

# Der richtige Dreh

## Bürstenlose Motoren optimal ansteuern

Field Oriented Control (Vektorsteuerung) ist die beste Technik, um BLDC-Motoren anzusteuern. Klassischerweise liefern Mikrocontroller-Hersteller dazu passende Software-Komponenten. Eine neue MCU-Generation mit FOC-Verarbeitung in Hardware vereinfacht das Design bei besserer Leistung und niedrigerer Taktrate. *Autoren: S. Bikek, F. Thimm, C. Tenbergen*

**Bürstenlose Gleichstrommotoren (BLDC)** haben im Vergleich zu herkömmlichen AC- und DC-Bürstenmotoren zahlreiche Vorteile, etwa geringere Materialkosten, höhere Zuverlässigkeit und längere Lebensdauer. Da bürstenlose Motoren nicht selbstkommütierend arbeiten, ist deren Drehmomentregelung eine komplizierte Herausforderung. Für den erfolgreichen Betrieb jedes Servosystems ist sie aber fundamental. Es gibt etliche Strategien um sowohl die Kommutierung zu erledigen als auch den optimalen Strom für jeden Stator zu berechnen, der das Drehmoment maximiert. Letzteres erreicht die Regelung, indem sie den Strom in den Statorwicklungen ein Nutzmagnetfeld erzeugen lässt, das rechtwinklig (um 90 Grad phasenverschoben) zum Rotorfeld steht. Jede Komponente des Statorfelds, die parallel zum Feld des Läufers wirkt, erzeugt eine sinnlose Kraft ohne Drehwirkung. Diese direkte Komponente vergeudet Energie und belastet die Rotorlager unnö-

tig. Die Drehmomentregelung maximiert daher die um 90 Grad phasenverschobene Komponente und minimiert oder vermeidet die direkte Komponente.

Zur Regelung von bürstenlosen Dreiphasenmotoren, deren drei Statorphasen im Abstand von 120 Grad um die Rotorachse herum angeordnet sind, lassen sich mehrere Kommutierungstechniken anwenden. Bei jeder dieser Methoden ist es nötig, den Motorstrom zu messen und mit dem gewünschten Drehmoment zu vergleichen. Anschließend wirkt eine Proportional-Integral-Funktion (PI-Regler) auf das resultierende Fehlersignal und erzeugt so ein Berichtigungssignal. Dieses wird pulsbreitenmoduliert zur Ansteuerung der Ausgangsbrücke des Motortreibers verwendet.

Bei einer trapezförmigen Motorregelung (Sechs-Phasen-Regelung) sind die Statorströme in den zwei Phasenpaaren auf beiden Rotorseiten gleich groß, während der dritte Stator von der Energie-



## Interview mit Christoph Tenbergen

### ARM auf dem Vormarsch

Toshiba erweitert sein Angebot an ARM-basierenden Mikroprozessoren und Mikrocontroller. Das Journal hat sich bei Glyn schlau gemacht, wie diese Cortex-Strategie aus Sicht des Distributors zu bewerten ist. Es antwortet Christoph Tenbergen.

#### Welche Vorteile haben aus Ihrer Sicht die ARM-Controller von Toshiba?

Der entscheidende Faktor für die Auswahl eines Prozessors ist in erster Linie die Verfügbarkeit guter Tools, gefolgt von der Leistungsfähigkeit der CPU. In beiden Punkten überzeugt die ARM-Architektur, sei es die hohe Rechenleistung oder die große Auswahl an Tools. Übrigens setzt Toshiba im Bereich der Customized-ICs oder ASIC schon lange auf ARM. Im Bereich der Mikrocontroller gibt es zwei ARM-basierende Familien: Eine Grafikcontroller-Familie mit ARM9-Kern sowie die Flash-Mikrocontroller-Familie auf Basis des neuen Cortex-M3. Mit Toshiba steigt ein verlässlicher Hersteller in diese Technologie mit ein. Dies bedeutet zusätzliche Planungssicherheit für langfristige Entwicklungsprojekte.

#### Toshiba nutzt als erstes japanisches Unternehmen den Cortex-M3-Core für seine Controller. Was gab dafür den Ausschlag?

Die Cortex-M3-Architektur hat ARM völlig neu entwickelt, mit dem Ziel, einen leistungsfähigen Prozessor mit einem weniger komplexen Programmiermodell zu entwerfen, der aktuelle und künftigen 8- und 16-bit-Mikrocontroller ersetzen kann. Unsere Kunden aus der Industrie brauchen wegen der immer kürzeren Entwicklungszeiten einen hohen Grad an Standardisierung. Genau den erreicht die Cortex-Architektur. So wird schon heute ein Großteil bereits geschriebener Software weiter verwendet. ARM unterstützt dies mit dem für den Cortex-M3 entwickelten CMSIS-Standard (Cortex Microcontroller Software Interface Standard), einer anbieterunabhängigen Hardware-Abstraktionsschicht für Prozessoren der Cortex-M3-Serie.

#### Was sind – kurz zusammengefasst – die wichtigsten Eigenschaften des vorgestellten Bausteins für die Antriebstechnik?

Der im Artikel vorgestellte Controller enthält zwei programmierbare Motor-Treiber (PMD3+), eine Vector-Engine (VE) und zwei 12-Bit-A/D-Wandler. Damit steht ein kompakter, effizienter Chip zur Verfügung, der Anwendungen vereinfacht, die eine präzise Regelung sensorloser oder mit Sensoren ausgestatteter bürstenloser 3-Phasen-Gleichstrommotoren (BLDC) sowie von 3-Phasen-Induktionsmotoren ermöglicht. Der Baustein verringert somit erheblich die Anzahl der externen Komponenten.

#### Welche Unterstützung von Glyn kann ein Kunden beim Design-In erwarten?

Tiefe Produktkenntnis und System-Know-how machen bei Glyn den Unterschied. Hierzu stehen unsere Applikationsingenieure zur Verfügung. Als kompetenter Projektpartner stehen wir Kunden bei Auswahl und während der gesamten Entwicklung sowie Serienproduktion beratend zur Seite. Beim stetig steigenden Komplexitätsgrad in der Elektronik ermöglicht dieser Service unseren Kunden einen einfacheren und schnelleren Projekterfolg.



Christoph Tenbergen ist Product Manager Toshiba Microcontroller bei Glyn im Außenbüro Nettetal.

versorgung getrennt wird. Daten über die Rotorlage erhält der Regler über drei zwischen jedem Statorphasenpaar angeordneten Hallensensoren oder – sensorlos – über die Messung der induzierten Spannung. Diese Daten bestimmen, welche Phase abgeschaltet werden soll. Wenn sich der Rotor dreht, wird der Strom in jeder Phase zwischen dem maximalen positiven Wert, Null und dem maximalen negativen Wert umgeschaltet. Der entstehende trapezförmige Strom stellt eine Annäherung an eine Sinus-Welle dar. Zwar ist das durchschnittliche Statorfeld in jeder Periode um 90 Grad gegen das Rotorfeld versetzt, doch kann das augenblickliche Nutz-Statorfeld um bis 30 Grad vor- oder nachziehen. Bei niedrigen

Rotordrehzahlen führt das zu einer ungenauen Regelung und zu lauten Geräuschen.

Ein gleichmäßigeres Drehmoment entsteht bei der sinusförmigen Ansteuerung. Die Ströme sind um 120 Grad phasenverschoben, so dass die Vektorsumme des Statorfelds rechtwinklig zum Rotorfeld steht. Dazu sind genauere Informationen über die Rotorlage erforderlich als bei der trapezförmigen Regelung. Die Daten stammen von einem Winkelcodierer oder der Analyse des gegenwärtigen Motorstroms (geberlose Lageerfassung). Allerdings hängt eine genaue Drehmomentregelung von einer raschen Berechnung des erforderlichen Stromwerts ab. Bei hohen Rotordrehzahlen führt →

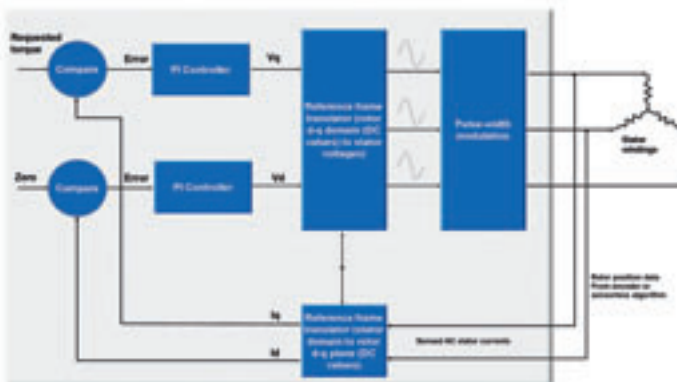


Bild 1: Bei der Vektorsteuerung übersetzt eine Umwandlungsfunktion (unten) die erfassten Statorströme in die Rotorkomponenten D und Q. Ein Vergleich mit Null sowie dem Soll-Drehmoment liefert den Eingang in die PI-Regler.

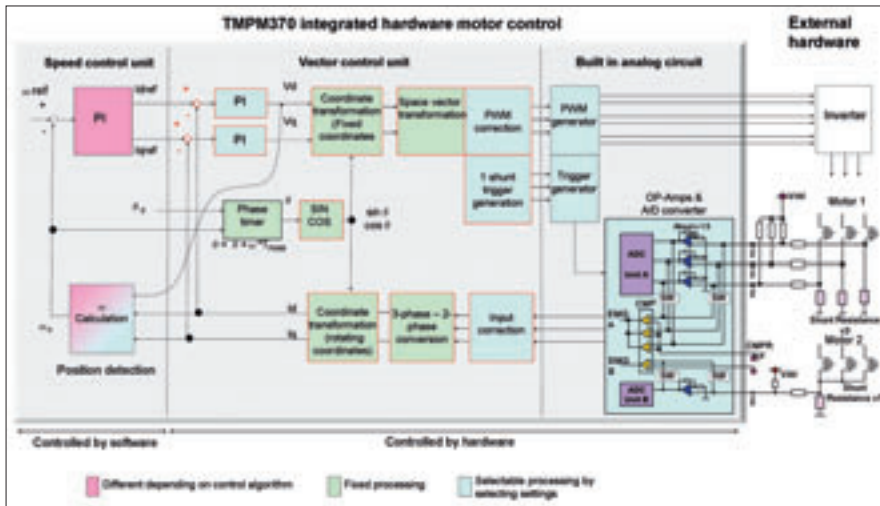
## Auf einen Blick

### Eine runde Sache

Eine FOC überwindet die Nachteile der trapez- und sinusförmigen Regelungen. Sie senkt den Energieverbrauch sowie die Geräuschentwicklung, reduziert den Verschleiß und liefert ein konstantes Drehmoment über den gesamten Drehzahlbereich sowie eine gute Geschwindigkeitsregelung unter schwankender Last. Die Hardware-Ausführung der rechenintensiven FOC-Kalkulationen vermeidet zusammen mit der eingebauten analogen IP die Komplikationen und Beschränkungen einer FOC-Implementierung in Software.

**i** infoDIREKT [www.elektronikjournal.de](http://www.elektronikjournal.de) 599ej|0509  
 Link zu Glyn; [Toshiba/Glyn auf der PCIM 2009](#), ► Halle 12, Stand 301

**✓** VORTEIL Vektorsteuerung mit Hardwareunterstützung arbeitet effizienter als reine Softwarelösungen und spart Ressourcen.



**Bild 2:** Toshiba TMPM370 führt nur einen kleinen Teil der Motorsteuerung in Software aus (links). Spezielle Hardware erledigt alle zeitkritische Berechnungen.

her höchste Anforderungen an die CPU-Performance. Dazu kommen eventuell Software-typische Probleme bei Integration, Funktionssicherheit und Lizenzierung.

### Hardware-basierte FOC

Zeitkritische FOC-Berechnungen in Hardware können die Regelkreises-Geschwindigkeit erhöhen sowie die nötige Betriebsfrequenz senken und Prozessorzyklen für die Anwendungsebene freisetzen. Bild 2 zeigt eine re-partitionierte FOC-Funktion.

die begrenzte Bandbreite der PI-Funktion dazu, dass der berechnete Statorstrom der tatsächlichen Rotorlage zunehmend naheilt, was zu einem ineffizienten Betrieb führt.

### Feldorientierte Regelung

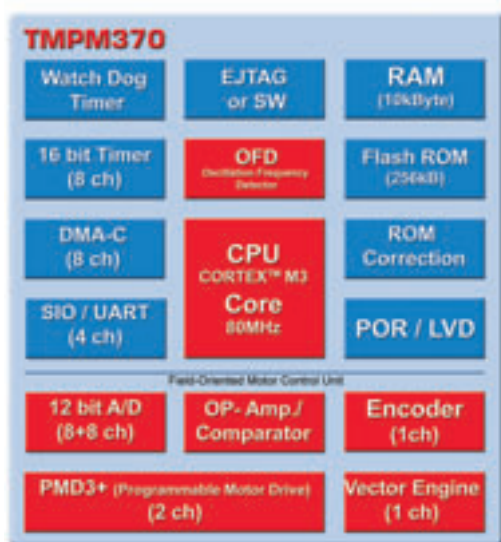
Die feldorientierte Regelung (Field Oriented Control FOC, auch Vektorregelung VC) überwindet die Nachteile der trapez- und der sinusförmigen Ansteuerung. FOC regelt die Motorströme und -Spannungen bezüglich der direkten und der um 90 Grad phasenverschobenen Rotorachsen und hält damit ein konstantes, um 90 Grad zum Rotorfeld versetztes Statorfeld aufrecht. Eine Umwandlungsfunktion übersetzt die erfassten Statorströme in direkte (D) und um 90 Grad phasenverschobene (Q) Rotorkomponenten. Um das gewünschte Drehmoment zu erreichen, wird D mit Null und Q mit dem Ziel-Drehmoment verglichen. Die resultierenden Fehler-signale speisen die beiden PI-Blöcke, die wiederum Signale in der D-Q-Referenzebene generieren. Diese müssen in die Kommutierung umgewandelt werden, um daraus das PWM-Signal für jede Statorphase zu erzeugen. Bild 1 zeigt diese Funktionsblöcke.

Weil die Eingaben in die PI-Funktionen konstant sind, behält die FOC einen hohen Wirkungsgrad bei allen Drehzahlen, unabhängig von der Bandbreite des PI-Controllers. Damit die FOC in Echtzeit erfolgt, ist jedoch eine schnelle Berechnung der Funktionen nötig, die erfasste Statorstromsignale in die Kommutierung sowie die statischen PI-Werte in die Signale zur Spannungsregelung für die Ausgangsbrücke umwandeln. Software-FOC stellt da-

Sie nutzt den Hardware-basierten Vektorregelprozessor der Toshiba-Mikrocontroller TMPM370 und TMPM372. Alle FOC-Verarbeitungsaufgaben, die von der Anwendung unabhängig sind, implementiert dieses System in Hardware. Die integrierte Vector-Engine des Mikrocontrollers übernimmt die Decodierung und enthält einen Scheduler für die Ereignis- und Prioritätssteuerung sowie Rechenkomponenten inklusive MAC-Block (Multiply, Accumulate) für rechenintensive Operationen. Zwei Vektorregel-einheiten enthalten die PI-Controller und zugehörige Funktionen.

Durch Übertragung der komplexen und zeitkritischen Verarbeitung auf die Vector-Engine beschränkt der TMPM370 den Software-Anteil der FOC auf applikationsabhängige Aufgaben wie die Berechnung der Winkelgeschwindigkeit und die Drehzahlregelung. Diese werden im 32-bit ARM-Cortex-M3-Core des Bausteins ausgeführt. Alles zusammen ermöglicht dem TMPM370, den Regelkreis innerhalb jeder PWM-Periode abzuschließen, was die Regelstabilität bei PWM-Frequenzen bis 100 Kilohertz verbessert. Bei einer Taktrate von 40 Megahertz kann diese MCU zwei bürstenlose Motoren gleichzeitig regeln und eine Software-Vektorregelung übertreffen, die auf einer herkömmlichen 80-Megahertz-MCU läuft. Das verringert Probleme beim Wärmemanagement, dem Leistungsbudget des Systems und elektromagnetischen Störungen. Wer der Regel „eine MCU für einen Motor“ anhängt, kann den ebenfalls mit 40 Megahertz arbeitenden TMPM372 einsetzen.

Beide Chips eignen sich für hoch entwickelte Motor-Einsatzgebiete, darunter Haushaltsgeräte, Pumpen, Kompressoren, industrielle Antriebe, Heizung, Lüftung und Klimaanlage. Beide eignen sich für bürstenlose Permanentmagnet-AC/DC-Schrittmotoren und Dreiphasen-AC-Induktionsmotoren. Darüber hinaus zeichnen sie sich durch einen OFD aus (Oscillation Frequency Detector), der eine Überwachung der CPU nach dem Sicherheitsstandard IEC60730, Klasse B ermöglicht. Ganz wie die Vector-Engine übernimmt die integrierte Analog-IP spezifische FOC-Aufgaben, zum Beispiel zwei Stück 11-Kanal-12-bit-ADC für schnelle Stromerfassung und eine Abschaltmöglichkeit. Das integrierte ADC-Timing-Netzwerk mit Op-Amp und Komparator ermöglicht präzise Messungen über den vollen positiven und negativen Strombereich des Motors hinweg, ohne dass ein externer Op-Amp für eine Pegelumsetzung nötig wäre. Das spart weitere Komponenten und bietet einen weiteren Vorteil gegenüber Software-FOC. (fjl)



**Bild 3:** Toshiba hat beim Mikrocontroller TMPM370 um den ARM Cortex M3 spezielle Hardware für die Vektorsteuerung von BLDC-Motoren angesiedelt.

**Die Autoren:** Seraphin Sepa Bikek ist Application Engineer bei Toshiba, Frank Thimm verantwortet das Product Marketing bei Toshiba und Christoph Tenbergen ist als Produktmanager bei Glyn für Toshiba-MCU zuständig.