

車載モーターシステムの低コスト化と高性能化を両立する MCU内蔵ゲートドライバー SmartMCD™

SmartMCD™ Series Gate Driver IC for Automotive Motor Applications Achieving Low Cost and High Performance

會澤 敏満 AIZAWA Toshimitsu 柴山 武至 SHIBAYAMA Takeshi 渡辺 宏樹 WATANABE Hiroki

地球規模での気候変動問題を背景としたカーボンニュートラル実現のための、自動車の電動化が進んでいる。

東芝グループは、自動車の電動化を支える車載システムの低コスト化と高性能化を両立するモーターコントロールドライバー (MCD) として、MCU (Micro Controller Unit) 内蔵ゲートドライバー SmartMCD™ シリーズ TB9M003FGを開発し、東芝デバイス&ストレージ(株)から製品提供を開始した。ベクトルエンジン(VE)を搭載しCPUの負荷を軽減したことで、安価なCPUを用いながら毎秒2万回の高速度モーター制御を可能とした。また、低コスト化が可能な1シャント電流検出を採用し、この方式では従来0%であった低電圧利用率 (Duty) 時の電流検出率を、三角波・鋸(のこぎり)波・逆鋸波キャリアを用いることで100%まで高めた。更に、用途が異なる複数の製品への適用をCPUに組み込むソフトウェアの変更で対応できる、ソフトウェアディファインド(SD)を実現した。

The electrification of automobiles is being actively promoted in countries across the world as part of carbon neutrality initiatives, reflecting increasing awareness of global climate change.

The Toshiba Group has developed the SmartMCD™ series gate driver integrated circuit (IC) with a built-in microcontroller for motor control drivers (MCDs) to achieve a balance between reduced cost and improved performance of in-vehicle systems, and Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation has started deliveries of the TB9M003FG. It incorporates the following three features: (1) high-speed motor control of 20 000 times per second via a vector engine (VE) capable of reducing the central processing unit (CPU) load despite using a low-cost CPU, (2) single-shunt current detection using triangular, sawtooth, and inverse sawtooth wave carriers capable of improving the conventional current detection rate from 0% by up to 100% at low duty times, and (3) software-defined functionality capable of supporting multiple controls by changing the embedded software.

1. まえがき

地球規模での気候変動問題を背景としたカーボンニュートラル実現という世界的な共通目標の下、自動車の電動化が進んでいる。電動化を支える車載モーターシステムには低コスト化や高性能化が求められる。

東芝グループは、低コスト化や高性能化の両立に有効な MCU内蔵ゲートドライバー SmartMCD™ シリーズの一つとして、TB9M003FG^{(1), (2)}を開発し、東芝デバイス&ストレージ(株)から提供を開始した。このTB9M003FGは主に電動ポンプやファンなどの三相ブラシレス直流 (DC) モーターの駆動に適している。

ここでは、TB9M003FGの低コスト化・高性能化に寄与する技術の詳細や仕様について述べる。

2. SmartMCD™の主な特長

SmartMCD™の主要な三つの特長である、VE、1シャント電流検出、及びSDについて、以下の各節で述べる。

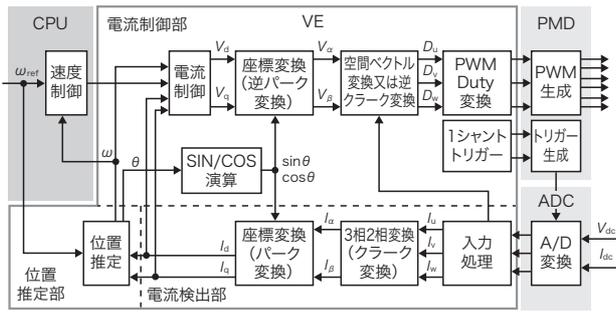
2.1 VE

一つ目の特長は、モーターを高効率で制御するための手法として広く用いられているベクトル制御について、CPUの処理をほとんど必要とせずに実現できる点である。

SmartMCD™では、低コスト化のため、安価なCPUを用いている。しかし、安価なCPUは性能が低く処理速度が遅いため、CPU単体では演算処理が多いベクトル制御を高速度に処理することは不可能である。そこで、CPUの負荷を軽減するVE⁽³⁾を搭載した。

図1にVEを用いたモーター制御ICの構成を示す。VEは電流検出部、位置推定部、電流制御部などで構成される。CPUで主にシーケンス制御や異常処理などを実施し、VEでモーター制御の大部分を処理することで、高速度ベクトル制御を実現している。

図2は、モーター制御用半導体の汎用性と処理速度を示している。CPUの場合、ソフトウェアにより制御を変更できるため汎用性は高いが、処理速度は遅い。一方、ハードウェアの場合、専用設計となるため処理速度は速いが、汎用性は低い。これら両方をうまく組み合わせることで、図3



I_a, I_b : dq軸系のモーター電流 V_{d^*}, V_{q^*} : dq軸系のモーター電圧
 I_{α}, I_{β} : $\alpha\beta$ 軸系のモーター電流 $V_{\alpha^*}, V_{\beta^*}$: $\alpha\beta$ 軸系のモーター電圧
 I_u, I_v, I_w : U, V, W相のモーター電流 D_u, D_v, D_w : U, V, W相のDuty
 I_{dc} : 直流電流 V_{dc} : 直流電圧 ω_{ref} : 角速度指令 ω : 角速度 θ : 角度
 SIN: 正弦 COS: 余弦
 PMD (Programmable Motor Driver): インバーターへの通電信号を生成する機能
 ADC (アナログデジタル(A/D)変換器): モーターの電圧や電流などのアナログ信号をデジタル信号に変換する機能

図1. VEを用いたモーター制御ICの構成

CPUで主にシーケンス制御や異常処理などを実施し、VEでモーター制御の大部分を処理することで、高速なベクトル制御を実現できる。

Block diagram of MCD using VE

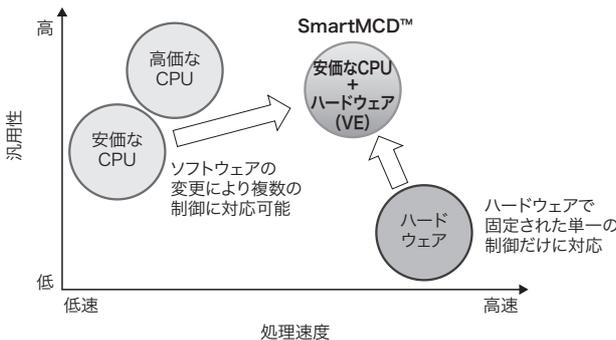


図2. モーター制御用半導体の汎用性と処理速度

SmartMCD™は、安価なCPUとVEを組み合わせることにより、高い汎用性と優れた処理速度を兼ね備えている。

Relationship between versatility and processing speed of MCD semiconductors

に示すように、安価なCPUでは実現できない、毎秒2万回(50 μ s/回)の高速モーター制御を実現している。また、安価なCPUを搭載しているので汎用性も確保している。汎用性については、2.3節で詳細を述べる。

VEは、東芝デバイス&ストレージ(株)製の民生用モーター制御マイコンにも搭載しており、民生用モーター制御マイコンでもSmartMCD™でもCPUとVEは並列に処理できる。しかし、既存の民生用モーター制御マイコンのVEは、図4(a)に示すように、あらかじめ組み込まれたスケジュールを実行する構成となっており、自由度が低かった。

SmartMCD™は、図4(b)に示すように、ベクトル制御の各種処理を実行する専用ハードウェアであるVE機能を自由に

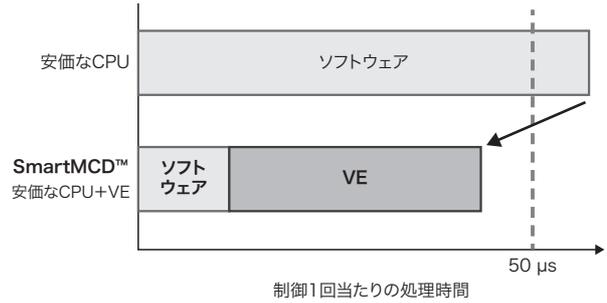
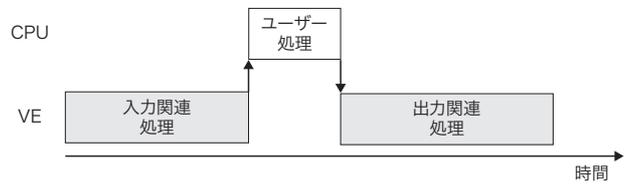


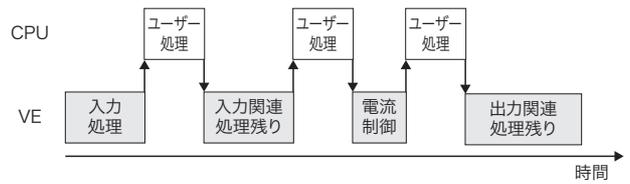
図3. モーター制御の処理速度の比較

VE搭載により、50 μ s/回の高速度処理のモーター制御を実現した。

Differences in motor control processing speed using only low-cost CPU and low-cost CPU with VE



(a) 既存の民生用モーター制御マイコン



(b) SmartMCD™

図4. SmartMCD™におけるCPUとVEの処理の一例

既存の民生用モーター制御マイコンではあらかじめ組み込まれたスケジュールに従って動作しているが、SmartMCD™ではVE機能を自由に組み込むことが可能である。

SmartMCD™ Motor control processing diagrams appropriately using CPU and VE compared with that of consumer microcomputer

組み込んだり、VE機能ごとにCPU処理を追加したりすることができるので、柔軟なモーター制御を実現する。

2.2 1シャント電流検出

二つ目の特長は、3相の電流を検出するために従来用いていた三つのシャント抵抗を用いた3シャント電流検出に代えて、低コスト化が可能な1シャント電流検出を採用した点である。

1シャント電流検出の場合、PWM (Pulse Width Modulation: パルス幅変調)パターンを構成する零電圧以外の二つの電圧の出力時に発生するシャント抵抗の両端電圧から、2相の電流を検出する。そして3相電流が合計で0となることを利用し、検出した2相の電流を用いて残り1相の電流を求めることで3相の電流を検出する。しかし、低Duty時、

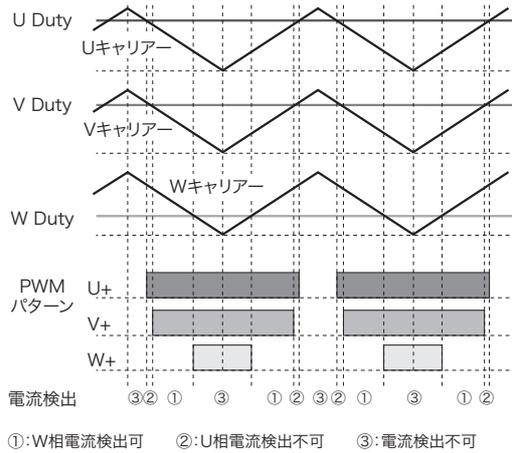


図5. 通常のPWM方式を用いたPWM生成

3相全てを三角波キャリアーとすると、低Duty時に図のようなタイミングでは、W相電流の検出はできるが、U相電流の検出が困難であり、1相だけしか電流が検出できない。

Pulse width modulation (PWM) signals generated by conventional PWM method

通常のPWM方式（3相全てのPWMが三角波キャリアー）では二つの電圧出力のどちらかの継続時間が短いため、電流を検出することは困難である。

具体例を図5に示す。PWMパターンの色付きの部分はU、V及びWの各相のPWM信号U+、V+、及びW+がHighレベル（以下、Hiと略記）の時間帯を示し、その間の部分はこれらがLowレベル（以下、Loと略記）の時間帯を示している。3相のうち、一つの相がHiのときは、その相の正電流が、二つの相がHiのときは残りの相の負電流が検出できる。3相いずれもHi、若しくはいずれもLoとなる③の時間帯では、電流検出が不可能である。U相電流は、電圧U+がHiでV+とW+がLoとなる②の時間帯に、W相電流は、U+とV+がHiでW+がLoとなる①の時間帯に検出する必要があるが、低Duty時の図に示すようなタイミングでは、②の継続時間が短く、U相電流の検出が困難である。

そこで、低Duty時には、図6に示す“対称キャリアPWM⁽⁴⁾”方式を適用することにより電流検出を可能とした。3相のうち1相のPWMは三角波キャリアーで谷から両側へ、残り2相のうち1相のPWMは逆鋸波キャリアーで谷から始点側へ、残り1相のPWMは鋸波キャリアーで谷から終点側へ、それぞれDutyに応じて変化させる。これにより、二つの電圧出力の継続時間を長くすることで、図に示す④と⑤のタイミングで、それぞれV相とW相の二つの相の電流が検出可能となり、電流検出率を高められる。

更に、対称キャリアPWM方式は、Dutyが高くなると電流検出が困難となるため、その場合は、二つの電圧出力の

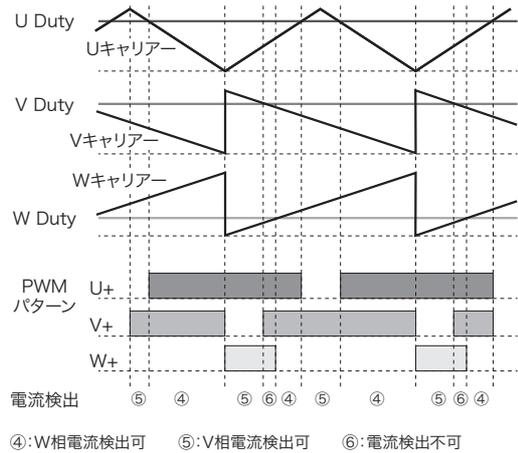


図6. 対称キャリアPWM方式を用いたPWM生成

U相は三角波、V相は逆鋸波、W相は鋸波のキャリアーとすることで、低Duty時に図のタイミングで、V相とW相の2相の電流が検出できる。

PWM signals generated by symmetric carrier method

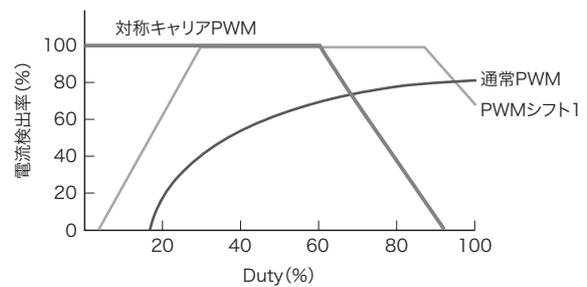


図7. 各PWM方式の電流検出率の比較

低Duty時に対称キャリアPWM方式を適用することで電流検出率100%を実現できる。

Comparison of current detection rate of conventional PWM and symmetric carrier methods

継続時間を長くすることが可能なPWMシフト1⁽⁵⁾と呼ばれる方式に切り替えることで電流検出率を高める。PWMシフト1方式も、更にDutyが高くなると電流検出が困難となるため、高Duty時には通常のPWM方式に切り替えて電流検出率を高める。図7に、1シャント電流検出における各PWM方式と電流検出率の関係を示す。

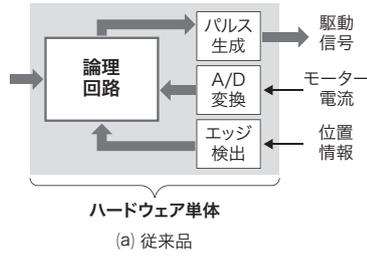
2.3 SD

三つ目の特長は、CPUを搭載していることから、組み込むソフトウェアを変更することで複数の制御に対応可能なSD（ハードウェアの機能をソフトウェアで実現する考え方）を実現できる点である。これにより、用途が異なる様々な製品への適用が可能となる。

図8に、車載モーター制御ICの構成を比較して示す。従来品は、CPUがなく、制御がハードウェアで固定されているため、一つの制御しか対応できなかった。一方、SmartMCD™



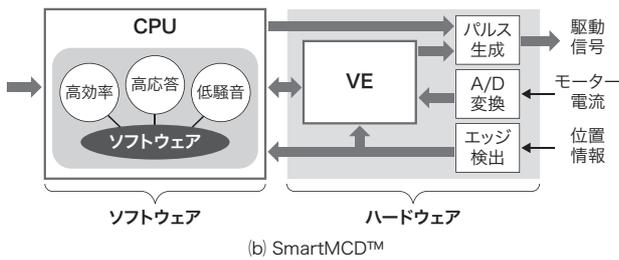
アプリケーションが限定
⇒ハードウェアで固定された単一の制御だけに対応



(a) 従来品



様々なアプリケーションに対応可能
⇒CPUに組み込むソフトウェアの変更により、複数の制御に対応可能



(b) SmartMCD™

図8. 車載モーター制御ICの構成比較

SmartMCD™は組み込むソフトウェアを変更することで、複数の制御に対応できるため、様々なアプリケーションに適用できる。

Differences in configurations of conventional automotive motor control IC and SmartMCD™

は、CPUを搭載しており、組み込むソフトウェアを変更することで、複数の制御に対応できる。そのため、用途が異なる様々な製品へ適用できる。

3. 仕様

SmartMCD™シリーズ TB9M003FGの主な仕様を、表1に示す。9.0×9.0 mmのパッケージに、1シャント電流検出

表1. TB9M003FGの主な仕様

Main specifications of TB9M003FG

| 項目 | 仕様 | |
|-----------|---|-----------------------------|
| 対応モーター | 三相ブラシレスDCモーター | |
| 主なファンクション | 1シャント抵抗電流検出アンプ、センサーレス方式、ベクトル制御、矩形波制御 | |
| 主な異常検出機能 | 低電圧検出、高電圧検出、外付けパワー MOSFET のオープン/ショート故障検出、過熱検出 | |
| 絶対最大定格 | 電源電圧 (V) | -0.3 ~ +40 |
| | 電源電圧 (V) | 6 ~ 18 |
| 動作範囲 | 動作温度 (°C) | T _a = -40 ~ +150 |
| | 動作温度 (°C) | T _j = -40 ~ +175 |
| パッケージ | 名称 | P-HTQFP48-0707-0.50-001 |
| | サイズ (mm) | 9.0 × 9.0 (Typ.) |
| 信頼性 | AEC-Q100 (Grade 0) 準拠 | |

Typ.: Typical Value T_a: 周囲温度 T_j: ジャンクション温度
MOSFET: 金属酸化膜半導体電界効果トランジスター

アンプや、チャージポンプ回路、LDO (Low Drop Out) 5 V/15 Vレギュレーターなどを内蔵しており、車載モーターシステムの部品点数を削減している。回転位置センサーレス方式のベクトル制御だけでなく矩形(くけい)波制御にも対応できる。更に、車載電子部品認定規格のAEC-Q100 (Grade 0)に準拠することで信頼性を確保している。

4. あとがき

車載モーターシステムの低コスト化と高性能化の両立に有効なTB9M003FGの主な特長として、VE、1シャント電流検出、SDについて示した。

今後も、車載モーターシステムの更なる低コスト化と高性能化に有効な技術の開発を継続する。

文献

- 渡辺宏樹, ほか. 車載モーターシステムの小型化・低価格化に貢献するMCU内蔵ゲートドライバー TB9M003FG, 東芝レビュー, 2024, 79, 5, p.26-30. <<https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/jp/technology/corporate/review/2024/05/a07.pdf>>, (参照 2024-09-21).
- 會澤敏満, ほか. “モータシステムの低コスト化と高性能化を両立するモータ制御技術”. 令和6年電気学会全国大会論文集, 徳島, 2024-03, 電気学会, 2024, p.174.
- 鈴木信行, ほか. 省エネ化を促進できるモータ駆動用ベクトル制御マイコンTMPM370, 東芝レビュー, 2012, 67, 1, p.38-41.
- 前川佐理, ほか. 高調波騒音を抑制可能な直流部電流センサを用いた3相電流再現法, 電気学会論文誌D, 2014, 134, 1, p.96-105.
- 東芝デバイス&ストレージ. 32ビットRISCマイクロコントローラTXZファミリ リファレンスマニュアル アドバンスベクトルエンジン(A-VE-A), Revision 1.0, 2018, <https://toshiba.semicon-storage.com/info/TXZ-A-VE-A-001-DDJ_ja_20181106.pdf?did=64617>, (参照 2024-07-12).



會澤 敏満 AIZAWA Toshimitsu
生産技術センター
電子機器・実装・制御技術領域 制御技術研究部
電気学会会員
Electronics Control Technology Research Dept.



柴山 武至 SHIBAYAMA Takeshi
生産技術センター
電子機器・実装・制御技術領域 制御技術研究部
電気学会会員
Electronics Control Technology Research Dept.



渡辺 宏樹 WATANABE Hiroki
東芝デバイス&ストレージ(株)
半導体事業部 半導体応用技術センター
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.