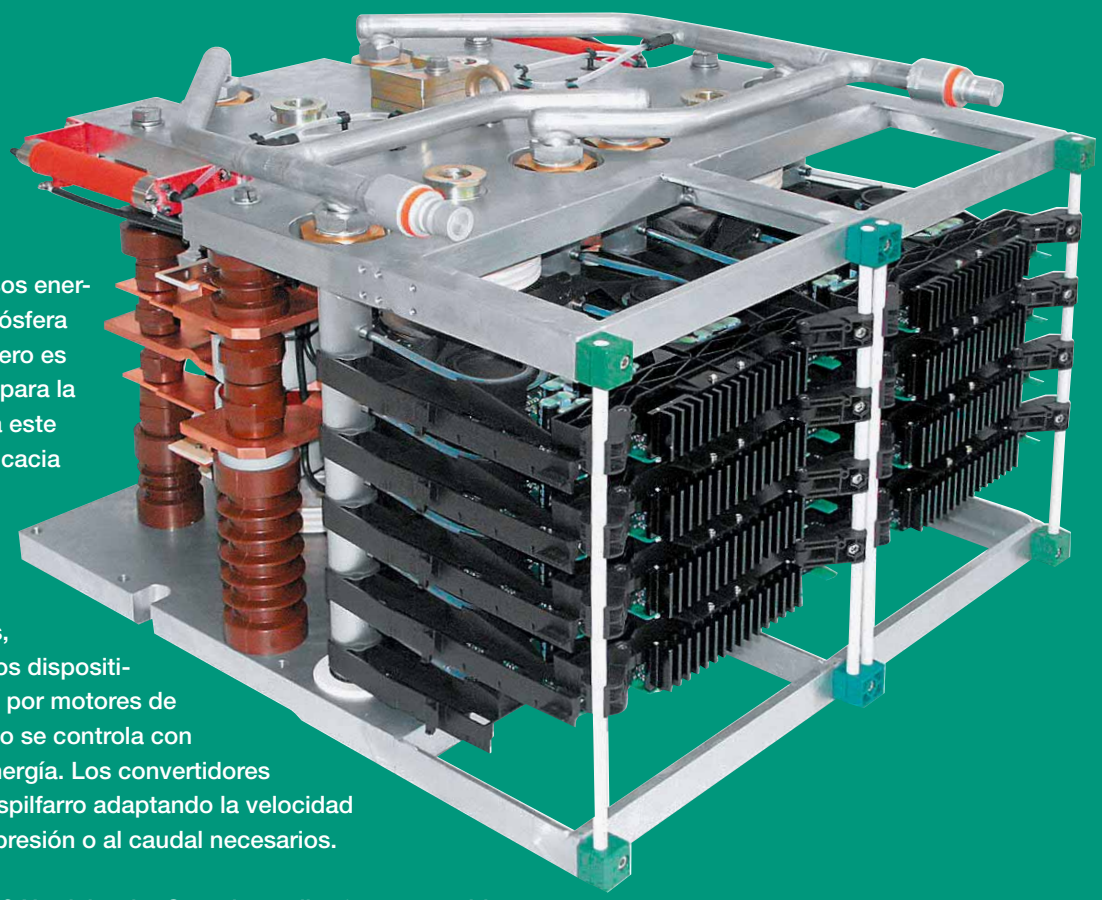
Un mayor nivel de eficacia

Convertidores de frecuencia de cinco niveles para media tensión

Pieder Jörg, Gerald Scheuer, Per Wikström



El agotamiento de los recursos energéticos y la emisión a la atmósfera de gases de efecto invernadero es una preocupación creciente para la humanidad. ABB responde a este problema promoviendo la eficacia energética.

Un área con gran potencial de ahorro es la de los motores que mueven ventiladores, bombas y compresores. Estos dispositivos suelen estar accionados por motores de velocidad constante, y el flujo se controla con métodos que despilfarran energía. Los convertidores de frecuencia evitan este despilfarro adaptando la velocidad del motor exactamente a la presión o al caudal necesarios.

¿Se resuelve así el problema? No del todo. Cuando se diseñan convertidores de frecuencia para media tensión hay que resolver dos problemas básicos: alcanzar la tensión del motor y aproximarse a una tensión sinusoidal ideal. La solución innovadora de ABB reside en la recombinación de soluciones ya existentes para resolver ambos problemas.

Una configuración de cinco niveles crea cinco niveles de salida en vez de los dos o tres usuales. Este paso aporta una mejora considerable a la forma de la onda, consiguiendo al mismo tiempo una mayor tensión de salida. Y para culminar el logro, esta innovación se apoya esencialmente en conceptos ya probados, lo que reduce el riesgo y potencia la fiabilidad.

Las estrategias clásicas de control de caudal suelen fundarse en métodos de regulación despilfarradores. Para usar una analogía sencilla, es como conducir un coche colocando un ladrillo en el pedal del acelerador (admisión fija) y empleando el pedal del freno para controlar la velocidad (mando basado en la fricción). Los convertidores de frecuencia son como los pedales de acelerador del control del motor, y tienen un enorme potencial de ahorro de energía.

Los motores consumen alrededor del 30% de toda la energía eléctrica que se produce en el mundo. Unas tres cuartas partes de todos los motores mueven bombas, ventiladores o compresores en aplicaciones en que se puede reducir el consumo de energía mediante el control de la velocidad. Una estimación de ABB indica que la adopción en todo el mundo de dichos convertidores de frecuencia para los motores de media tensión puede ahorrar 227 TWh, en otras palabras, la potencia suministrada por 144 centrales de combustible fósil o el consumo total de energía de un país como España[1].
En la actualidad, menos del 10% de los motores vendidos cada año están equipados con el control de régimen más eficaz existente: el convertidor de frecuencia. A pesar de ser asimismo el medio de control de motores que exige menos mantenimiento, los clientes siguen prefiriendo en la mayoría de los casos otras formas de control. ¿Por qué? Los inconvenientes que se indican con más frecuencia frente a la adopción de esta tecnología son:
a) fiabilidad,
b) armónicos,
c) coste o condiciones de recuperación de la inversión muy estrictas.

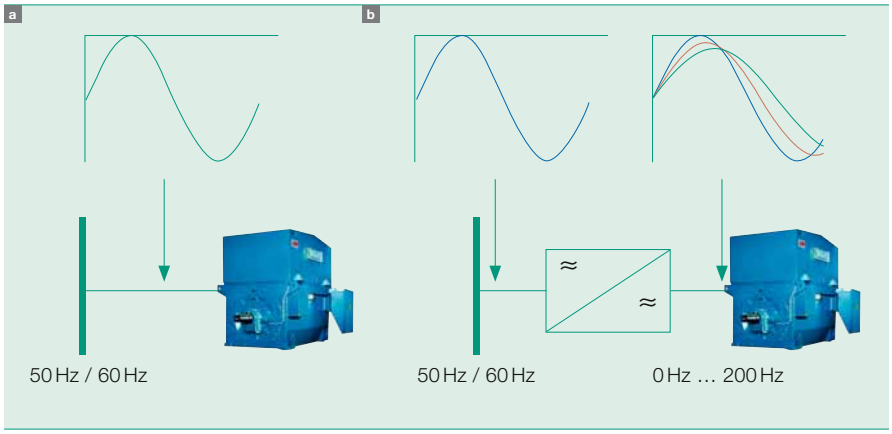
Los innovadores interruptores de cinco niveles de ABB tienen en cuenta todas estas dificultades.

Mejores formas de onda, mayores tensiones

La electricidad producida de forma clásica mediante un generador síncrono entrega una tensión de salida de forma sinusoidal. Los motores eléctricos que se conectan directamente a la red (conexión directa en línea) y que trabajan por tanto a velocidad fija están optimizados para este tipo de forma de onda. Si hay que utilizar el mismo diseño de motor para una aplicación de velocidad variable, el convertidor de frecuencia debe suministrar una forma de onda que esté tan próxima a la forma sinusoidal ideal como sea posible. Las desviaciones respecto a la forma de onda ideal producen un calentamiento añadido del motor. A su vez, esto significa que no se puede utilizar el motor a su máxima potencia y que deben disminuirse sus características. Otra consecuencia negativa es que la superposición de un par irregular puede ocasionar oscilaciones torsionales en la cadena de transmisión y en la maquinaria.

Además, los motores se presentan en categorías de tensión normalizadas. Para la gama de motores de media tensión (MV) de hasta 7000 kW, las tensiones que se encuentran con más frecuencia en plantas industriales son de 6 kV/50 Hz y 4 kV/60 Hz. Esto significa que para utilizar la misma gama de motores en conexiones directas en línea 1a y con convertidores de frecuencia 1b, la salida de éstos debe poder alcanzar valores de tensión similares. Dichas tensiones de salida no son fáciles de alcanzar con los convertidores clásicos de dos y tres niveles, ya que su tensión de salida máxima viene determinada por las características de tensión de los semiconductores de potencia.

1 Un motor conectado directamente "on line" a y con un convertidor de frecuencia entre la red principal y el motor b.

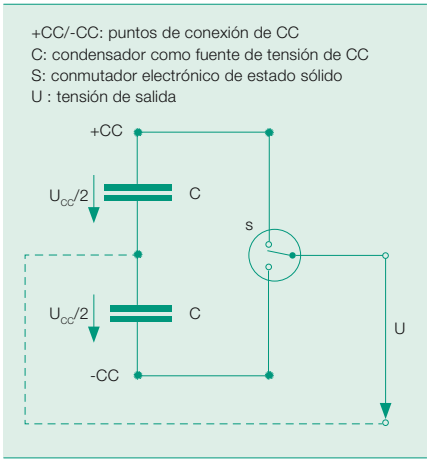


El interior del circuito de un convertidor de frecuencia

En un convertidor, la conversión de energía se realiza en dos etapas: en la primera, el suministro de energía en forma de una tensión sinusoidal de frecuencia fija y amplitud constante se "rectifica" a tensión de CC o intensidad de CC. Esta magnitud en CC se "invierte" en una segunda etapa a tensión o intensidad de CA, de frecuencia y amplitud variables. Tanto la parte del rectificador como la del inversor se obtienen mediante circuitos electrónicos dotados de conmutadores electrónicos. Este artículo está dedicado principalmente a la tecnología de esta segunda etapa, el inversor.

Casi todos los convertidores de ABB son del tipo denominado inversores de fuente de tensión (VSI). 2 muestra la

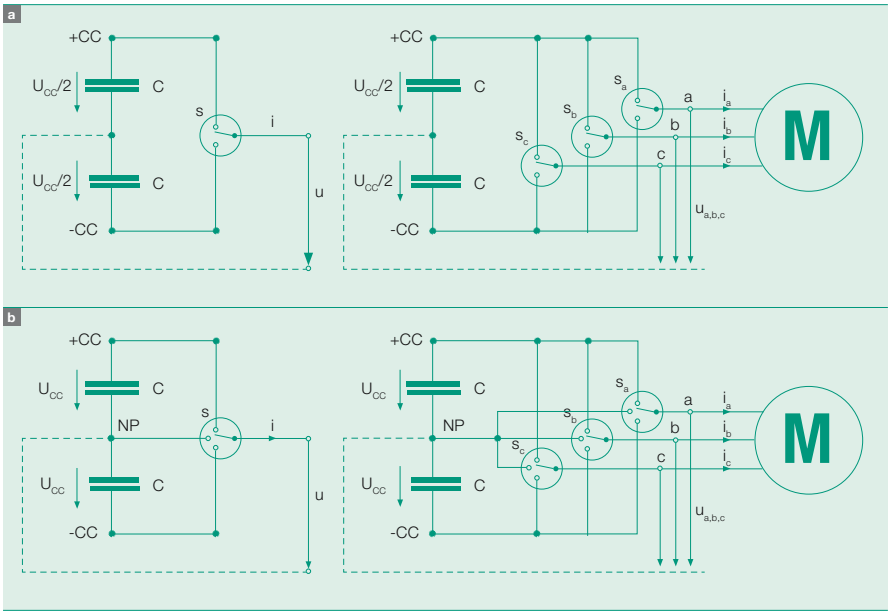
2 Representación de fases de un inversor de fuente de tensión de 2 niveles por medio de un conmutador ideal, alimentado por una fuente de tensión de CC.



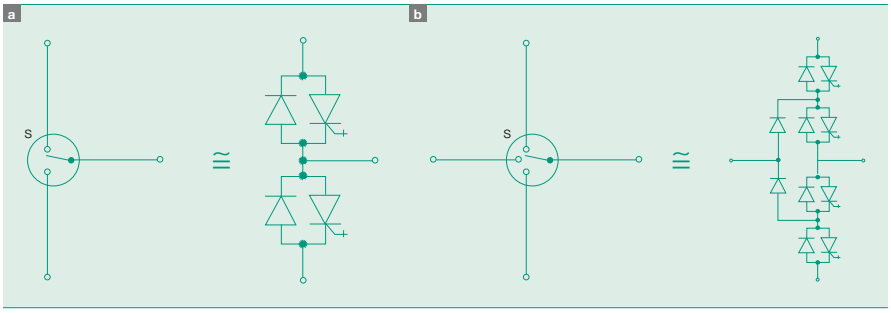
Nota a pie de página

[1] Véase asimismo **Wikstroem, P., Tolvanen, J., Savolainen, A., Barbosa, P.**, "Accionamientos eficientes y ahorro de energía", *Revista ABB 2/2007*, páginas 73–80 (especialmente las páginas 74–76).

3 Inversor de dos niveles con condensador dividido a e inversor de tres niveles b (esquemas de concepto).



4 Aunque los conmutadores de los convertidores se suelen representar como contactos simples (izquierda), en realidad integran una gran cantidad de componentes semiconductores (derecha). a presenta una rama de fase de dos niveles y b su equivalente de tres niveles.



topología más sencilla de un VSI: una sola fase de la salida del inversor de frecuencia se conecta alternativamente a uno u otro polo de un gran condensador de CC. Este es el objeto del circuito rectificador (que no se muestra) que asegura que este condensador permanece cargado con una tensión de CC fija. Si hay que producir una tensión de CA, el interruptor del circuito inversor debe cambiar las posiciones (es decir, cambiar la tensión de salida) al menos una vez cada medio ciclo. Si, por ejemplo, se requiere una salida de 50 Hz, el interruptor debe cambiar a cada una de sus dos posiciones al menos 50 veces por segundo.

En la práctica, el interruptor suele "bascular" mucho más rápidamente. Se utiliza un controlador digital para dirigir su estado de conmutación. La estrategia de conmutación de este controlador determina no solamente la frecuencia, sino también la tensión media en la carga. Estos niveles se modifican ajustando el valor de entrada de esta unidad según se desee. Esta estrategia de control se conoce como "modulación del anchura de impulso (PWM)".

En realidad, el interruptor no es un contacto móvil como sugiere el diagrama, sino que está constituido por semiconductores de potencia 4a. El desarrollo y la capacidad de dichos interrupto-

Cuadro 1 Semiconductores: 50 años de desarrollo de conmutación.

ABB ha establecido y mantenido en los pasados 50 años una posición de vanguardia en el campo de la electrónica de potencia. Los convertidores de frecuencia para motores son una parte esencial de esta rama de actividad.

Los conmutadores electrónicos constituyen el núcleo de cualquier convertidor de frecuencia. La historia de la aparición de la conmutación de cinco niveles se aborda mejor mediante una breve revisión de cómo han evolucionado estos dispositivos.
El lector que haya seguido su desarrollo durante el tiempo suficiente recordará que los primeros motores eléctricos de alta potencia se basaban en tiristores conmutados en línea. Estos tiristores pueden diseñarse para corrientes y tensiones de bloqueo elevadas (las versiones actuales llegan a valores de 8–10 kV). Su principal inconveniente es que se pueden conmutar en cualquier punto, pero no pueden desconectarse (permanecen activados hasta que un efecto exterior hace que deje de circular la corriente). Esta característica limita las posibles estrategias de conmutación y, en consecuencia, la idoneidad de dichos circuitos desde el punto de vista de la calidad de la energía (véase la conmutación de dos niveles en 7a).

Los convertidores que utilizan estos conmutadores producen armónicos de gran magnitud y frecuencia relativamente baja. Estos armónicos causan problemas tanto por el lado de la alimentación como por el del motor. Además, el factor de potencia en el lado de la red varía con el margen de utilización del convertidor de frecuencia. Los problemas en el lado de la línea se han resuelto con la utilización de filtros. Los problemas en el lado del motor se acometen dimensionando el motor para que soporte el calentamiento extra y diseñando el eje y los acoplamientos según los requisitos exigidos por las oscilaciones de torsión. En su momento, esto se consideró aceptable porque no había otra solución. De hecho, sigue siendo la solución preferida para aplicaciones de muy alta potencia (20 MW y más) a causa de su fiabilidad. Sin embargo, con la aparición de nuevos componentes de conmutación se pueden incorporar nuevas topologías que proporcionan formas de onda de la tensión mucho más aproximadas a la sinusoidal ideal. Los nuevos componentes, todos ellos transistores optimizados de distintas formas, tales como los IGBT (transistores bipolares de puerta aislada) y los IGCT (tiristores conmutados de puerta integrada), se caracterizan por que se pueden desconectar arbitrariamente.

res ha dependido, desde la aparición de estos convertidores, del progreso de los semiconductores de potencia Cuadro 1.

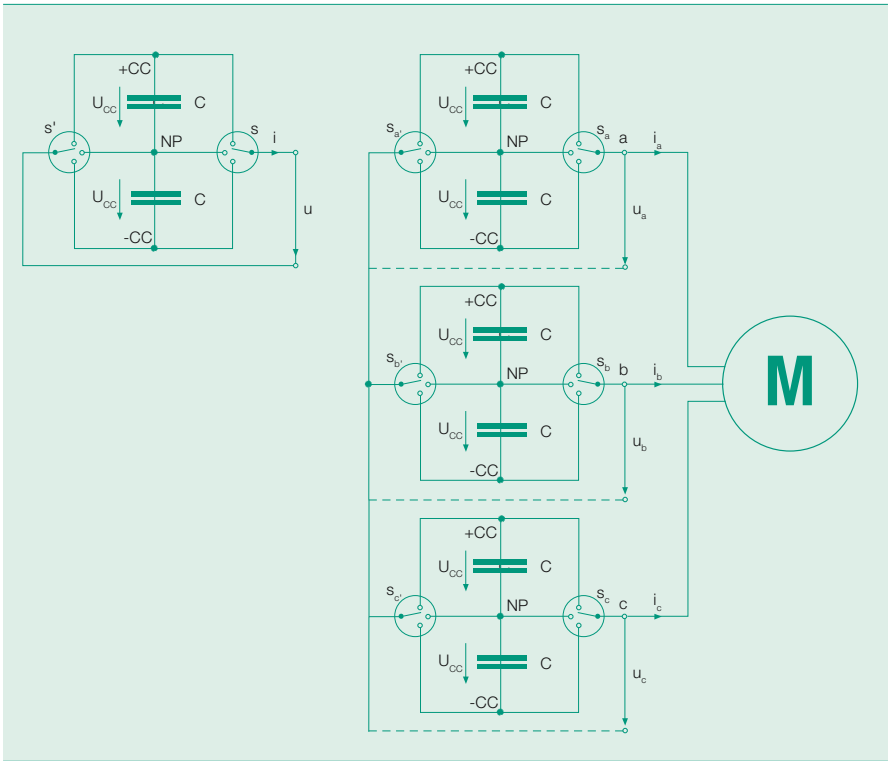
Listo para el siguiente nivel

Aunque la forma de onda de la tensión del VSI de dos niveles que aparece en 7a se puede variar en amplitud y frecuencia por medio de la PWM, la forma de la salida está lejos de ser sinusoidal. Como consecuencia, la distorsión armónica de corriente y, por tanto, las pérdidas añadidas y la producción de calor resultante en el motor, son elevadas. Una forma de hacer más aceptable la forma de onda de la tensión es introducir más niveles de tensión. Para presentar otra sencilla analogía, esto es similar a aumentar la resolución de un monitor de ordenador para hacer más nítida la imagen.

Otra razón para abandonar la configuración de dos niveles es que la mayor tensión de salida que puede obtenerse con la topología VSI de dos niveles y semiconductores de potencia modernos es 2,3 kV. Esto no es suficiente para la gama estándar de motores de media tensión.

La topología con dos condensadores y un interruptor electrónico de tres posiciones, que se denomina también inversor de tres niveles a causa del número de combinaciones de tensión de salida por fase, ya era conocida desde hace algún tiempo. 3b muestra un esquema conceptual con un interruptor de tres posiciones. Este circuito tiene que conmutar cualquiera de los tres puntos de conexión de los condensadores a la salida de ambas direcciones de la corriente[2]. ABB ha normalizado para

5 Concepto del nuevo inversor de fases de cinco niveles (izquierda) y el accionamiento por motor trifásico con tensión entre fases de nueve niveles.



6 El convertidor ACS 5000 de ABB utiliza una tecnología de cinco niveles, que suministra al motor una tensión entre fases de nueve niveles.

unos valores concretos de tensión e intensidad este interruptor electrónico de tres posiciones 4b como un Power Electronic Building Block (PEBB) (componente básico de electrónica de potencia). Esta normalización aporta la ventaja de que se utiliza el mismo componente básico en distintas aplicaciones, lo que permite a ABB acumular experiencia práctica mucho más rápidamente y así afinar el diseño para proporcionar mayor fiabilidad al cliente.

Durante casi una década se han utilizado estos componentes básicos para distintos productos y sistemas, incluidos convertidores para motores de régimen variable (por ejemplo, ACS 1000 y ACS 6000), sistemas de almacenamiento de energía y sistemas de calidad de la energía.

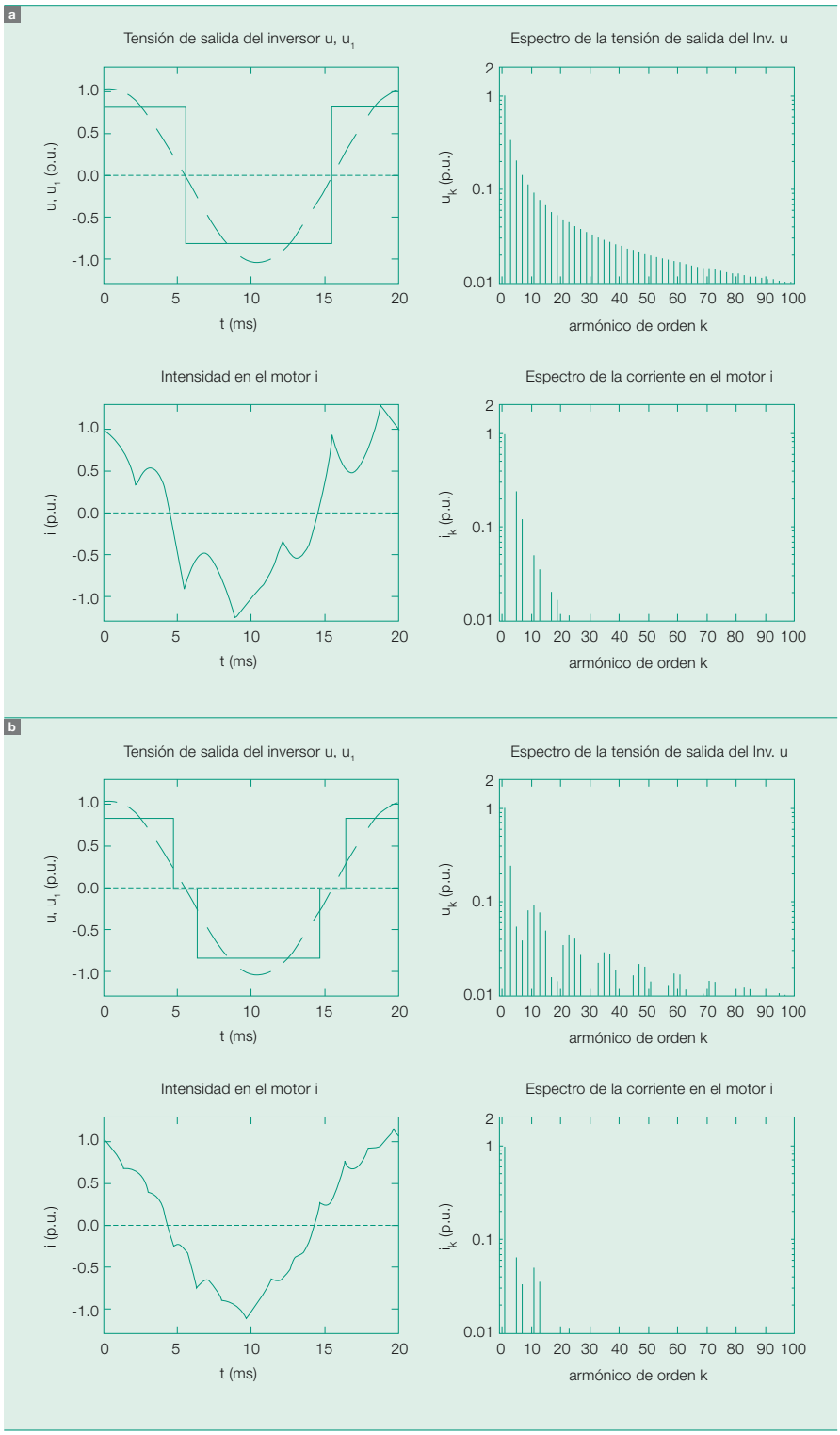
Aumentar el número de niveles mejora drásticamente la forma de onda.

La evolución a los cinco niveles

Durante cierto tiempo se han estudiado teóricamente combinaciones de mayor número de condensadores y circuitos electrónicos cada vez más complejos. Sin embargo, normalmente estas sugerencias no se ajustaban a las tecnologías asentadas de almacenamiento de energía en condensadores, ni eran compatibles con las propiedades de los conmutadores de semiconductores que ofrecía el mercado. Además, tales soluciones apenas permitían el aprovechamiento de los componentes básicos existentes, y sus valores de fiabilidad eran discutibles a causa de su gran número de componentes.

Para la última incorporación a su familia de motores de media tensión, el ACS 5000, los ingenieros de ABB retornaron a productos basados en tiristores clásicos, como los cicloconvertidores y, teniendo en cuenta los de tres niveles existentes de 4b, llegaron a una solución sorprendentemente sencilla para un producto con cinco niveles de tensión de salida (y por tanto, nueve

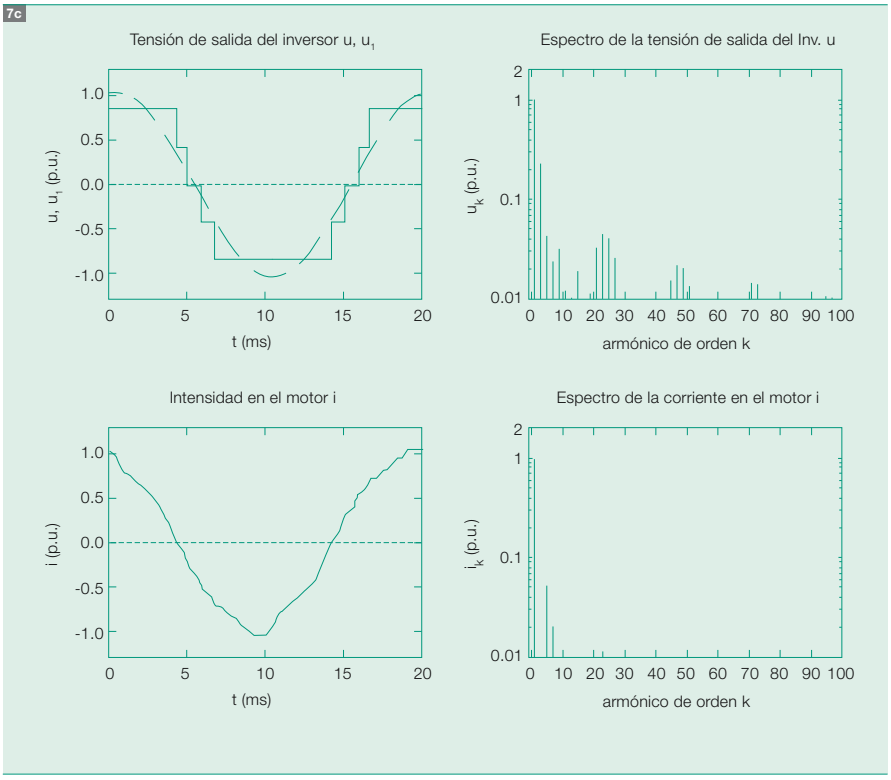
7 El aumento de niveles desde dos a y tres b hasta cinco c mejora enormemente la forma de onda, incluso para la mínima frecuencia de conmutación, tal como se muestra.



Cuadro 2 Gama de productos de accionamiento de ABB.

ABB, proveedor de convertidores de primera categoría, ofrece la gama completa de accionamientos de velocidad variable para aplicaciones en la gama de potencias de 0,12 kW a más de 100 MW.

La compañía atiende a instalaciones y clientes industriales en los campos de las industrias cementeras, de minería y minerales, químicas, petroleras y gasísticas, marinas, metalotécnicas y papeleras. Para más información, visite www.abb.com/drives.



Un componente básico de electrónica de potencia de cinco niveles se desliza fácilmente dentro del accionamiento gracias a unos carriles.

niveles entre fases) 8. Esto se logró aplicando la muy probada tecnología de tres niveles con relación al punto central del sistema eléctrico, independientemente para cada fase.

El circuito conceptual 5 se deduce de los componentes básicos idénticos existentes S y S', respectivamente.

La conocida tecnología de inversor de tres niveles se ha reutilizado en una configuración innovadora.

¿Por qué cinco niveles?

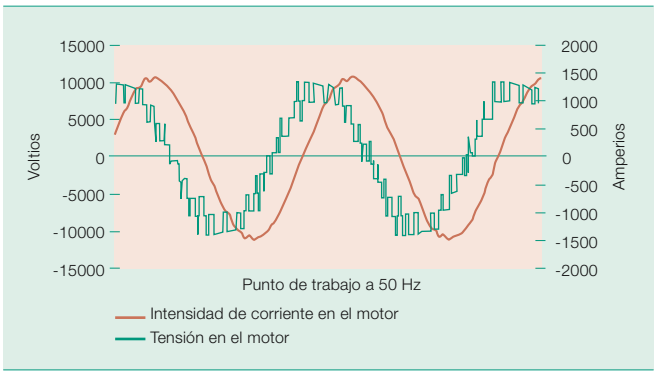
Se compara la forma de onda de la tensión entre fases de un inversor de dos niveles y de uno de tres con la del nuevo convertidor de cinco niveles 7c. El inversor de cinco niveles utilizado en el ACS 5000 6 entrega una tensión de nueve niveles entre fases al motor 8. Simplemente observando la forma de onda se hace evidente que el nuevo inversor de cinco niveles produce una salida que se aproxima mucho más a la onda sinusoidal ideal. De hecho, el resultado es tan convincente que ahora es posible utilizar motores diseñados para la conexión directa en línea sin necesidad de rebajarlos de características. Esto constituye actualmente la solución óptima para un convertidor de 6 kV.

¿Sería la adición de más niveles de conmutación un objetivo para nuevas mejoras de la forma de onda? Esas tentativas aumentarían considerablemente la complejidad sin aportar ventajas proporcionales. En particular, la fiabilidad del accionamiento se degradaría debido al mayor número de componentes.

Soluciones probadas

ABB ha descubierto una forma sorprendentemente sencilla de crear formas de onda de la tensión próximas a la sinusoidal con un convertidor de frecuencia basado en gran parte en componentes ya existentes y probados. La tecnología bien demostrada del inversor de tres niveles se vuelve a utilizar en una configuración innovadora que proporciona cinco niveles de tensión por fase, o incluso nueve niveles entre fase y fase. La nueva utilización de componentes básicos de la electrónica de potencia permite conseguir estas excelentes formas de onda de la salida con una fiabilidad probada. Se consigue el objetivo buscado de utilizar motores estándar para lograr una eficacia elevada con pocos componentes.

8 Utilizando un convertidor de cinco niveles, la tensión de salida alcanza nueve niveles entre fases.



Pieder Jörg
Gerald Scheuer
Per Wikström
ABB Switzerland Ltd.
Turgi, Suiza
pieder.joerg@ch.abb.com
gerald.scheuer@ch.abb.com
per.wikstroem@ch.abb.com

Nota a pie de página

[2] La mayoría de los dispositivos semiconductores de alta potencia pueden conducir la corriente en un solo sentido.