

# Simplificación del control del motor mediante silicio

Por Georges Tchouangue y Frank Thimm de Toshiba Electronics Europe

**TOSHIBA**

www.toshiba-components.com/

Los motores trifásicos de corriente continua sin escobillas (BLDC) se usan cada vez más para diseñar dispositivos industriales y domésticos que atiendan las demandas de funcionamiento de alta precisión y alta eficiencia. Tradicionalmente, la implementación del control BLDC ha sido compleja y ha supuesto una fuerte inversión de tiempo, lo que requiere combinar diseño de hardware y recursos de programación de software. Ahora, sin embargo, tal como Georges Tchouangue y Frank Thimm de Toshiba Electronics Europe explican, los avances en las tecnologías de los microcontroladores y las técnicas para integrar lógica de control y capacidades de controladores de alta tensión en un solo chip pueden ayudar a simplificar estos diseños.

Sin escobillas, los BLDC no presentan ninguna fuente importante de pérdidas ni fricciones eléctricas, que reducen considerablemente la eficiencia de los motores con escobillas. El ruido perceptible suele ser menor, y la ausencia de chispas e interferencias electromagnéticas (EMI) puede mejorar la seguridad y reducir los costes para cumplir con el reglamento de compatibilidad electromagnética (EMC). También se observa una mejora significativa del ciclo de vida útil y de la fiabilidad.

Se trata de ventajas primordiales para los diseñadores de aparatos domésticos que, por ejemplo, deben cumplir con exigencias duras de coste y tiempo de llegada al mercado, mientras a la vez alcanzan el máximo índice de eficiencia energética y ofrecen al cliente beneficios adicionales como un funcionamiento más silencioso. También son importantes para los diseñadores de equipos, tales como máquinas herramienta, sistemas de automatización industriales, sistemas robóticos y numerosas aplicaciones de uso general que incorporan bombas o ventiladores.

Además, el motor BLDC se puede sellar, ya que las bobinas son estacionarias y se pueden refrigerar por conducción sin necesidad de que circule el aire. Esto simplifica el uso de los motores en equipos que se pueden sumergir en líquidos o se utilizan en entornos húmedos o polvorientos. En la práctica, al usar un BLDC en lugar de un motor con escobillas, es posible lograr una solución técnicamente superior en casi cualquier aplicación. Sin embargo, el coste y la complejidad de un sistema de control adecuado han restringido hasta ahora su uso a unas aplicaciones de gama relativamente alta.

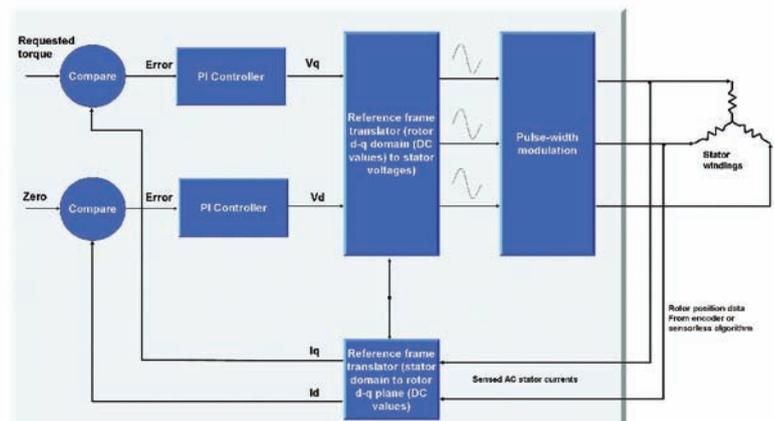
## Control del motor en tiempo real

Como el motor BLDC no se monta con conmutador ni escobillas, se debe calcular en tiempo real la señal de corriente óptima para cada fase del estator. La finalidad última es producir un campo de estator neto en cuadratura con el campo del rotor para así maximizar el par motor y evitar tensiones en el cojinete del rotor. La corriente necesaria depende de la posición del rotor, que se puede detectar usando sensores discretos como dispositivos de efecto Hall o mediante implementaciones sin sensor basadas en las mediciones de la corriente del rotor.

La función subyacente contenida en cualquier unidad de control sin sensor compara la corriente del rotor con el par motor deseado y aplica una función proporcional integral (PI) a la señal de error resultante para generar una señal de corrección. A continuación, esta señal se modula por ancho de pulso y se usa para controlar el puente de salida del controlador del motor. La aplicación de una forma de onda de corriente sinusoidal a las bobinas del estator confiere fluidez al par motor, pero necesita que se calcule el valor deseado de corriente de estator rápidamente nada más detectarse la posición del rotor. Una forma de onda sinusoidal, más que una onda trapezoidal, también minimiza los armónicos, lo que lleva a mejorar la eficiencia energética y evita que se distorsione la red eléctrica.

A velocidades de rotor altas, el cómputo puntual de la corriente del estator depende del ancho de banda de la función PI. El control de campo orientado (FOC), o control vectorial, supera las limitaciones de velocidad del control sinusoidal al manipular las corrientes y las tensiones del motor con referencia a los ejes directo y de cuadratura del rotor. Esto se alcanza garantizando que el campo del estator se mantenga constante y en cuadratura con el campo del rotor independientemente de las limitaciones de ancho de banda de los controladores PI.

Figura 1. El FOC para motores BLDC mejora la respuesta del motor y el par motor en una amplia gama de velocidades.



La figura 1 ilustra el principio del FOC. Las corrientes detectadas del estator se traducen en componentes directos (D) y en cuadratura (Q) del rotor mediante una función de transformación. Para lograr el máximo par motor, las corrientes D y Q se comparan luego, respectivamente, con cero y con el par motor solicitado por la aplicación. Las señales de error resultantes son entradas para los dos bloques PI, que generan señales en el plano de referencia D-Q. Estas se deben transformar en el dominio del estator para generar la señal PWM para cada fase del estator.

Como las entradas a las funciones PI son constantes, el FOC mantiene una alta eficiencia a todas las velocidades del rotor independientemente de cualquier limitación en el ancho de banda del controlador PI. Sin embargo, para realizar el FOC en tiempo real se necesita una ejecución rápida de las funciones que transforman primero las señales de corriente detectadas del estator en el dominio del rotor y, acto seguido, transforman los valores PI estáticos en señales de control de tensión para el puente de salida.

### Los microcontroladores de control de motor

El núcleo del procesador ARM® Cortex™-M3 de 32 bits ha introducido un estándar de microcontrolador (MCU) global que permite a los titulares de su licencia —vendedores de microcontroladores— aportar más prestaciones, aumentar la conectividad y mejorar la eficiencia energética a un menor coste. Toshiba usa este núcleo en su familia de MCU para permitir soluciones de control del motor rentables. La serie TPM380, por ejemplo, presenta un ARM Cortex-M3 con frecuencias de funcionamiento de hasta 40 MHz y supone una opción rentable para llevar a cabo el FOC en software.

Para racionalizar aún más el desarrollo del controlador de motor, el TPM370 implementa una tecnología de controlador de motor programable (PMD3+) y un motor vectorial (VE) que aportan funciones clave de FOC al hardware. El traspaso del control de motor a estas funciones del hardware deja libre

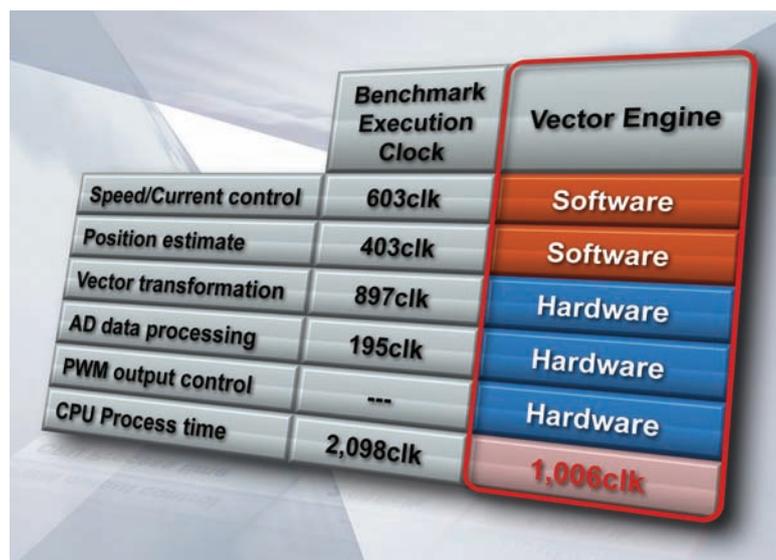


Tabla 1. Al trasladar cálculos del FOC al hardware, aumenta el rendimiento y se liberan ciclos de CPU para las tareas a nivel de aplicación.

el núcleo ARM para gestionar otros elementos del diseño incorporado.

El bloque PMD3+ implementa un generador PWM de tres fases, un controlador de tiempo muerto, un circuito de protección y una red de sincronización. Trabajando en conjunto con estas funciones, el VE mejora el control del motor de forma eficaz al actuar como coprocesador y aliviar la carga de la CPU principal. Dentro del bloque VE, un planificador para el control de eventos y procesos prioritarios, un núcleo de cómputo y decodificador,

una unidad de operaciones, una unidad MAC (multiply-accumulate) y módulos de control vectorial gestionan el procesamiento de la entrada de corriente trifásica desde el ADC del MCU y ejecutan el algoritmo para el FOC.

Cuando el MCU funciona a 80 MHz, el tiempo de procesamiento total del bloque VE es de tan solo 7,5 μs, mucho más rápido que la mayoría de MCU de alta velocidad sincronizados a la misma velocidad, pero que ejecutan la operación vectorial en software. La tabla 1

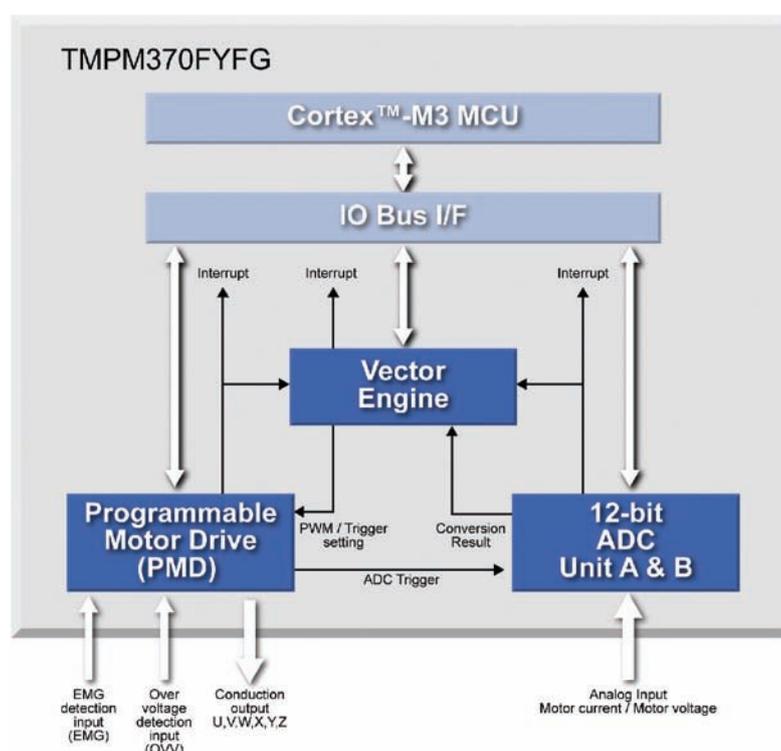


Figura 2. El hardware VE y el PMD3+ simplifican el desarrollo del control de motor.

Figura 3. Los dispositivos de potencia inteligentes (IPD) integran las funciones esenciales de control de motor BLDC, realimentación, protección y control.

muestra el número de ciclos de reloj para llevar a cabo un bucle FOC completo e indica una reducción considerable del número de ciclos si el procesamiento es asistido por el motor vectorial.

En conjunto, el bloque de dos canales PMD3+ y el VE de canal único gestionan todas las funciones necesarias para controlar un motor, incluyendo la generación de forma de onda PWM de tres fases con una resolución de 16 bits, control de velocidad y cálculo de posición, y necesita solamente un ajuste de registro único. El MCU también integra un ADC de 12 bits con tiempo de conversión de  $2 \mu s$ , que proporciona una conversión analógico-digital de alta velocidad con sincronización de PWM. La figura 2 muestra estos bloques funcionales para el control de motor implementado en la serie TPM370. Además, se incluye un comparador en la placa para detectar las condiciones de parada de emergencia.

Además de alojar los algoritmos FOC, un MCU de control de motor adecuado debe proporcionar otras prestaciones varias que sirvan para simplificar el diseño, como el apoyo al autocontrol que ayuda a los diseñadores a cumplir con estándares de seguridad obligatorios como el IEC 60730. A diferencia de la ma-

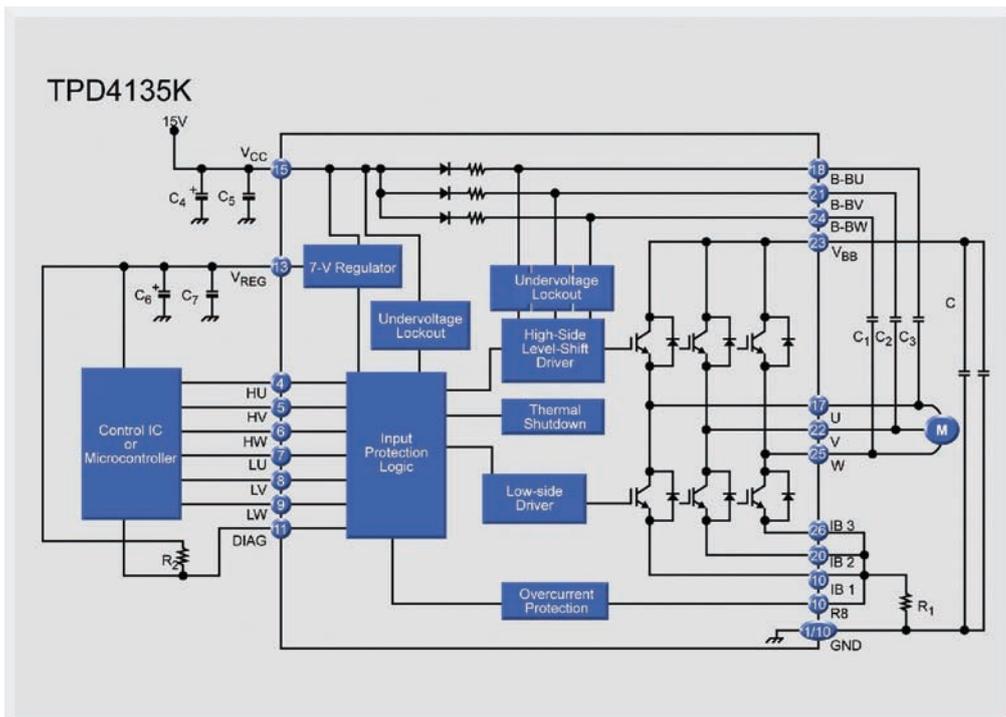


yoría de diseños para el consumidor, puede también existir la necesidad de que sean compatibles con el funcionamiento a 5 V (en lugar de 3,3 V).

Las funciones de autocontrol son una característica inestimable de los MCU que se usan en aparatos domésticos para ayudar a que el sistema gestione las condiciones de fallo con seguridad. Esto incluye la detección de fallos por atasco tipo "stuck at" en la CPU y la memoria, que se puede implementar con eficacia en el software. La detección de actividad anormal

del reloj es otra técnica útil para verificar el funcionamiento correcto del procesador, pero su implementación en software requiere mucho tiempo y también ocupa considerables recursos de la CPU. A fin de simplificar el control del reloj, el detector de frecuencia de oscilación de Toshiba (OFD), que se incorpora tanto la familia TPM370 como a la TPM380, implementa circuitería en el hardware para generar una señal de reinicio para el MCU si la frecuencia de oscilación de reloj detectada supera la gama especificada.

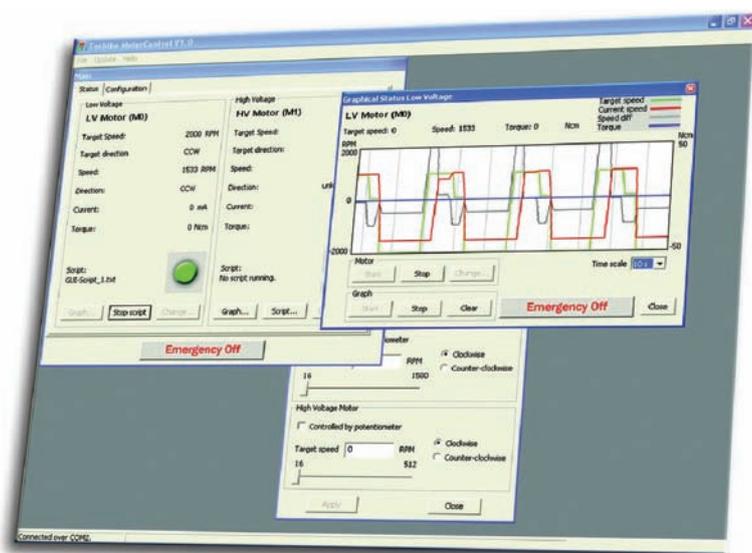
Figura 4. Módulo de evaluación que combina un MCU de control de motor de 32 bits y un dispositivo de potencia inteligente.



## Potencia inteligente para los BLDC

Las formas de onda calculadas por el algoritmo FOC se suelen aplicar a las bobinas del rotor a través de un inversor y un puente. Para los motores trifásicos, el puente comprende seis IGBT o MOSFET de potencia con valores nominales de tensión y corriente adecuados. La integración de estas funciones, así como de dispositivos de regulación y protección, en un módulo de potencia en un solo chip puede suponer una contribución valiosa para acelerar el proceso de diseño y reducir los costes de montaje y el tamaño físico, a la vez que aumenta la fiabilidad.

Mediante el uso de la tecnología de silicio sobre aislante (SOI) para aislar la circuitería de control y los dispositivos de potencia fabricados en el mismo sustrato, un



dispositivo de potencia inteligente, como el Toshiba TPD4135 (figura 3), proporciona un circuito integrado de control de motor de chip único que se puede conectar entre un MCU, como el TMPM370, y un motor BLDC trifásico. La tecnología SOI aporta múltiples ventajas sobre las técnicas de aislamiento de empalmes convencionales, entre ellas bajas capacitancias parásitas y corrientes de fugas, operaciones sin efecto de cierre, alta fiabilidad y un

espaciado denso entre componentes en el sustrato.

El IPD TPD4135 y el MCU TMPM370 se pueden usar en conjunto, con un mínimo de componentes adicionales, a fin de crear controladores incorporados para motores BLDC trifásicos y de inducción CA. La figura 4 muestra un módulo de evaluación que combina el IPD y el MCU, así como todas las funciones e interfaces de seguridad necesarias, que controlan un motor

BLDC de 18 V. El módulo implementa todas las funciones de control de motor, así como una pequeña pantalla LCD que permite la evaluación autónoma, lo que proporciona una plataforma de hardware lista para el desarrollo de aplicaciones.

Los usuarios pueden configurar los parámetros del motor; controlar su estado; ajustar la velocidad del rotor; verificar la velocidad objetivo, la velocidad actual y el par motor de forma gráfica (figura 5) para eludir retos costosos de control del motor que suponen pérdida de tiempo. De este modo, pueden dedicar más recursos al desarrollo de aplicaciones.

## Conclusión

Aprovechando los avances en las tecnologías de microcontrolador así como las técnicas para integrar la lógica de control y funciones de control de alta tensión en un módulo de potencia inteligente, los diseñadores serán capaces de ofrecer, a un coste razonable, la mayor eficiencia energética y las numerosas ventajas de rendimiento de los motores BLDC en una variedad cada vez más amplia de dispositivos industriales y de consumo. 

Figura 5. Los parámetros de control del motor se configuran gráficamente, sin necesidad de desarrollar software.