

開発支援強化と低速回転時の電流検出を実現したモーター制御ソフトウェア開発キット Motor Studio

Motor Studio: Motor Control Software Development Kit Enhanced by Development Support Tool and Current Detection Function during Low-Speed Rotation

伊藤 佑一 ITO Yuichi 田嶋 聰 TAJIMA Satoshi 松本 泰明 MATSUMOTO Hiroaki

利便性や作業効率などの向上のために、民生・産業・車載など幅広い分野で電動化が進展している。これに伴う電力消費量の増加を抑えるため、BLDC（ブラシレス直流）モーターとベクトル制御を組み合わせた高効率なモーター制御の需要が高まっている。

東芝デバイス＆ストレージ（株）は、当社製のMCU（マイクロコントローラーユニット）及び車載用のマイコン内蔵ゲートドライバーIC SmartMCD向けに、ベクトル制御対応のモーター制御ソフトウェア開発キット Motor Studioを提供してきた。更に、Motor Studioを強化して効率的なモーター制御ソフトウェア開発を支援するために、制御パラメーターの調整機能、制御情報のリアルタイム波形表示・ロギング機能、及び低速回転時の電流検出機能を追加した。

In line with recent trends of electrifying equipment to improve usability and work efficiency in the consumer, industrial, and automotive sectors, demand is growing for highly efficient motor control technology combining brushless DC (BLDC) motors with vector control to suppress power consumption increases.

To meet such market needs, Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation has developed a motor control software development kit corresponding to vector control called Motor Studio for its microcontroller units (MCUs) and SmartMCD series gate driver integrated circuits (ICs) with embedded MCUs. To streamline motor control software development, we have developed the following new technologies for enhancing Motor Studio performance: (1) a control parameter tuning support function, (2) real-time control information waveform data display and logging functions, and (3) a current detection function during the low-speed rotation. Motor Studio incorporating these technologies is expected to offer optimal motor control design for our MCUs and SmartMCD series ICs.

1. まえがき

BLDCモーターとベクトル制御（磁界のトルク成分（q軸）と磁束成分（d軸）を独立に制御する効率的なモーター制御方式）を組み合わせた、高効率なモーター制御の需要が急増している。東芝デバイス＆ストレージ（株）は、当社製のMCU及びSmartMCDを対象とした、ベクトル制御対応のモーター制御ソフトウェア開発キットであるMotor Studioを開発し、提供してきた。

Motor Studioは、PC（パソコン）上で動作するGUI（Graphical User Interface）（図1）と、MCU又はSmartMCD上で動作するファームウェア（FW）から構成される。ユーザーは、GUIを用いてモーター制御に必要な各種パラメーターや回転速度などの動作条件を設定してモーターを駆動することで、制御パラメーターの調整や制御アルゴリズムの評価を行う。

しかし、従来のMotor Studioには次の課題があった。第1に、ベクトル制御では、制御パラメーターの調整に高度な専門知識と多くの時間が必要であり、効率的に開発で

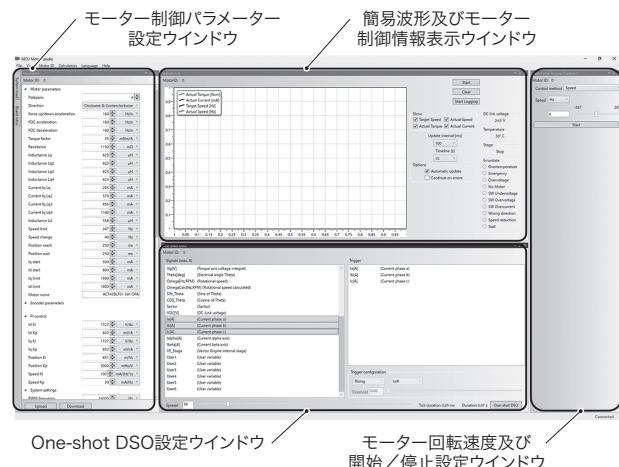


図1. Motor StudioのGUI

GUIを操作することで、様々な制御パラメーターの設定やモーター制御情報の取得ができる。

Motor Studio graphical user interface (GUI) display

きる機能が求められていた。第2に、従来のモニタリング機能（簡易表示機能とOne-shot DSO（Digital Storage

Oscilloscope)) より制御情報を把握・活用しやすい機能の要求があった。第3に、従来の1シャント電流検出方式 (BLDCモーターの三相電流を一つのシャント抵抗で間接的に測定する方式) では、低速回転時の電流検出が困難であり、その結果、低速回転域でのベクトル制御ができなかった。

これらを解決するために、制御パラメーターの調整機能 MTS、制御情報のリアルタイム波形表示・ロギング機能 Free-run DSO、及び低速回転時の電流検出機能1シャントシフト2PWM (Pulse Width Modulation) を追加した。

ここでは、これらの三つの機能について、技術的特長及び導入効果を述べる。

2. MTS

モーターのベクトル制御では、位置推定制御、速度制御、及び電流制御に、比例積分 (PI) 制御を用いる。高効率な制御のために、各PI制御の制御パラメーター (比例ゲイン K_p 、積分ゲイン K_i) を調整する。一つの制御パラメーターを変更するとほかの制御性能に影響するため、制御パラメーターの調整は複雑で難しい。特に調整開始段階では、モーターを回転させることすらできないことが多い。

また、Motor Studioのベクトル制御は、制御対象固有のモーター定数 (抵抗値・インダクタンス値・慣性モーメントなど) を基に実行するため、モーター定数が不明なモーターを回すことは困難だった。

MTSは、モーター定数を測定・推定し、PI制御の制御パラメーターの調整範囲を自動算出して、パラメーター調整を容易にする。Motor Studioと組み合わせることで、制御パラメーターの調整を支援し、効率的な開発を可能にする。

2.1 モーター定数の測定・推定

モーター定数の中でも抵抗値やインダクタンス値などは、モーターのカタログ・仕様書や、デジタルマルチメーター・LCR (インダクタンス、キャパシタンス、レジスタンス) メーターを使用した実測などから得られる。しかし、鎖交磁束 (逆起電力定数) や慣性モーメントを知るのは難しい。

モーター定数を明確にしてパラメーター調整を容易にするために、MTSは、FWを利用してモーター定数の測定・推定を実施する。鎖交磁束とインダクタンス値はモーターの電圧方程式から、慣性モーメントは電流から求めたトルクと角加速度から、抵抗値は電圧値と電流値の比例関係から、それぞれ計算する。

2.2 制御パラメーターの自動算出

PI制御の制御パラメーターは、システムの制御帯域・伝達関数などを基に、調整範囲や初期値を決定できる。MTS

では、モーターへの指令速度やPWM周期を利用し、伝達関数の自動計算により制御パラメーターの調整範囲を決定する。更に、調整範囲の中心近辺を初期値 (調整前の値) として、GUIスライダー操作による直感的・簡易的な制御パラメーター調整を支援する。

3. Free-run DSO

Motor Studioはこれまで、モーター制御状態のモニタリング手段として、簡易表示機能及びOne-shot DSO機能を提供してきた。

簡易表示機能は、回転速度 (目標値・推定値)、q軸電流値 (推定値)、トルク値 (推定値) のモーター制御情報をリアルタイムに表示できるが、表示項目はこれらの4種類に限定されており、モーター制御全体の状態の詳細な把握は困難であった。また、波形の表示周期 (1 ~ 1,000 ms) が、モーターの制御周期 (50 μ s程度) に対して長いため、速度指令や外乱による急激な制御状態の変化を詳細に観測できなかった。

一方、One-shot DSOは、電流・電圧・速度・ローターの位相角といった26種類のモーター制御情報と、ユーザーが追加した6種類の情報の、合計32種類の中から最大8チャネルを選び、モーター制御周期と同期して表示できる。瞬間的なモーター制御の挙動解析には有効であるが、リアルタイム表示には対応しておらず、またメモリー容量の制約により長時間のデータ表示ができなかった。

そこで、新たにFree-run DSOを開発した。Free-run DSOは、One-shot DSOと同じ情報を、モーター制御周期に同期してリアルタイムに表示する (図2)。更に、取得したデー

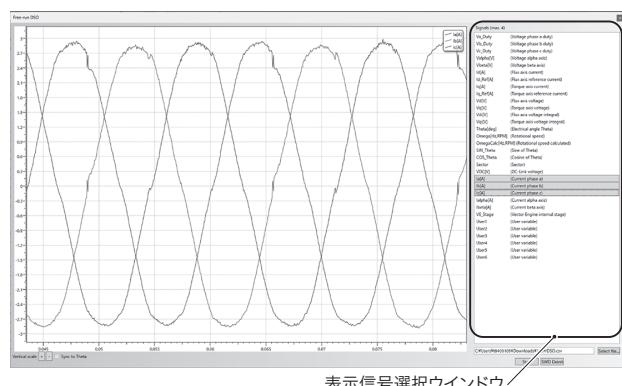


図2. Free-run DSOの表示画面

最大4チャネルの詳細な波形データを基に、制御パラメーターの調整や制御アルゴリズムの評価ができる。

Free-run digital storage oscilloscope (DSO) display screen showing real-time waveform data

表1. モーター制御状態のモニタリング機能の比較

Comparison of monitoring functions during motor control

機能	Free-run DSO	簡易表示機能	One-shot DSO
リアルタイム表示	○	○	×
表示チャネル数	4	4	8
選択対象のモーター制御情報数	32	4	32
データロギング	○	○	×
サンプリング周期	約50μs (モーター制御周期)	1~1,000ms	約50μs (モーター制御周期)

タはロギング機能によりファイルに保存可能であり、後で詳細な解析に活用できる。表1に、Free-run DSO、簡易表示機能、及びOne-shot DSOの比較を示す。

Free-run DSOを活用して、モーター制御情報をリアルタイムに観測しながら、効率的に制御パラメーターを調整できる。これにより、制御性能の最適化に要する時間の短縮と調整精度の向上が期待される。また、ロギング機能により、再現性の低い異常事象の後追い解析が可能となり、異常検出及びトラブルシューティングの効率が向上する。

通常、モーター制御状態を観測するために、オシロスコープやRAMモニターツールなどの外部機器を導入する必要がある。しかし、Free-run DSOを活用することで、これらの高価な設備がなくてもモーター制御ソフトウェアの開発が可能になり、開発コストの削減にも寄与する。

4. 1シャント-シフト2PWM

一般に、ベクトル制御では、モーターの三相電流を正確に検出する必要がある。このために、従来は各々の相の負電源側インバーターにシャント抵抗を適用する3シャント方式が主流であった。しかし、部品点数の増加や、回路設計の複雑化、コスト増などの問題があり、より簡素な1シャント方式が注目されている。

1シャント方式では、シャント抵抗は一つだけとし、電流検出のタイミングなどを調整することで三相の電流を検出する。これには、通常PWMやシフト1PWM^{(1), (2)}といった方式がある。

図3を用いて、通常PWMによる三相の電流検出について述べる。U相・V相・W相のモーター電流をそれぞれ I_u ・ I_v ・ I_w とすると、これらの和は常に0 ($I_u + I_v + I_w = 0$) である。区間Aでは、矢印①の時刻にU相とV相がオンになっているので、この時刻にシャント抵抗で検出できる電流は $-I_w$ ($=I_u + I_v$) である。矢印②の時刻にはU相だけがオンなので、 $+I_u$ が検出できる。 $I_v = -I_u - I_w$ であるから、これで三相の電流を全て求められる。

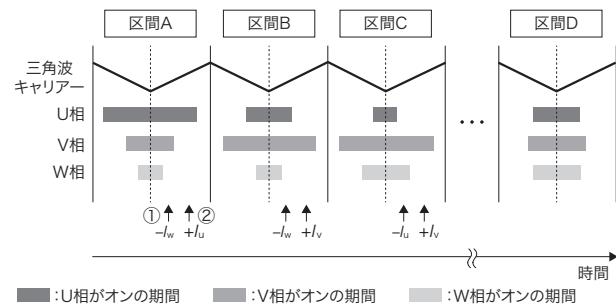


図3. 1シャント方式での電流検出の概要

1シャント方式では、特定の相がオンである間に電流検出するが、低速回転域では三相のオン期間が近くになり電流検出が難しい。

Outline of single-shunt current detection in motor control

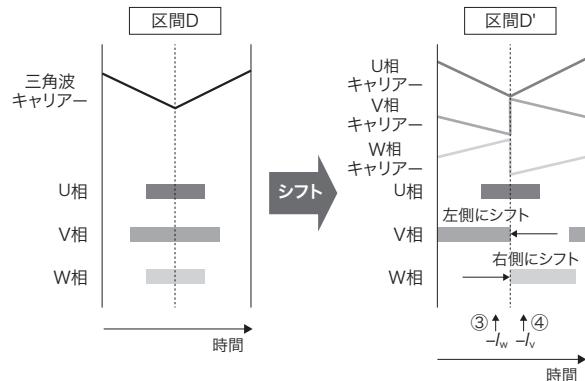


図4. 1シャント-シフト2PWMの概要

特定の相がオンである期間を、三角波キャリヤーの操作でシフトして、電流検出する。

Outline of single-shunt shift-2 pulse width modulation (PWM) method capable of current detection during low-speed rotation

この方法では低速回転域で、区間DのようにPWMのデューティー比が低くなり、三相のオンの期間が非常に近くなるため、電流検出のタイミングが限られて、正確な電流検出が難しい。

東芝グループは、低速回転域でもベクトル制御を1シャントで実現できる独自のPWM制御方式“1シャント-シフト2PWM”を開発済みである⁽²⁾ (図4)。任意の2相の三角波キャリヤー (この図ではV相とW相) を左右にシフトし、矢印③と④のタイミングでそれぞれ $-I_w$ と $-I_v$ を検出する。これにより、低速回転域でも三相の電流を正確に検出できる。

Motor Studioは、この1シャント-シフト2PWMに対応することで、従来は困難であった低速回転域でも、ベクトル制御を可能とした。これにより、モーター起動直後の低速回転域でもベクトル制御を行い (図5)、高効率化できる。

1シャントでのPWM方式には、モーターの回転速度 (変

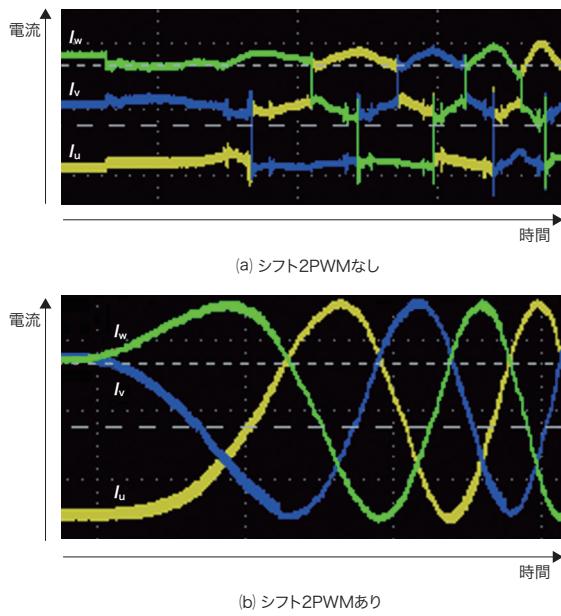


図5. モーター起動時の三相電流の波形

シフト2PWMがない場合は正しく電流検出できないためモーターは停止するが、シフト2PWMを採用することで正しく電流検出し、スムーズに起動できる。

Three-phase current waveform data on startup

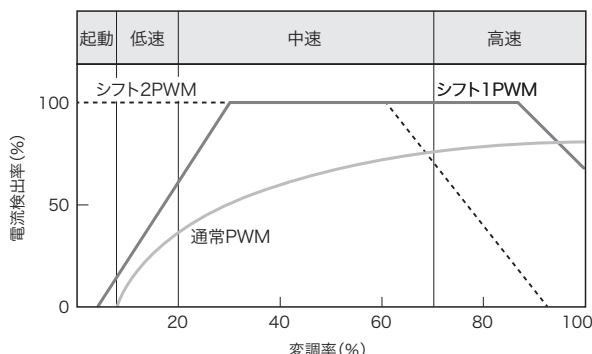


図6. PWM方式の違いによる電流検出率の比較

1シャントのPWM方式によって、電流検出率の高い回転速度域が異なる。
Comparison of single-shunt current detection rates of different PWM methods

調率)に応じた得失がある(図6)。Motor Studioでは、1シャントのPWM方式を、自動的に切り替える機能も新たに実装した。低速回転域ではシフト2PWM、中速回転域ではシフト1PWM、高速回転域では通常のPWM制御による電流検出に切り替える。この自動切り替え機能により、モーターの全回転速度域において電流検出が可能となり、高効率と高い制御性能を実現できる。

5. あとがき

Motor Studioを強化するMTS、Free-run DSO、及び1シャント-シフト2PWMについて述べた。これらの機能を活用することで、制御パラメーターの調整時間を短縮できるだけでなく、リアルタイムにモーター制御の詳細な状態を把握し、効率的な評価や不具合の早期発見が可能となる。更に、低速回転時の電流検出が可能になることで、全回転速度域にわたってベクトル制御を適用でき、高効率なモーター制御を実現できる。

今後は、更にMotor Studioの機能を拡充させることで、顧客の開発支援の強化に取り組む。

文 献

- 1 東芝デバイス&ストレージ. "MCU Motor Studio 4.0". <<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/semiconductor/product/microcontrollers/motor-studio.html>>, (参照 2025-09-10).
- 2 東芝デバイス&ストレージ. TB9M003FG 1シャントセンサーレスベクトル制御事例. Rev.1.0, 2024, 13p. <https://toshiba.semicon-storage.com/info/TB9M003FG_application_note_ja_20240912-AKX01294.pdf?did=159646&prodName=TB9M003FG>, (参照 2025-09-10).

 伊藤 佑一 ITO Yuichi
東芝デバイス&ストレージ(株)
半導体事業部 IC開発センター
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.

 田嶋 聰 TAJIMA Satoshi
東芝デバイス&ストレージ(株)
半導体事業部 IC開発センター
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.

 松本 泰明 MATSUMOTO Hiroaki
東芝デバイス&ストレージ(株)
半導体事業部 IC開発センター
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.