrónico, p. 38-46, mayo, 2008.
- [16] MARTÍNEZ S, FELIU V, YEYES F, IRIBARREN JL, MARTÍNEZ P. Dispositif de conditionnement de ligne pour réduire ou éliminer les perturbations", Patent française, nº publication 2.720.560, nº d'enregistrement national 94 06963, priorité 30 août 1996.
- [17] BARRERO F, MARTÍNEZ S, YEYES F, MARTÍNEZ PM. Active Power Filters for Line Conditioning: A Critical Evaluation, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 15, no. 1, pp. 319-325, January 2000.
- [18] BARRERO F, MARTÍNEZ S, YEYES F, MUR F, MARTÍNEZ PM. Universal and Reconfigurable to UPS Active Power Filter for Line Conditioning, IEEE trans. on Power Delivery, vol. 18, nº 1, p. 283-290, Jan. 2003.
- [19] Mc MURRAY W, SHATTUCK DP. A Silicon-Controlled Rectifier Inverter with Improved Commutation, AIEE Transactions, vol. 80, part I, p. 531-542, 1961.
- [20] Mc MURRAY W. Survey of Controlled Electronic Power Converters, IFAC Symposium, Düsseldorf, p. 39-62, Oct. 1974.
- [21] BURDIO JM, MARTÍNEZ A. A Unified Discrete-Time State-Space Model for Switching Converters, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 10, nº 6, p. 694-707, Nov. 1995.
- [22] CAMPO, J. C., VAQUERO, J., PÉREZ, M. A., MARTÍNEZ, S., Dual-Tap Chopping Stabilizer with Mixed Seminatatural Switching. Analysis and Synthesis, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 20, nº 3, p. 2315-2326, July 2005.
- [23] VAQUERO J, CAMPO JC, MONTESO S, MARTÍNEZ S, PÉREZ MA. Synthesis of Fast Onload Multitap-Changing Clamped-Hard-Switching AC Stabilizers, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 21, nº 2, p. 862-872, April 2006.
- [24] YAN-FEI, LIU PC. Digital Control of Switching Power Converters, IEEE Conference on Control Applications, vol. 1, p. 635-640, Toronto (Canada), August 2005.
- [25] REDOUTEY J. How to improve operating reliability of transistorized equipments, Thomson-CSF, France, 1982.
- [26] GRÜMBAUM R. FACTS para mejorar la eficacia y la calidad de los sistemas de transmisión de corriente alterna, DYNA, vol. 83, nº 9, p. 525-530, dic. 2008.
- [27] ASPLUND G, CARLSSON L, TOLLERZ O, 50 años de ... HVDC, DYNA, vol. 79, nº 3, pp. 23-28, abril 2004.
- [28] GIMENO FJ, SEGUI S, ORTS S. Convertidores electrónicos: Energía solar fotovoltaica. Aplicaciones y diseño, Universidad Politécnica de Valencia, 2002.
- [29] BAROUDI JA, DINAVAH V, KNIGHT AM. A review of power converter topologies for wind generators, Elsevier Ltd-ScienceDirect-Renewable Energy, 2007.
- [30] ERICKSON R, ANGKITITRAKUL S, AL-NASEEM O, LUJAN G. Novel Power Electronics Systems for Wind Energy Applications, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA, Oct. 2004.
- [31] DEL VALLE JC. Optimización de las técnicas de control de motores de inducción trifásicos mediante la utilización de un cambiador de frecuencia sin restricción, Tesis doctoral dirigida por P. Martínez, Universidad Politécnica de Madrid, 1986.
- [32] HILLER M, SOMMER R, BEUERMANN M. Medium-Voltage Drives – An overview of the common converter topologies and power semiconductor devices, IEEE Industry Application Magazine, March/April 2010, p. 22-30.
- [33] FAURE R. La tracción eléctrica en la alta velocidad, Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2004.
- [34] SANSONE G. New York Subways, Baltimore, Ed. Johns Hopkins, 2004.
- [35] GONZÁLEZ FJ, FUENTES J. Ingeniería ferroviaria, Madrid, UNED, 2006.
- [36] ARENILLAS J. La tracción en los ferrocarriles españoles, Madrid, Vía Libre, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Canales y Puertos, 2008.