

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

TB9M003FG Gate Driver IC with Embedded Microcontroller for Low-Cost Downsized On-Board Electric Motor Systems

渡辺 宏樹 WATANABE Hiroki 平山 敬之 HIRAYAMA Takayuki 會澤 敏満 AIZAWA Toshimitsu

カーボンニュートラル実現のための取り組みの一つとして自動車の電動化が進んでおり、電動化を支える車載モーターシステムは、小型で安価であることが求められる。車載モーターシステムの主要な構成部品であるモータードライバーも、小型化と低価格化が必要である。

東芝グループは、MCU (Micro Controller Unit) 内蔵ゲートドライバー SmartMCD (モーターコントロールドライバー)TMシリーズの一つとして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。1シャントFOC (Field Oriented Control) への対応とVE (ベクトルエンジン) の採用で構成要素を削減することにより、小型化と低コスト化を図った。また、TB9M003FGを用いてBLDC (ブラシレス直流) モーターの1シャントFOCを構成すると、電流検出部の部品面積と部品コストを、それぞれ1/3に削減できる。

In line with the global trend toward using electric automobiles as part of carbon neutrality efforts, there is a need for low-cost, downsized on-board systems using various electric motors. Demand for compact, low-cost motor driver integrated circuits (ICs) as a key device of on-board electric motor systems has also continued to grow.

The Toshiba Group has developed the TB9M003FG, a SmartMCDTM series of integrated motor control driver (MCD) ICs with an embedded microcontroller, with mass production being handled by Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation. The TB9M003FG incorporates hardware for a single-shunt field-oriented control (FOC) and vector engine (VE) for approximately one-third the cost and area of parts for current detection compared with conventional ICs for brushless DC motor control.

1. まえがき

自動車の電動化は、燃費を改善する目的で、走行用動力以外にも及んでいる。各種ポンプや、ファン、パワーステアリングなどのモーターには、高トルクで静音性に優れるベクトル制御 (FOC) の採用が主流である。

東芝グループは、FOCの構成に必要なMCUや、電流検出アンプ、高分解能アナログデジタル変換器 (ADC)、ゲートドライバー、ソフトウェア (SW) を格納するメモリー、MCU用電源回路、上位電子制御ユニット (ECU) との通信回路、各種異常検出回路などのハードウェア (HW) を1チップ上に集積した、マイコン内蔵ゲートドライバー SmartMCDTMシリーズを開発している⁽¹⁾。今回SmartMCDTMシリーズの一つとして、車載モーターシステムの小型化・低価格化に貢献するTB9M003FGを開発し、東芝デバイス&ストレージ(株)から製品化した。TB9M003FGは、1シャントFOCに対応するHWとVEの搭載が特長である。

ここでは、TB9M003FG向けに開発した技術について述べた後、MBD (モデルベース開発) のために開発しているTB9M003FGのシミュレーションモデルにも触れる。

2. 1シャントFOC

FOCのHW構成は、3シャント方式と1シャント方式の二つに大別される。3シャント方式と1シャント方式の回路構成例を、表1に示す。ここでは、電流検出のためのADCと増幅器を内蔵したゲートドライバーを想定している。3シャント方式では、U、V、W各相にシャント抵抗が直列に設置されており、各相の電流を個別にモニターできる。一方、1シャント方式では、シャント抵抗が1本なので、各相の電流を個別にモニターすることはできない。そのため、3相分の電流検出を行う上で制約が多く、次のような制御上の工夫が必要になる。

一般にFOCには、シャント抵抗を流れるU、V、W相電流のうち、PWM (パルス幅変調) の1周期中に少なくとも2相の電流値情報が必要である。図1に示すように、3シャント方式の場合は3本のシャント抵抗を流れる3相電流のうち、2相の電流値をいつも同じタイミングで1回取得すれば良い。一方、1シャント方式の場合は1本のシャント抵抗しかないため、2相分の電流値を取得するためには2回電流取得タイミングが必要であるが、電圧ベクトルの継続時間が

表1. 3シャント方式と1シャント方式によるFOCのHW構成と特徴

Comparison of hardware configuration and features of three-shunt and single-shunt systems

	3シャント方式	1シャント方式
回路構成例		
電流検出方法	シャント抵抗の両端電圧を測定し、3相分の電流を取得する	3シャント方式と同様(シャント抵抗の数が3シャント方式の1/3)
電流検出制約	小	大
電流検出部品面積	1	約1/3
電流検出部品コスト	1	約1/3

短い場合、電流を検出することが困難である。東芝グループは、キャリア波形の工夫で、1シャント方式でも2相の電流の取得を容易にする技術を開発した⁽²⁾。この技術を適用することで、低速から高速まで1シャント方式のFOCを実現できる。

表1の図のように、ゲートドライバー内に必要な増幅器が、3シャント方式の3個に対して、1シャント方式では1個に削減できる。TB9M003FGは、1シャント方式だけに対応したゲートドライバーであり、電流検出のための増幅器の数

を減らしたことで、小型化と低コスト化が可能になった。

表1の下方に、電流検出回路を構成する場合の3シャント方式と1シャント方式の特徴を比較して示す。3シャント方式では外付けシャント抵抗が3本必要であるのに対し、1シャント方式では1本である。ADCはどちらも1個(ゲートドライバーに内蔵)であり、外付けの電流検出用部品数が1/3になるため、部品面積と部品コストが約1/3になる。

3. VE

FOCの一般的なブロック図を、図2に示す。FOCは、モーター電流を磁束発生に寄与するd軸成分とトルク発生に寄与するq軸成分に分解し、それぞれを独立に制御することで制御性を向上させ、高効率かつ静音性に優れたモーター制御を実現する方式である。

SmartMCD™シリーズには、FOCの制御のうち、ユーザーごとのノウハウを適用する必要のない、共通の演算制御部分をHW化したVEを搭載している。図3に、VEを使用した場合のFOCのブロック図を示す。VEを使用することで、MCUの処理能力に余裕ができるため、VEなしの場合よりシンプルなMCUを選択できる。

例えば、VEを使用しない場合に必要なMCU Aと、VEを使用する場合に必要なMCU Bのゲート数の比を表2に示す。MCU Aのゲート数を1とすると、MCU Bのゲート数は0.28となり、72%低減する。ゲート数と回路面積は比例するため、VEを使用した方が小型で低コストのゲートドライバーにできる。

VEはabc/ $\alpha\beta$ 変換(クラーク変換)や、 $\alpha\beta$ /dq変換

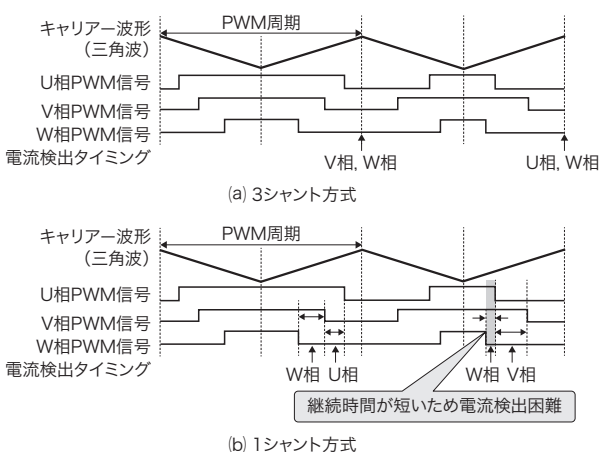


図1. 3シャント方式と1シャント方式の電流検出タイミング

3シャント方式ではシャント抵抗が電流ごとにあるので、各相の電流値を同時に取得できる。1シャント方式ではシャント抵抗が一つしかないので、タイミングを変えて異なる相の電流を取得する工夫が必要である。

Comparison of current detection timing of three-shunt and single-shunt systems

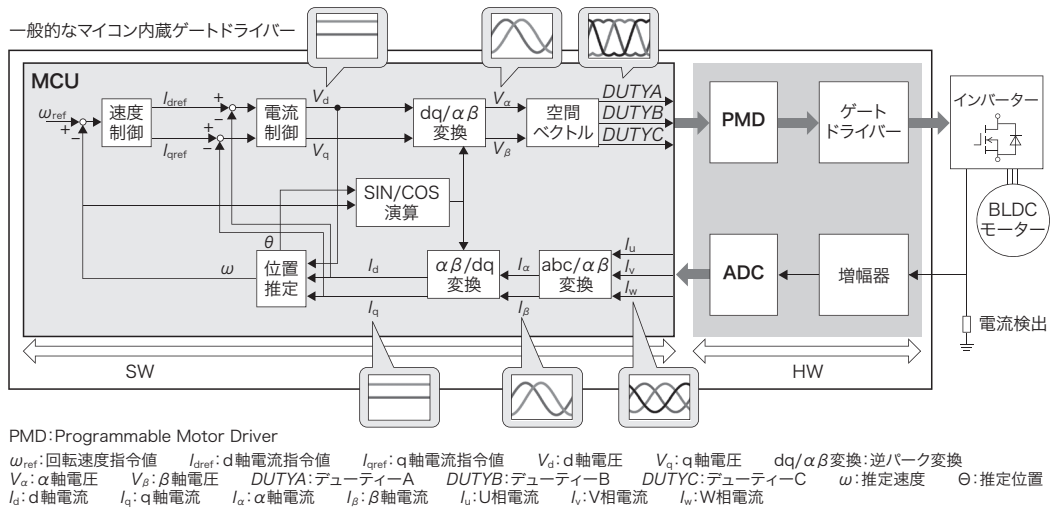


図2. VEを使用しないFOCの一般的なブロック図

モーターの電流を検出してADCで取り込み、インバーターを駆動するゲート信号を生成するフィードバック制御である。

Block diagram of FOC without using VE

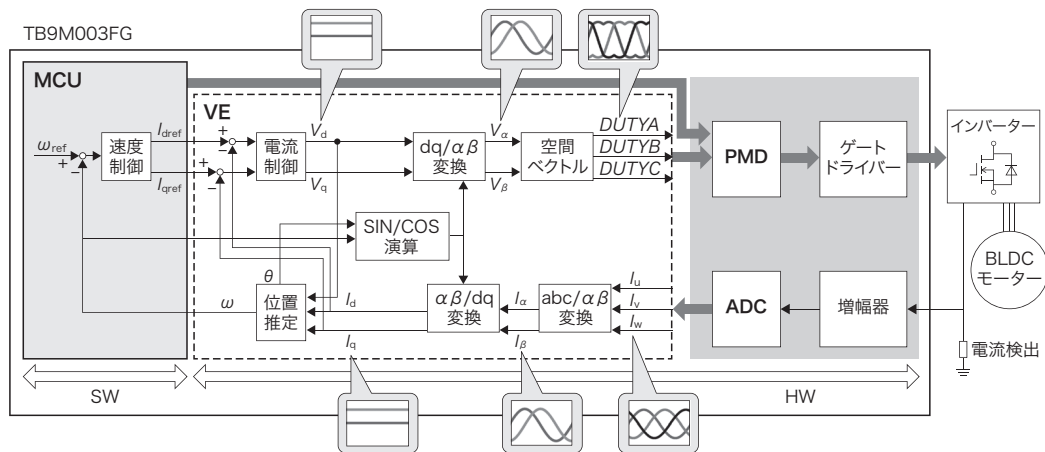


図3. VEを使用するFOC (TB9M003FG) のブロック図

MCU処理の一部をVEが担うので、安価なMCUを使用できる。VEに担わせる処理は、ユーザーの要望に合わせてSWで選択できる。

Block diagram of TB9M003FG to achieve FOC by using VE

表2. VEがない場合とある場合のMCUのゲート数

Number of gates in microcontrollers with and without VE

MCU	MCU A (VEなし)	MCU B (VEあり)
ゲート数 (MCU Aのゲート数を1とした場合の比)	1	0.28

(パーク変換), サイン(SIN)/コサイン(COS)演算など、演算処理ごとに小分けされている。そのため、VEではなく、SWを使ってユーザー独自のアルゴリズムを適用することも可能であり、ユーザーの要望に合わせて柔軟に構成できる。

4. MBD向けモデルの開発

MBDは、実物の試作品ではなく、試作品同等の機能モデルをコンピューター上で再現し、機能モデルを用いて各種検証作業を行うことで、開発・設計・試作やテストなどに必要な時間や手戻りを低減する開発手法である。自動車や、船舶、航空機業界など、試作を頻繁には行えない業界で取り組みが活発化し、様々な製品に適用が広がっており、今後はMBD対応が必須になっていく。自動車業界では、モデリング・シミュレーション・解析のためのマルチドメインシミュレーションシステムとして、MathWorks社が提供する

MATLAB®/Simulink®がデファクトスタンダードの位置付けである。

東芝デバイス&ストレージ(株)は、TB9M003FGのMBD向けモデルを開発している。

モーターを駆動するECUシステムの一般的な開発プロセスと半導体部品のモデルの関わり方を図4に示す。ものづくりの開発プロセスとしてV字モデルがよく知られており、その名のとおりV字型の構造で表現される。各開発工程と対応するテスト工程の関係が明確になっている点が特徴である。

V字の左側が開発工程にあたり、一般に、要件定義→基

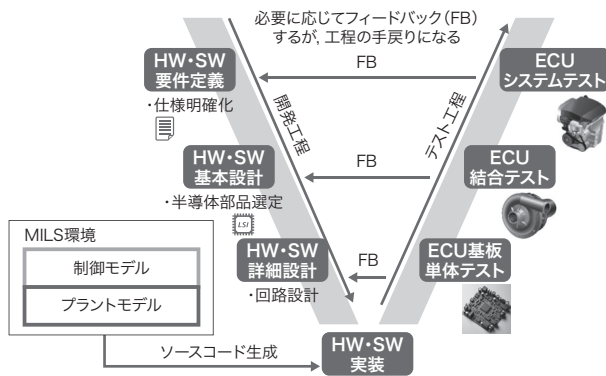


図4. ECUシステムの開発プロセスと半導体部品モデルの関係

半導体部品モデルは、ECU開発工程の初期段階で動作確認や各種検証に使えるほか、SWのコード自動生成や、早期の設計品質向上、開発工期大幅削減に役立つ。

Relationship with semiconductor device models and ECU system development processes

本設計→詳細設計→実装というフローで進んでいく。ECU開発工程では、基本設計の工程で半導体の部品選定が行われるが、その際に半導体部品のモデルが活用できる。モデルは“動く仕様書”とも呼ばれており、ECUメーカーは、自社が保有するシステムのモデルを、半導体部品モデル及び制御系モデルに接続し、ECU全体のモデル(プラントモデル)をバーチャルな世界で構成する。プラントモデルを動作させるシミュレーション(MILS: Model in the Loop Simulation)を行うことで、早期の開発工程である基本設計の段階で要求仕様を満たすかどうかを確認できる。

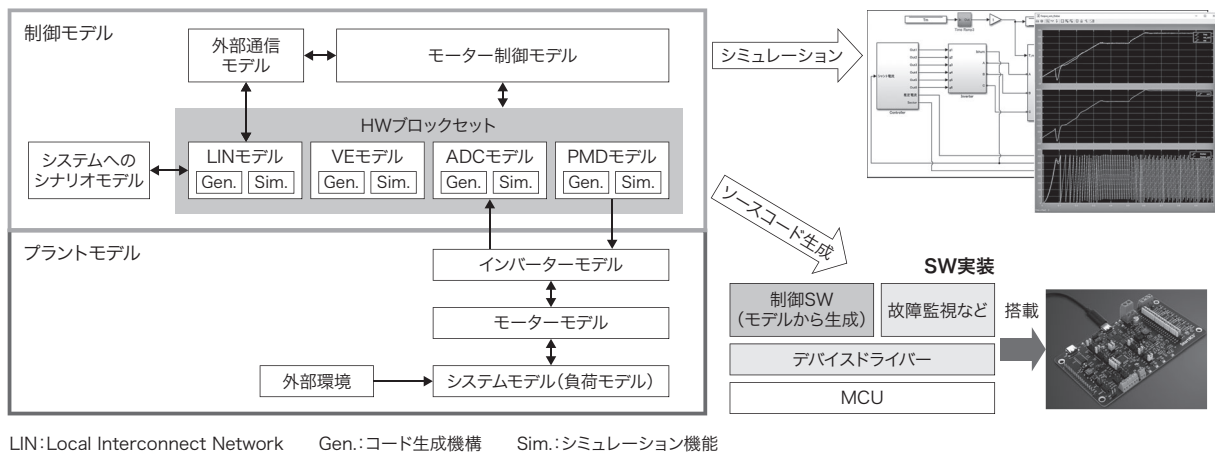
特に、一般的な制御モデルはHWモデルを含まないが、開発中のモデルは、制御モデルにHWモデルを含んでいる(図5)。これにより、一つのモデルで、HW動作のシミュレーション、及びHW制御用SWのソースコード生成の両方を実現できるため、半導体部品選定の精度を一層高められる。

このように、当社のモデルを使用することにより、テスト工程からの手戻りのリスク低減が可能になる。更に、基本設計工程での新規制御アルゴリズム検討に活用したり、詳細設計工程での半導体部品以外のECU部品の特性を決定したりできるほか、実装工程で必要なSWコードの自動生成なども可能になる。

5. あとがき

TB9M003FGに搭載した、小型化・低コスト化技術である、1シャント方式への対応と、VEの採用について述べた。TB9M003FGは、SmartMCD™シリーズとして2023年12

モデルの全体構成



LIN: Local Interconnect Network Gen.: コード生成機構 Sim.: シミュレーション機能

図5. TB9M003FGの開発中のMBD向けモデルの概要

制御モデルにHWモデルを含むため、HWの動作シミュレーションと、HW制御用SWのソースコード生成の両方が可能である。

Outline of TB9M003FG simulation model in development

月末に量産開始した。TB9M003FG 向けのリファレンス SW も同時に提供しており、TB9M003FG と合わせて使用することで、SW 開発負荷が低減でき、ECU 開発期間の短縮に貢献する。更に、TB9M003FG の MATLAB[®]/Simulink[®] モデルを、2025 年の実用化を目指して開発中である。

今後、モータードライバー内蔵品やほかの通信規格に対応した SmartMCD[™] シリーズの企画、開発、及びそれぞれの製品のシミュレーションモデルの Web 公開を進めていく。

文 献

- (1) 渡辺宏樹, 坂口翔一. 車載モーターを効率的に駆動するマイコン内蔵統合モーターコントロールドライバー SmartMCD[™] シリーズ. 東芝レビュー. 2023, **78**, 1, p.27-31. <<https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/jp/technology/corporate/review/2023/01/a08.pdf>>, (参照 2024-06-03).
- (2) 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. 2014, **134**, 1, p.96-105. <https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejias/134/1/134_96/_article/-char/ja/>, (参照 2024-06-03).

・ MATLAB/Simulink は、The MathWorks, Inc. の商標又は登録商標。



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.



平山 敬之 HIRAYAMA Takayuki
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.



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.