

PMSM 駆動システムの高性能・低コスト化に 貢献するモーター制御マイコンTMPM4K

TMPM4K Motor Control Microcomputer for High-Performance PMSM Drive Systems at Lower Cost

前川 佐理 MAEKAWA Sari 鈴木 信行 SUZUKI Nobuyuki 丹羽 亮太 NIWA Ryota

永久磁石同期電動機 (PMSM) は、民生・産業分野で広く普及しており、ベクトル制御を用いることで高効率・低騒音化が実現でき、駆動システムの高性能化が可能になる。しかし、PMSMの駆動には、高コストの電流センサーや位置センサーが必要になるので、センサーレス制御技術などが開発されているが、適用するには高度な技術が求められるため、普及の妨げになっていた。

東芝グループは、モーター駆動用にベクトル制御を容易に導入できるように、その機能の一部をハードウェア化したベクトルエンジン (VE) 内蔵のモーター制御マイコンを製品化している。今回、PMSM用に改良したVEと、インバーターへの通電パルス信号を生成するPMD (Programmable Motor Driver) を改良したA-PMD (Advanced PMD) を内蔵したTMPM4Kシリーズをリリースした。処理速度の向上による高性能化と部品点数削減による低コスト化が期待される。

Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) have become widely disseminated in the consumer and industrial fields in recent years. Progress has been made in enhancing the performance of PMSM drive systems through the introduction of vector control to secure high efficiency while reducing noise. However, the application of vector control to PMSM drive systems is hindered by issues associated with increased costs. These costs arise due to either the necessity for expensive sensors including current sensors and position sensors for vector control, or the necessity for advanced technology on the user's side if a sensorless control method for PMSM is employed in order to eliminate the requirement for expensive sensors.

In response to users' needs for the easy introduction of vector control into motor drive systems, the Toshiba Group has been developing and supplying motor control microcomputers that feature a vector engine (VE) incorporating certain vector control functions as hardware. We have now commercialized the TMPM4K, a motor control microcomputer suitable for PMSM drive systems equipped with an improved VE and an advanced programmable motor driver (A-PMD) to generate inverter control pulse signals. The TMPM4K is expected to offer high performance due to increased processing speed while reducing costs due to the smaller number of parts required.

1. まえがき

PMSMは、誘導モーターに比べ高効率であり、近年、民生や産業などの多分野へ普及が進んでいる。特に、民生分野では、「エネルギーの使用の合理化に関する法律」(省エネ法)に基づくトップランナー方式の施行により、省エネの要求が高まっており、高効率なPMSMが求められている。PMSMを高効率・低騒音で駆動するためには、ベクトル制御と呼ばれる制御方式が有効であるが、高度な制御技術が要求されるため、従来は、産業用途などに適用領域が限定されていた。

このような状況の中、東芝グループは、ベクトル制御の機能の一部をハードウェアとしてマイコン内に構築し、ユーザーの利便性を向上させたベクトルエンジン (VE) を搭載した、民生用モーター制御マイコンTX03, TX04シリーズを

リリースした⁽¹⁾(図1)。VEは、従来、CPUが実行していたベクトル制御に必要な処理のうち、用途によって大きく変わらない固定処理部分をハードウェアで構成することで、CPUの負荷を低減し、処理速度を向上させている。また、ハードウェア化しているため、ユーザーがベクトル制御を容易に導入できるようになっている(図2)。

今回、TX03, TX04シリーズから更に処理速度を向上させ、新たな機能を搭載した新モーター制御マイコンTXZ4シリーズ (TMPM4K) を開発した。ここでは、開発したマイコンに搭載された新たな機能と、それを用いたモーター制御技術の例について述べる。

2. モーター制御マイコンTMPM4Kの特長

2.1 高速なArm® Cortex®-M4コアと幅広いラインアップ
TMPM4Kシリーズの機能仕様を表1に示す。CPUは、

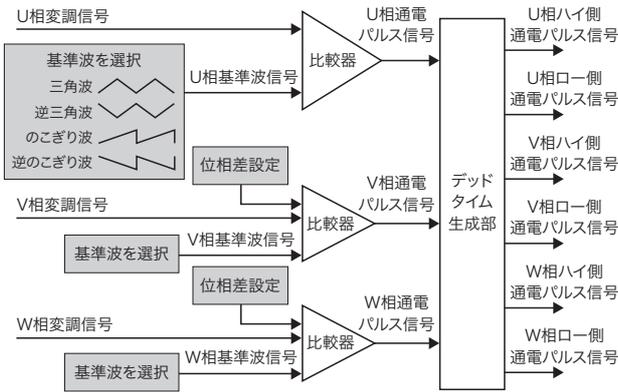


図3. A-PMDによる通電パルス信号の生成

各相で個別に基準波信号を選択できるので、自由度の高い通電パルス信号が生成できる。

Pulse signal generator in A-PMD

ており、同時駆動が可能なモーターの数や、ADC（アナログデジタル変換器）の数、汎用I/O（Input/Output）ポートの数など、幅広いユーザーに対応可能なラインアップになっている。更に、ROM、RAM、ADC、及びクロックのセルフチェック機構を搭載することで、機能安全にも対応している。

2.2 A-PMD

PMDは、インバーターへの通電パルス信号を生成する機能を持つ。新開発したA-PMDの機能ブロック図を、図3に示す。

ベクトル制御による電流制御の結果として得られた電圧指令値が、スイッチング素子のオン状態の割合に対応する変調信号としてA-PMDに入力される。A-PMDは、変調信号とキャリアと呼ばれる基準波信号を比較し、通電パルス信号を生成する。基準波信号は、三角波状やのこぎり波状など様々な形状があるが、従来のPMDでは、各相で同じ基準波信号しか設定できなかった。

これに対し、TMPM4Kに搭載する新しいA-PMDでは、各相で異なる基準波信号を設定できるほか、各相の基準波信号に位相差を設けることもできるようにした。このように自由度が大きく広がったA-PMDは、様々な形状の通電パルス信号を生成することができ、PMSMの高度な制御機能の実現を可能とした。

3. TMPM4Kを用いたモーター制御の高度化

3.1 1シャント電流検出技術

ベクトル制御では、PMSMに流れる電流を制御するために電流を検出する必要がある。一般には、図4(a)に示すよ

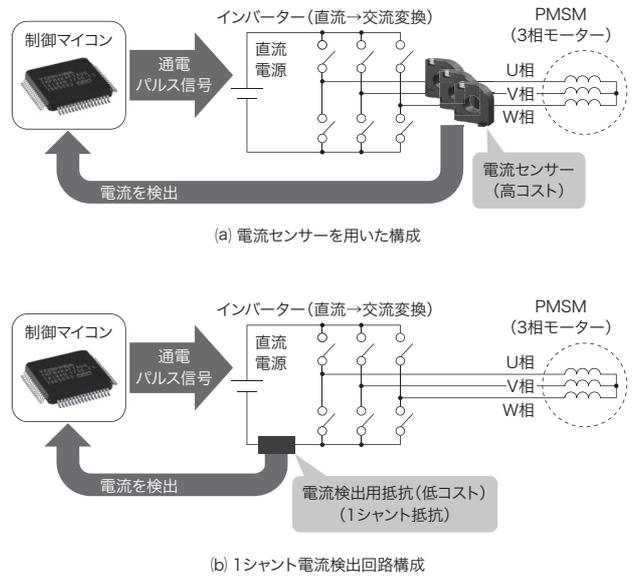


図4. PMSMの駆動構成と電流検出回路

一般に、PMSMの駆動システムは、インバーター、電流を検出するセンサー、制御するマイコンで構成されている。

Configuration of PMSM control schemes with different current detection circuits

うに、インバーターからPMSMに向かう出力線に電流センサーを設ける構成が用いられる。しかし、民生用途では、小型・低コストの要求から、図4(b)に示すようにインバーターの直流部に設けた単一の電流検出用抵抗（1シャント抵抗）で3相の相電流を検出する技術が採用されている。このシャント抵抗には、インバーターのスイッチングに応じた電流が流れるため、相電流の検出特性は、インバーターへの通電パルス信号に大きく影響される。

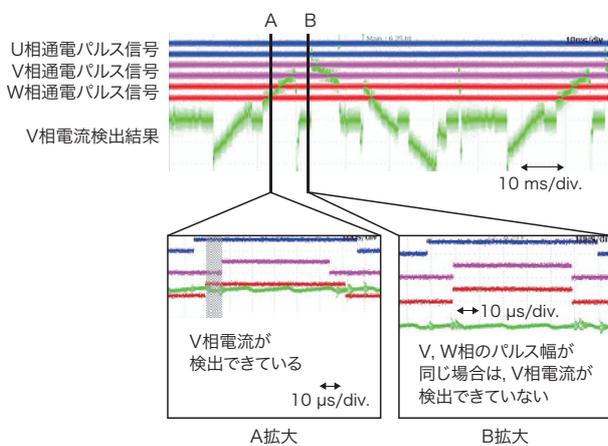
TMPM4Kでは、インバーターへの通電パルス信号は、A-PMDにより様々なパターンで構成できるため、1シャント電流検出に適した通電パルス信号の生成が容易に実現できる。

図5(a)は、TMPM4Kで実現できる通電パルス信号パターンと、それぞれの通電パルス信号による1シャント電流検出の特性を示している。

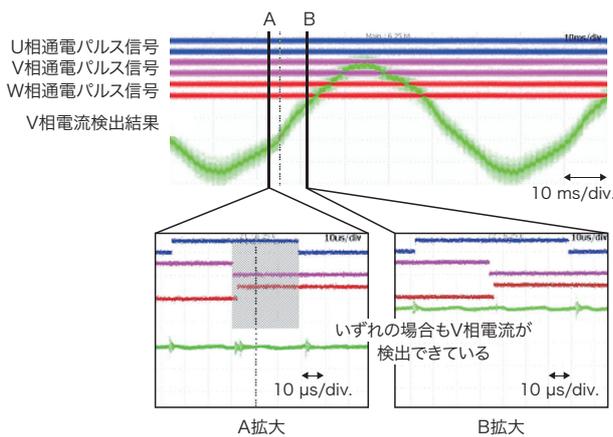
一般構成の通電パルス信号では、低・中速域では相電流の検出率が低下する。一方、3相の基準波信号を三角波、逆三角波、のこぎり波、逆のこぎり波などの組み合わせで構成するパターン1は中速域、パターン2は低・中速域において、相電流の検出率を高くできる^[2]。図5(b), (c)は、低い出力電圧領域における、電流検出特性の比較を示しており、パターン2で通電パルス信号を構成することで、相電流の検出率を向上できている。

通電パルス信号パターン			電流検出率		
名称	基準波信号	通電パルス信号	低速	中速	高速
一般構成	三角波 三角波 三角波	U相 V相 W相 検出タイミング↑↑	低	中	高
パターン1	三角波 逆三角波 三角波	U相 V相 W相 検出タイミング↑↑	低	高	中
パターン2	三角波 逆のこぎり波 のこぎり波	U相 V相 W相 検出タイミング↑↑	高	高	中

(a) TPM4Kで実現できる通電パルス信号パターンと電流検出特性



(b) 一般構成の通電パルス信号による1シャント電流検出特性



(c) パターン2の構成による1シャント電流検出特性

div.: division

図5. TPM4Kの通電パルス信号パターンと1シャント電流検出特性

TPM4Kで構成できる通電パルス信号パターンに応じて1シャント電流の検出特性は変化し、パターン2では、低・中速域において、相電流の検出率を高くできている。

Patterns of pulse signals and characteristics of single-shunt current detection circuit of TPM4K

更に、TPM4Kでは、1シャント電流検出に応じた通電パルス信号を生成するための基準波信号選択やADCタイミング設定などもVEの機能として持っているため、ユーザーによる簡易な設定で、このような1シャント電流検出技術を利用できる。

3.2 低速域の位置センサーレス制御技術

ベクトル制御では、相電流を検出し、磁極位置に応じてインバーターへの通電パルス信号を制御する。このため、PMSMの磁極位置の検出が必要であり、通常、レゾルバーやエンコーダーといった位置センサーが用いられるが、メンテナンス性やコスト低減への要求から、位置センサーなしで制御できる位置センサーレス制御の要望が高まっている。

一般に、停止・低速域では、PMSMの突極性を用いた位置センサーレス制御が用いられる。突極性は、磁極位置によって磁気抵抗及びインダクタンスが変化する特性であり、PMSMの固定子構造によって生じる。このため、電圧と電流の情報からインダクタンスを検出することで、磁極位置を推定することができる。

従来の低速域の位置センサーレス制御では、インダクタンスを検出するためにテスト電圧を印加しており、この結果として発生する高周波の電流脈動による騒音が、課題であった(図6)。

そこで、図7で示すような通電パルス波形を生成し、パルス通電中の電流の変化量から磁極位置を推定する方式を開発した⁽³⁾。この通電パルス波形は、TPM4KのA-PMOを用いると、基準波信号の選択だけで実現できる。図8(a)は、PMSM起動時の磁極位置推定結果を、リファレンスとなるエンコーダーで検出した磁極位置と比較したものである。両者はほぼ一致しており、開発した方式が、PMSMの停止状態から磁極位置を推定できていることが分かる。また、図8(b)

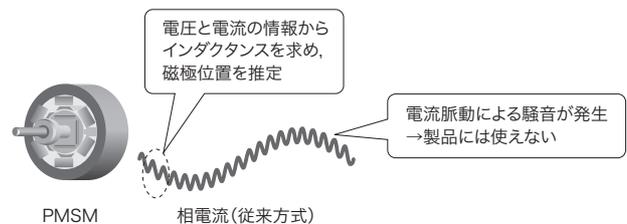
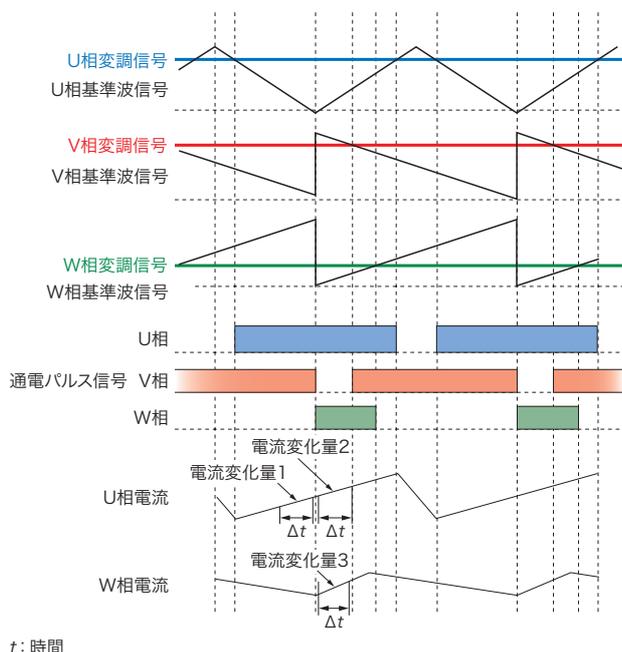


図6. 従来の位置センサーレス制御における低速域での課題

従来技術では、高周波のテスト電圧を印加する必要があり、電流脈動による騒音が発生する問題がある。

Problem of conventional position-sensorless control in low-speed region

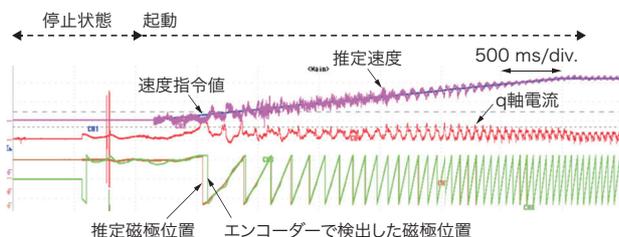


t: 時間

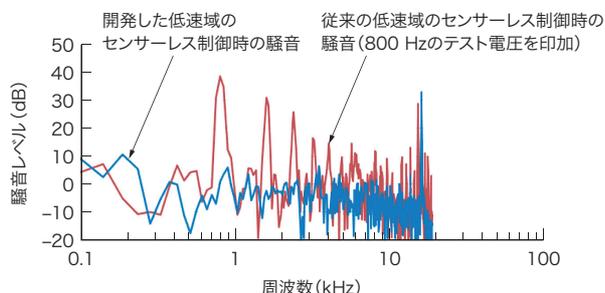
図7. A-PMDで生成した通電パルス信号波形

3種の基準波信号を用いて生成した通電パルス信号を用いた場合の電流波形とADCの実行タイミングを示している。パルス通電中の電流の変化量から、磁極位置が推定できる。

Pulse waveforms for position-sensorless control generated by A-PMD



(a) 停止状態からの磁極位置推定特性



(b) 騒音の改善効果

図8. 位置センサーレス制御の低速域での低騒音化

開発した方式は、テスト電圧を印加しないため、低騒音化が実現できた。

Noise reduction by means of position-sensorless control in low-speed region

は、従来方式と開発した方式の騒音レベルを比較した結果を示している。開発した方式では、テスト電圧を印加する必要がないため、従来に比べ低騒音であることが分かる。

4. あとがき

今回、処理能力を向上させるとともに、新たな機能も実現した民生用モーター制御マイコンTMPM4Kシリーズをリリースした。これにより、製品の部品点数削減や様々なモーター制御技術が低コストで実現可能である。このベクトル制御機能のマイコンへの搭載技術は、平成29年度、及び平成30年度の関東地方発明表彰 発明奨励賞を受賞⁽⁴⁾、⁽⁵⁾した。

今後は、PMSMの普及に伴い、マイコンへの要求もますます高くなることが予想されるため、更なる高機能化とユーザーの利便性を考慮したマイコンの開発を行っていく。

文献

- (1) 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.
- (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D. 2014, 134, 1, p.96-105.
- (3) 前川佐理, ほか. 対称型キャリアを用いたPWMによるPMSMの低速駆動域での位置センサレス制御方式. 東芝レビュー. 2016, 71, 6, p.52-55. <https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2016/06/71_06pdf/f04.pdf>. (参照 2018-09-25).
- (4) 発明協会. “平成29年度関東地方発明表彰受賞者一覧”. 発明協会. <http://koueki.jiii.or.jp/hyosho/chihatsu/H29/jusho_kanto/index.html>. (参照 2018-09-25).
- (5) 発明協会. “平成30年度関東地方発明表彰受賞者一覧”. 発明協会. <http://koueki.jiii.or.jp/hyosho/chihatsu/H30/jusho_kanto/index.html>. (参照 2018-10-25).

・ Arm及びCortexは、Arm Limitedの登録商標。



前川 佐理 MAEKAWA Sari, D.Eng.
 研究開発本部 生産技術センター
 制御技術研究部
 博士(工学) 電気学会・IEEE 会員
 Control Technology Research Dept.



鈴木 信行 SUZUKI Nobuyuki
 研究開発本部 生産技術センター
 制御技術研究部
 電気学会会員
 Control Technology Research Dept.



丹羽 亮太 NIWA Ryota
 東芝マイクロエレクトロニクス(株)
 ミックスシグナルコントローラ統括部
 システムソリューション技術部
 Toshiba Microelectronics Corp.