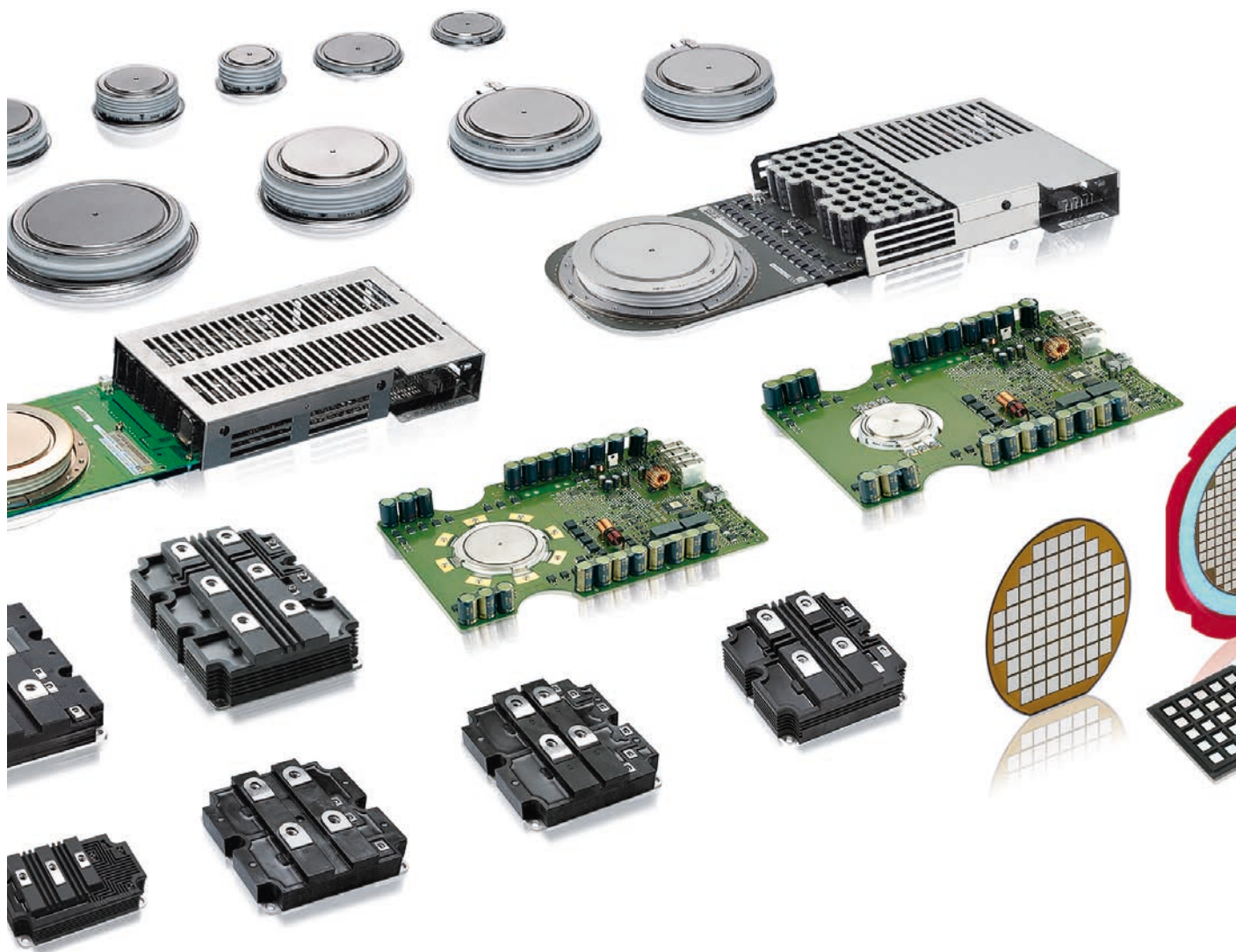




La desmitificación de los semiconductores

Parte 1: Los chips en el corazón de la cambiante red eléctrica

CLAES RYTOFT, BERNHARD ESCHERMANN, HARMEET BAWA, MARK CURTIS – ABB lleva varias décadas fabricando semiconductores de alta potencia. Estos componentes básicos conforman el núcleo de numerosas tecnologías de vanguardia de ABB, como los sistemas de transmisión de corriente continua de alta tensión (HVDC) y los accionamientos de velocidad variable. Gracias a su inversión en instalaciones altamente especializadas en Lenzburg, Suiza, ABB ha sido capaz de desarrollar y fabricar sofisticados dispositivos semiconductores de potencia. Estas instalaciones ofrecen a ABB la ventaja exclusiva de poder aplicar los dispositivos más adecuados para su cartera, en continua expansión, de productos basados en la electrónica de potencia.

La electrónica de potencia surge con el descubrimiento de los semiconductores e identifica un cambio importante de tecnología hacia interruptores electrónicos de estado sólido* como un medio para modificar la electricidad.

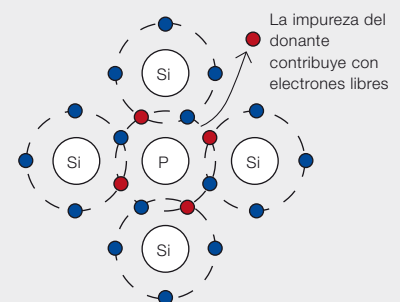
Los semiconductores, como el silicio, tienen propiedades eléctricas que se encuentran en un punto situado entre un buen conductor (por ejemplo, el cobre) y un aislante (por ejemplo, la goma). Si se colocan en un circuito actúan la mayor parte del tiempo como aislantes, formando una barrera para el flujo de electrones, aunque a veces, en ciertas condiciones (temperatura elevada, exposición a campos electromagnéticos, etc.), se comportan más como conductores, permitiendo que los electrones circulen libremente. La conductividad de un semiconductor puro, a menudo llamado semiconductor intrínseco o tipo-I → 1a, puede cambiarse drásticamente añadiendo otros elementos, conocidos como impurezas, con lo que se forma un cristal nuevo y diferente en un proceso que se denomina "dopado". Los dopantes utilizados para los semiconductores de base de silicio tienen una valencia de tres o cinco electrones, que es uno menos o uno más que los cuatro del silicio.

Al añadir pequeñas cantidades de fósforo, por ejemplo, con una valencia de cinco, las propiedades de un semiconductor de tipo I varían de forma que se introducen más electrones libres, ya que su quinto electrón permanece desparejado. Esto crea un exceso de portadores de carga electrónica negativa que da lugar a la creación de un cristal de tipo n → 1b. Estos electrones de unión débil se pueden mover de forma relativamente libre en la red del cristal lo que puede facilitar la conducción en presencia de un campo eléctrico. De forma similar, si se añaden pequeñas cantidades de boro, con una valencia de tres, se vuelven a modificar las propiedades de un semiconductor de tipo I. Esta vez, sin embargo, es el cuarto electrón del silicio el que permanece no saturado cuando se une por covalencia con el boro dopante. Las uniones no saturadas se reparan con electrones de las uniones adyacentes, dejando "agujeros" positivos o regiones de tipo p en el semiconductor → 1c. El proceso continuo de reparación crea una reacción en cadena que da lugar a que los agujeros de carga positiva se muevan por el cristal. La corriente se puede producir, tanto por el flujo de los electrones de carga negativa como por el de

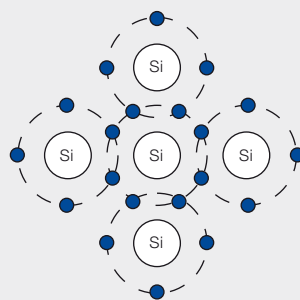
"agujeros" de carga positiva, por la red del cristal del material semiconductor. Ambos semiconductores, tanto los de tipo n como los de tipo p, se comportan como aislantes por debajo de un umbral de tensión y se oponen al paso de la corriente, pero por encima de este umbral se comportan como conductores y permiten que la corriente circule libremente. La conductividad de estos semiconductores de tipo n o de tipo p se puede variar entre aislante y conductor según el nivel de dopante que se incorpora en la red del silicio. Para controlar la dirección y la magnitud de la corriente necesaria para que el semiconductor pase de aislante a conductor, se pueden colocar semiconductores de tipo n y de tipo p adyacentes en el mismo cristal, formando una unión en la que los electrones de carga negativa del semiconductor de tipo n llenan los agujeros resultantes del emparejamiento no saturado del semiconductor de tipo p. Esto crea una unión delgada de semiconductor no conductor de tipo I en la frontera entre los semiconductores más conductores de tipo p y tipo n. Para que la unión conduzca, hay que disponer una fuente externa de tensión que supere esa barrera no conductora. Cuando se manipula esta unión no conductora p-n, se pueden controlar las propiedades eléctricas del dispositivo. La propiedad y la disposición de esos semiconductores dopados proporcionan el elemento clave que condujo al desarrollo del transistor que es ahora el componente básico de todos los modernos dispositivos electrónicos de estado sólido.

Nota a pie de página

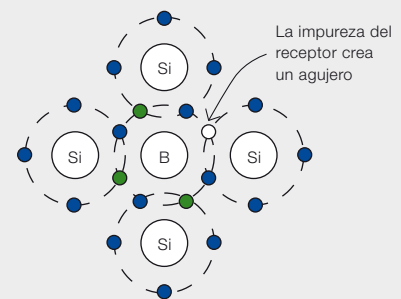
* Circuitos o dispositivos creados en su totalidad con materiales sólidos, sin piezas mecánicas móviles.



1b Semiconductor de tipo n; se añade fósforo como impureza



1a Semiconductor de tipo I, sin impurezas añadidas



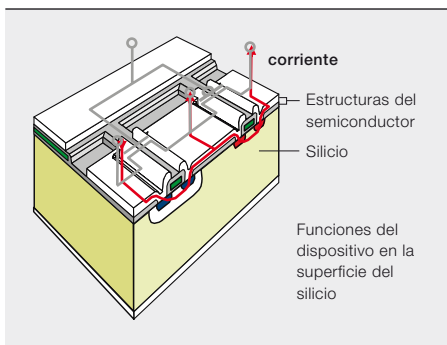
1c Semiconductor de tipo p; se añade boro como impureza

La electrónica de potencia contempla la conversión y el control de la electricidad mediante dispositivos de conmutación de estado sólido → 1. En los últimos años, los avances en la tecnología de semiconductores de potencia han dado lugar a una creciente diversidad de aplicaciones. Los efectos adversos del calentamiento global, fruto de la combustión de combustibles fósiles, han desempeñado un papel fundamental en el mayor uso de las tecnologías de semiconductores de potencia destinadas a utilizar la generación de energías renovables y a aumentar la eficiencia energética.

Incluso en los primeros días de la electricidad, la eficiencia del transporte energético repercutía sobre el tipo de electricidad dominante, es decir, la corriente continua (CC) o la corriente alterna (CA). Inicialmente, por razones históricas, los sistemas eléctricos eran predominantemente circuitos de CC. Sin embargo, la imposibilidad de modificar los niveles de tensión de la CC limitó su uso por aquel entonces. Así pues, se construyeron generadores que respondieran a la demanda de carga en el circuito (por ejemplo, al nivel de tensión requerido para el alumbrado o los motores). Una transmisión de poco rendimiento a esas bajas tensiones exigía que los generadores se encontraran a poca distancia de los consumidores.

El consiguiente desarrollo de generadores y transformadores de CA proporcionó la

2 Semiconductores utilizados en la electrónica de consumo



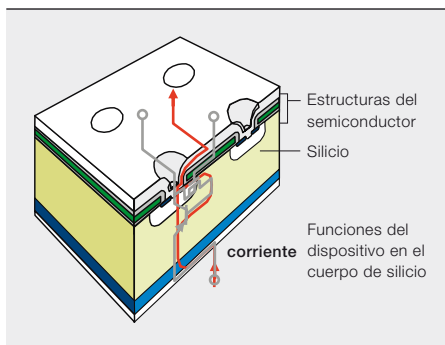
tecnología necesaria para poder pasar a 110 kV o más, lo que facilitó el transporte eficaz de la electricidad a larga distancia. Esto implicaba que ya no había necesidad de que los generadores estuvieran cerca de los usuarios finales, ni de que los niveles de tensión se correspondieran con el tipo de carga conectada a sus circuitos (ya que se podían utilizar transformadores reductores para modificar la tensión y adaptarla a la carga). Estos primeros desarrollos tecnológicos desempeñaron un papel crucial a la hora de determinar la naturaleza y la arquitectura del transporte de la electricidad y los sistemas de distribución.

En las últimas décadas, los avances en la tecnología de semiconductores han representado un fuerte impacto en la arquitectura de los sistemas eléctricos que funcionan en todo el mundo.

Hoy, los sistemas eléctricos deben atender a nuevas exigencias, como una eficiencia energética y una sostenibilidad mayores, si bien los avances tecnológicos siguen ejerciendo una importante influencia en su evolución.

En las últimas décadas, los avances en la tecnología de semiconductores han representado un fuerte impacto en la arquitectu-

3 Semiconductores utilizados en la electrónica de potencia



ra de los sistemas eléctricos que funcionan en todo el mundo. Entre las innovaciones que han sido posibles gracias a esas tecnologías se incluyen el transporte masivo eficiente de la energía eléctrica en forma de corriente continua de alta tensión (HVDC), la introducción de accionamientos de velocidad variable que permiten ahorrar energía, la conversión de CA de una frecuencia a otra distinta (50/60 Hz o 50/16,6 Hz) mediante convertidores de frecuencia, y la introducción de los FACTS (sistemas flexibles de transporte de CA) para mejorar el control y aumentar la capacidad de transporte de energía de la red.

Dispositivos semiconductores

Actualmente, la gran mayoría de los dispositivos semiconductores se utilizan en el sector de la electrónica de consumo, en productos como ordenadores, reproductores de DVD, teléfonos móviles, electrodomésticos y videojuegos. Este tipo de productos funcionan generalmente en los márgenes del nanovatio y el milivatio. La miniaturización de estos dispositivos sigue avanzando y ganando en complejidad, de forma que los circuitos integrados actuales, conocidos como microchips, contienen cientos de millones de conmutadores que funcionan al nivel del nanovatio. Normalmente se consigue que estos dispositivos funcionen configurando la superficie del material semiconductor → 2.

Por otra parte, actualmente se utilizan numerosos semiconductores de baja potencia para modificar la forma de la energía eléctrica (es decir, para modificar su tensión o su frecuencia), como:

- Los convertidores CC/CC que se encuentran en la mayoría de aparatos móviles (por ejemplo, los teléfonos móviles o los reproductores de mp3). Mantienen la tensión en un valor fijo, con independencia del nivel de carga de la batería.

- Los convertidores CA/CC (rectificadores) que se utilizan cuando se conecta un aparato electrónico a la red (como ordenadores, televisiones o consolas de videojuegos).
- Los convertidores CA/CA que se utilizan para modificar la tensión o la frecuencia. Se encuentran en los adaptadores eléctricos internacionales, interruptores para regulación de la luminosidad, etc.
- Los convertidores CC/CA (inversores) utilizados, por ejemplo, para alimentar aparatos de CA de un coche desde una batería de CC.

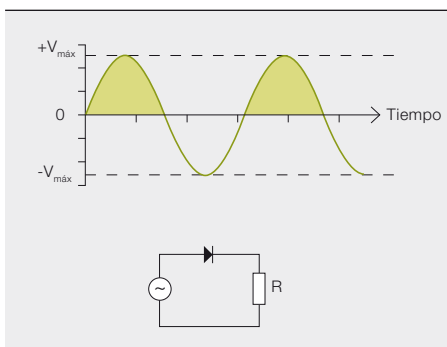
En la actualidad, se pueden utilizar dispositivos semiconductores similares para modificar la energía eléctrica en la gama de potencias de los megavatios. Suelen ser de silicio y todo su volumen interviene a la hora de cortar o conducir la corriente → 3. Generalmente, estos dispositivos son menos visibles para los usuarios finales que sus homólogos miniaturizados del sector de la electrónica de consumo, aunque modifican la tensión y la frecuencia de la misma manera, sólo que a escala industrial, constituyendo sólidos conmutadores de alta potencia que están en estado de “conducción” (on) o “aislamiento” (off).

Aunque la electrónica de potencia constituye un segmento relativamente pequeño del mercado de los semiconductores, el rápido crecimiento de la demanda de dispositivos semiconductores de alta potencia de los últimos cinco años ha contemplado aumentos significativos al aparecer nuevas aplicaciones para esta tecnología. ABB es un líder mundial en la fabricación y el desarrollo de dispositivos de semiconductores de alta potencia y se encuentra en una posición única para ampliar el alcance de las aplicaciones en toda una gama de productos que aumentan el rendimiento energético.

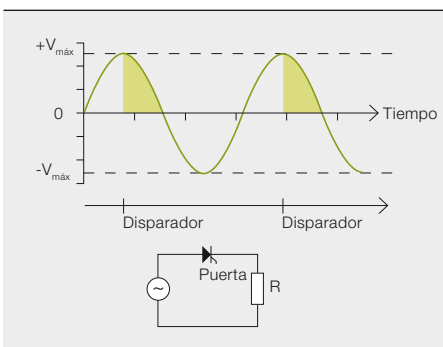
Dispositivos semiconductores de potencia

Los dispositivos semiconductores de potencia aparecieron por vez primera a principios de los años cincuenta, por ejemplo, con el diodo semiconductor de 7 kW. Este dispositivo mantiene la circulación de corriente eléctrica en una dirección (llamada la dirección directa del diodo) y la bloquea en el sentido opuesto → 4. Las empresas matrices de ABB, ASEA y BBC, se percataron inmediatamente del potencial de los semiconductores para la electrónica de potencia y desempeñaron un papel desta-

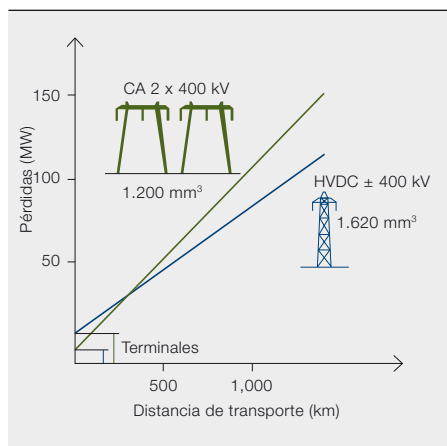
4 Un rectificador de un solo diodo



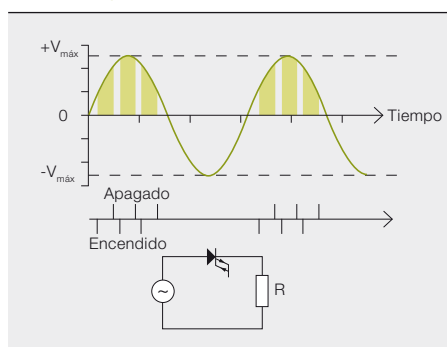
5 Un tiristor activado por un disparador y desactivado en el punto de paso por cero



6 Comparación de las pérdidas de transporte en líneas aéreas de 1.200 MW de CA y HVDC



7 Un tiristor de apagado por puerta se puede activar y desactivar a alta frecuencia



cado en su desarrollo y fabricación a partir de 1955. Los diodos semiconductores proporcionaron los primeros rectificadores de estado sólido. Los diodos de alta tensión iniciales fabricados por las sociedades matrices de ABB se utilizaron para convertir la CA en CC en las plantas de electrólisis para la producción de aluminio. Estos esfuerzos pioneros de ASEA y BBC ayudaron

A finales de la década de 1950, se creó un nuevo semiconductor bipolar, conocido como tiristor. Es similar a un diodo porque bloquea la corriente eléctrica en sentido inverso, pero impide también el flujo de la corriente en el sentido directo a menos que se le active para ello. De esta forma, la potencia (o corriente) que se suministra a una carga puede controlarse activando la con-

ductancia en una determinada fase de la forma de onda. Una vez activado, el tiristor permanece "on", pasando a "off" una vez por ciclo cuando la corriente cae al siguiente punto de paso por cero → 5. Una vez activado, el tiristor se comporta básicamente como un diodo. Puesto que los tiristores son

línea de transmisión HVDC del mundo en 1954, que suministraba 20 MW a 100 kV a la isla de Gotland, a una distancia de 96 km. Aunque este sistema utilizaba en sus inicios exclusivamente rectificadores de arco de mercurio, las estaciones de conversión se complementaron en 1970 con válvulas de tiristores, que estaban conectadas en serie con las válvulas de arco de mercurio, lo que elevaba la tensión a 150 kV, y la capacidad de transporte a 30 MW. Actualmente, los sistemas HVDC Classic (con tiristores conectados en serie) pueden transportar 6.400 MW de potencia a varios miles de kilómetros, lo que supone un método eficiente de transporte de energía eléctrica desde fuentes lejanas de generación a centros activos de población. Una línea de transporte HVDC sufre menos pérdidas que las líneas de CA optimizadas para la misma potencia. Por supuesto, hay que añadir las pérdidas en las estaciones convertidoras, pero puesto que son sólo de aproximadamente el 0,7% de la potencia transmitida en cada estación, las pérdidas totales del transporte HVDC resultan menores que las pérdidas en CA cuando se trata de distancias superiores a un cierto valor (por ejemplo, unos 500 km en tendidos aéreos) → 6. Además, el sistema

ABB, a través de sus empresas matrices ASEA y BBC, se percató del potencial de los semiconductores para la electrónica de potencia y ha desempeñado un papel destacado en su desarrollo y fabricación a partir de 1955.

a ABB en su avance para consolidar su liderazgo mundial en el ámbito de los dispositivos semiconductores de alta potencia.

capaces de cortar el paso de la corriente a niveles de MW, se pueden utilizar para convertir la CA en CC y la CC en CA para la transmisión HVDC. ASEA instaló la primera



Semiconductores de potencia en ABB

Dispositivos	Conjuntos	Aplicaciones
		- HVDC - FACTS - Convertidores eólicos - Accionamientos para motores - Rectificadores - Convertidores para ferrocarril - Sistemas de excitación - Movilidad eléctrica

8 Planta de semiconductores de Lenzburg



Datos de la fábrica	Producción desde 1978 (bipolar), se añadió BIMOS en 1997; la ampliación continúa; está previsto que se termine para 2010/ 2011, y que tenga unos 500 empleados
Línea de producción	Bipolar Fabricación de obleas de BIMOS Fabricación de módulos de BIMOS
Especialización	Bipolar (PCT [tiristores controlados por fase], IGCT, diodos, GTO), gama 1,6 kV - 8,5 kV Fabricación de obleas de BIMOS (diodos, chips IGBT), gama 1,2 kV - 6,5 kV Línea de módulos IGBT (HiPaks, StakPaks), gama 1,7 kV - 6,5 kV Conjuntos de potencia pulsada

HVDC es la única solución práctica para conexiones por cable submarino a más de 70 km.

Aunque los tiristores montados en serie pueden funcionar en un margen de varios miles de MW, otro tiristor similar único se puede utilizar en el margen de los 10 MW para modificar la alimentación de tensión y corriente a través de un accionamiento de media tensión y controlar eficientemente la velocidad de un motor industrial. Se estima que las aplicaciones movidas por motores eléctricos representan el 65% de todo el consumo industrial de energía. Sin embargo, una parte importante de esta energía se pierde actualmente con los métodos despilfarradores utilizados para regular su velocidad. Al modificar la tensión y la frecuencia mediante electrónica de potencia, se puede ajustar la velocidad de un motor de CA con pérdidas muy inferiores. Las aplicaciones típicas con accionamientos de velocidad variable pueden reducir el consumo de energía entre un 30% y un 50%.

Posteriormente, la tecnología de semiconductores permitió desarrollar un tiristor de desconexión por puerta (GTO), que se puede apagar en un punto arbitrario de la forma de onda, con lo que se consigue un mayor control de la potencia de salida → 7. Estos dispositivos son habituales en los convertidores de frecuencia utilizados para modificar la frecuencia de la red eléctrica nacional a fin de adaptarla a la frecuencia eléctrica utilizada por los ferrocarriles eléctricos y metropolitanos. Los dos primeros

convertidores de frecuencia modernos que utilizaron GTO, de 25 MVA nominales cada uno, entraron en servicio en Giubiasco, Suiza, en 1994. Se han utilizado en todo el mundo numerosos dispositivos similares para modificar la electricidad suministrada por la red y acomodarla a las necesidades de las compañías de transporte por ferrocarril eléctrico.

No mucho tiempo después del desarrollo del GTO, apareció un dispositivo mejorado conocido como tiristor conmutado por puerta integrada (IGCT). Estos dispositivos, al igual que los GTO, pueden conmutar entre "on" y "off", pero dado que sus tiempos de apagado son mucho más rápidos, pueden trabajar a mucha mayor frecuencia que los GTO. Pueden soportar mayores valores de subida de tensión y sufren menores pérdidas por conducción. Actualmente hay en todo el mundo miles y miles de accionamientos con IGCT. El IGCT es un componente integrado simple que puede conmutar la electricidad a alta tensión y está revelándose como un elemento clave para los compensadores estáticos de var¹ y otros componentes de las redes eléctricas.

Hace dos décadas, una variante aparentemente simple del MOSFET de potencia de silicio (transistores metal-óxido-semiconductor de efecto campo) empezó a cambiar el panorama de la electrónica de potencia con la creación del transistor bipolar de puerta aislada (IGBT). En 1997, ABB empezó a invertir en una instalación para la fabricación de obleas para IGBT en Lenz-



burg → 8. El IGBT destaca por su elevado rendimiento y rapidez en la conmutación (conmuta entre “on” y “off” varias veces por ciclo) y se basa en la tecnología BiMOS (semiconductor bipolar-metal-óxido). Estos dispositivos se pueden montar de diversas maneras para modificar la tensión o la frecuencia de la energía eléctrica en diversas aplicaciones, desde los sistemas de transporte de electricidad HVDC Light® → 9, hasta los accionamientos de velocidad variable de baja tensión → 10. Tanto los accionamientos de velocidad variable como el HVDC Light precisan topologías de rectificadores y convertidores. Sin embargo, al igual que en todas las aplicaciones, la forma en que se montan los dispositivos semiconductores determina la potencia a la que pueden trabajar.

Los distintos tipos de dispositivos semiconductores y la forma en que se montan definen su idoneidad para una determinada aplicación. Cada dispositivo se prepara, no sólo para que conserve su integridad y sus prestaciones, sino también para garantizar un funcionamiento seguro y una larga vida útil en condiciones duras de trabajo. La familia de ABB de módulos IGBT HiPak™ se utiliza en el difícil entorno de los mercados de tracción e industrial. Se espera que estos módulos funcionen en una amplia gama de temperaturas y humedad o en condiciones de vibraciones o golpes fuertes. Además, deben soportar ciclos térmicos extremos. Los módulos HiPak se utilizan para tracción, accionamientos y turbinas eólicas. Otro conjunto IGBT, el StakPak™, es exclusivo de ABB y

resulta muy adecuado para la conexión fiable en serie de los diversos módulos IGBT necesarios para las aplicaciones de alta tensión.

Los semiconductores de potencia constituyen un elemento clave para un número creciente de productos y sistemas de ABB que desempeñan un papel fundamental en casi todas las aplicaciones eléctricas, ya que permiten que los accionamientos controlen eficientemente motores desde los 10 W a los varios cientos de MW. Además, permiten el transporte de energía eléctrica hasta 6 GW a través de líneas HVDC a 800 kV. Hacen posible que los trenes, grúas y ascensores se desplacen con suavidad, y permiten que se conecten a la red las fuentes de energía renovables, como turbinas eólicas y grandes centrales hidroeléctricas. Hasta los sistemas de radar que emiten impulsos de alta energía dependen de los semiconductores de potencia para controlar con seguridad el tráfico aéreo. El destacado papel de ABB en el diseño, desarrollo y producción de semiconductores ha sido determinante para asentar su liderazgo mundial en el suministro de convertidores de electrónica de potencia para diversas aplicaciones. La continua expansión de ABB en sus instalaciones suizas, así como la adquisición de Polovodice a.s., un fabricante de semiconductores de la República Checa, pone de relieve su empeño en reforzar esta posición destacada y en mejorar la eficiencia energética y la productividad en una amplia variedad de industrias. Este artículo constituye una introducción a la electrónica de potencia y es el primero



de una serie sobre la importancia de los semiconductores para ABB y la industria eléctrica.

Claes Ryttoft

Director de Technology Power Systems
ABB Power Systems
Zurich, Suiza
claes.rytoft@ch.abb.com

Bernhard Eshermann

Director de Power Semiconductors
ABB Power Systems
Lenzburg, Suiza
bernhard.eschermann@ch.abb.com

Harmeet Bawa

Director de Communications
Power Products and Power Systems
Zurich, Suiza
harmeet.bawa@ch.abb.com

Mark Curtis

Autor y editor
ABB Review
Zurich, Suiza
mark.curtis@ch.abb.com

Nota a pie de página

- 1 Un compensador estático de var es un dispositivo que normalmente está formado por condensadores conmutados con tiristores, reactancias controladas por tiristores y filtros armónicos, que se utiliza para inyectar o absorber energía reactiva a fin de mejorar la estabilidad de la tensión.