

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

Position-Sensorless Control Technology for PMSMs in Low-Speed Region Using PWM Waveforms Generated by Symmetrical Carriers

前川 佐理 柴野 勇介 長谷川 幸久

■ MAEKAWA Sari ■ SHIBANO Yusuke ■ HASEGAWA Yukihisa

永久磁石同期モータ (PMSM) は誘導モータに比べて高効率であることから、様々な分野への普及が進んでいるが、小型化とコスト低減のため、一般にPMSMの駆動に必要な磁極位置センサを使用しない構造が求められている。こうした背景の下、様々な位置センサレス制御方式が検討されているが、この中で特にPMSMを低速で駆動する領域では、PMSMにテスト電圧を印加し、そのときのモータ電流を検出することで磁極位置を推定する、INFORM (Indirect Flux Detection by Online Reactance Measurement) 方式などの方法がある。しかしこの方法では、テスト電圧の印加によって発生する騒音が問題であった。

そこで東芝は、テスト電圧を印加することなく、PMSMを駆動するためのPWM (パルス幅変調) 電圧波形を対称型キャリアを用いて生成することで磁極位置を推定する、低速駆動域での新しいセンサレス制御方式を開発した。実験により、低速駆動域での良好なセンサレス制御と低騒音化を実現できることを確認した。

In line with the widespread dissemination of permanent magnet synchronous motors (PMSMs) with higher efficiency compared with induction motors (IMs) in a variety of applications, demand has arisen for a position-sensorless control technology to drive PMSMs in the low-speed region while estimating the magnetic pole position without a rotor position sensor in order to achieve compactness and reduce costs. The indirect flux detection by online reactance measurement (INFORM) method, one of the position-sensorless control methods under consideration for this purpose, can estimate the magnetic pole position by detecting three-phase currents when applying a test voltage. However, the audible noise generated by the application of the test voltage is a serious issue.

To rectify this situation, Toshiba has developed a position-sensorless control technology for PMSMs in the low-speed region that eliminates the need to apply a test voltage. This technology makes it possible to estimate a magnetic pole position using novel pulse-width modulation (PWM) waveforms generated by symmetrical carriers. Experiments on this technology have confirmed that it achieves improved control performance in the low-speed region and a reduction of audible noise.

1 まえがき

永久磁石同期モータ (PMSM) は、誘導モータに比べ高効率であり、近年、民生用途から産業用途まで多分野への普及が進んでいる。PMSMを駆動するためには、通常は図1に示すように磁極位置センサが必要であるが、小型化とコスト低減のために位置センサレス制御の要求が高まっており、様々な方式が検討されている。高速駆動時は、回転により発生するPMSMの誘起電圧を用いて磁極位置を推定できる。一方、低速駆動時に磁極位置を推定するためには、突極性を持つPMSMの特徴であるインダクタンスが磁極位置に応じて変化する特性を利用する方式がある。

これまでに低速駆動域での位置センサレス制御方式として、高周波電圧を重畳しているときの電流応答を利用する方式⁽¹⁾や、特殊なテスト電圧を印加しているときの電流微分値を利用するINFORM方式⁽²⁾などが報告されている。

これらの方式は低速駆動域で位置センサレス制御を実現できるが、特別な電圧を印加することによって発生する騒音が問

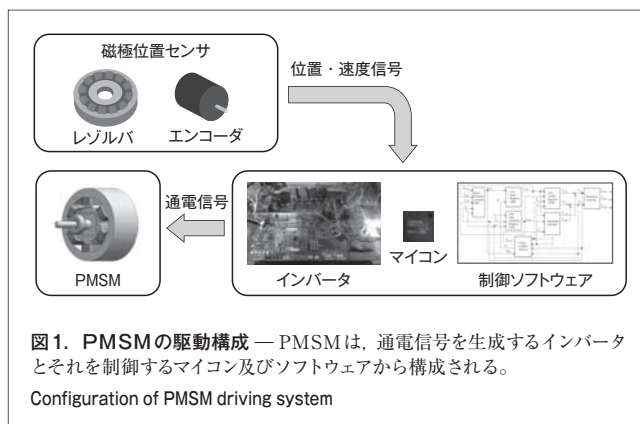
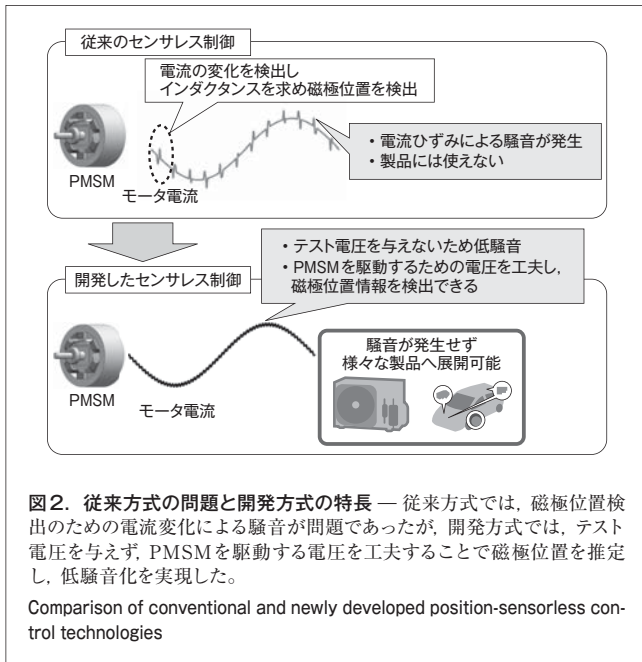


図1. PMSMの駆動構成 — PMSMは、通電信号を生成するインバータとそれを制御するマイコン及びソフトウェアから構成される。
Configuration of PMSM driving system

題となる。

これを解決するため東芝は、テスト電圧を印加せず、PMSMを駆動するための電圧を工夫することで磁極位置を推定する、新しい位置センサレス制御方式を開発した。これにより、従来困難であった低速駆動域での位置センサレス制御と低騒音化の両立を実現した (図2)。



ここでは、今回開発した位置センサレス制御方式の概要と、その効果を実験で検証した結果について述べる。

2 磁極位置推定法の原理

2.1 基本的なINFORM方式

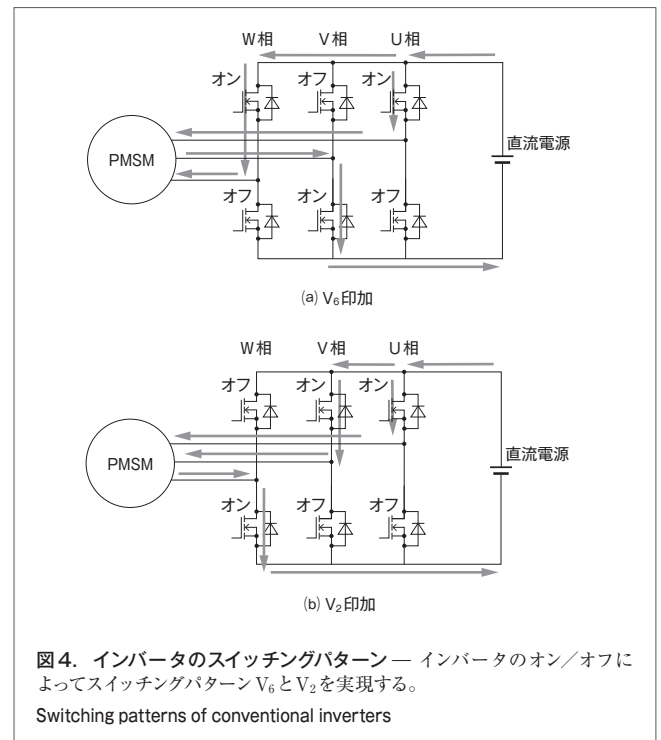
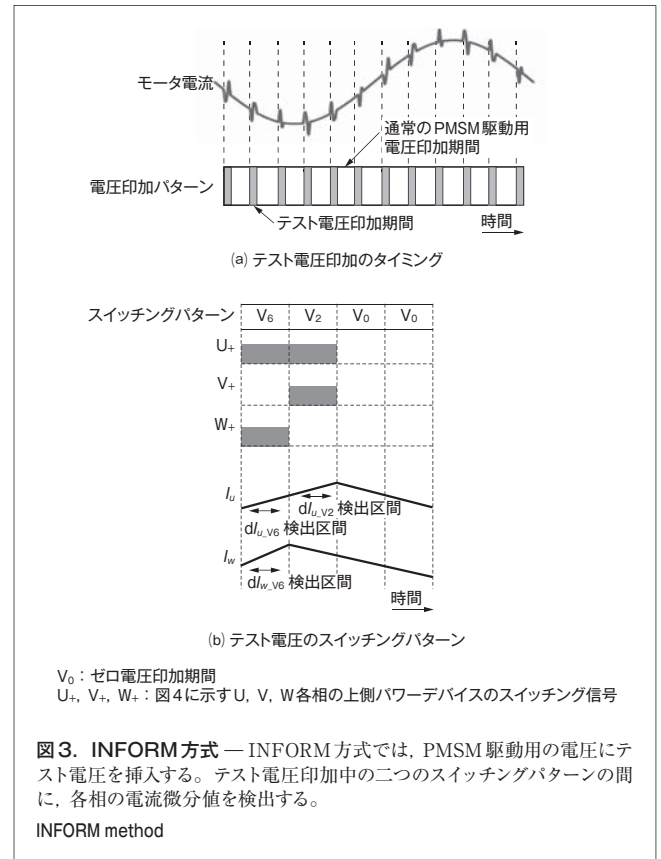
INFORM方式は、**図3(a)**に示すように、PMSMを駆動する電圧の印加期間にテスト電圧を挿入する。テスト電圧は**図3(b)**のスイッチングパターンで与えられ、 V_6 及び V_2 のパターンではそれぞれ**図4(a)**及び**(b)**のようにインバータの各パワーデバイスがオンし、電流が流れる。そして、このパターンのときに生じる電流の変化量を**図3(b)**の矢印区間で検出し、磁極位置を推定する。

ここで、PMSMの各相インダクタンス L_u 、 L_v 、及び L_w を式(1)に示す。 θ は磁極位置、 L_0 は磁極位置によらない一定のインダクタンス値、 L_1 は突極性に起因し、磁極位置に応じて変化するインダクタンス値の振幅である。各相のインダクタンスは 2θ の関数となって変化する。検出した電流微分値は、インダクタンスと同様に 2θ の関数となって変化する特性を持つため、磁極位置を求めることができる。

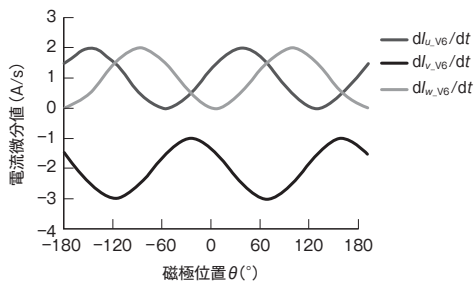
$$\begin{aligned} L_u &= L_0 - L_1 \cos(2\theta) \\ L_v &= L_0 - L_1 \cos(2(\theta - 2\pi/3)) \\ L_w &= L_0 - L_1 \cos(2(\theta + 2\pi/3)) \end{aligned} \quad (1)$$

スイッチングパターン V_6 及び V_2 を印加中の各相の電流微分値を、それぞれ**図5(a)**及び**(b)**に示す。

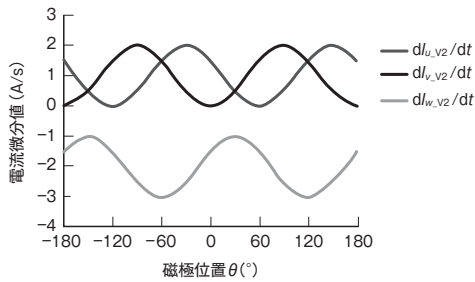
磁極位置を求めるためには直流オフセット量が共通であり、位相差がそれぞれ $2\pi/3$ の信号を選択する必要がある。ここ



では、 V_6 印加中のW相電流微分値 dI_{w_V6}/dt 、 V_2 印加中のU相電流微分値 dI_{u_V2}/dt 、及び V_6 印加中のU相電流微分値 dI_{u_V6}/dt を選択することで式(1)のインダクタンス特性と同様の



(a) V_6 印加時



(b) V_2 印加時

図5. スイッチングパターン V_6 及び V_2 印加時の3相電流微分値 — V_6 及び V_2 を印加している間に得られる3相の電流微分値から、直流オフセット量が同じ3波形を選んで磁極位置を求める。

Changes in derivative values of three-phase currents at time of application of V_6 and V_2

位相差 $2\pi/3$ の信号を三つ得ることができる。これら三つの電流微分値に基づいて、磁極位置 θ を求めることができる⁽³⁾。

2.2 開発した新しいセンサレス制御方式

従来のINFORM方式では、特定の周期ごとに電圧を印加するため、図3(a)に示すように電流がひずみ、騒音が問題となる。

そこで当社は、テスト電圧を印加せず、PMSM駆動用のPWM(パルス幅変調)電圧のスイッチングパターンを変えて磁極位置推定を行う、新しいセンサレス制御方式を開発した。しかし一般的なPWM波形生成方法では、出力電圧が小さい場合、電流微分に必要な電圧が発生しない。このため当社は、図6に示すPWM波形生成方法を開発した⁽⁴⁾。PWMでは、基準信号(キャリア)と、生成したいパルス幅に応じた大きさを持つ変調信号(デューティ)を比較して、キャリアがデューティより小さい期間だけパルスが発生する。ここではキャリアとして、三角波と、2種類ののこぎり波を用いた。各キャリア波形は、三角波の谷を中心に対称となる。

図中の各相PWM波形に表示した矢印は、各相のデューティが増加したときにパルス幅が増加する方向を示しており、U相は両側へ、V相は左側、W相は右側へとパルス幅が増加する。キャリアと比較される各相のデューティは、電流微分時間 Δt がスイッチングパターン V_2 及び V_6 の間に必ず発生するように補正を行う。この補正によりパルス幅が最小になるW相においても、パルス幅を必ず電流微分時間 Δt 以上にできる。

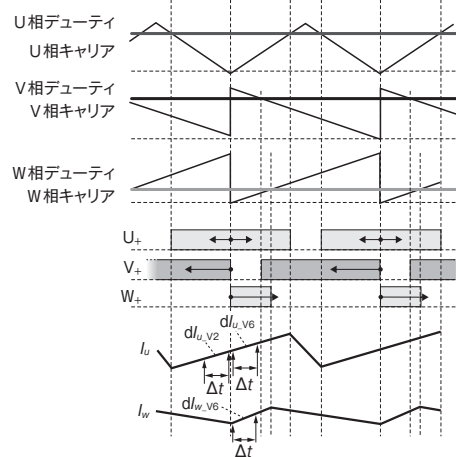


図6. 対称型キャリアを用いたPWM波形 — 3種類の対称型キャリアを用いてPWM波形を生成し、3相の電流微分値を検出する。

PWM waveforms generated by symmetrical carriers

電流検出は、三角波の谷付近とその両側 Δt 離れた縦矢印の4点で行い、それぞれの電流値の差分値を電流微分値とする。

3 実験結果

3.1 磁極位置推定特性

実験に用いたPMSM及び制御の条件を表1に示す。電流微分値を得るための微分時間 Δt は $8\mu s$ とした。無負荷時の磁極位置推定特性を図7に示す。速度制御を電気周波数1.5 Hz(機械周波数 30 min^{-1} に相当)指令で制御しており、磁極位置は誤差ほぼゼロで推定できている。また、検出した3相の電流変化量の特性を図8に示す。 V_6 印加時のW相電流変化量 dI_{w_v6} とU相電流変化量 dI_{u_v6} 、並びに V_2 印加時のU相電流変化量 dI_{u_v2} であり、磁極位置に対応した位相差 $2\pi/3$ の電流変化量が検出できている。電流変化量の振幅は0.1 A程度であり、定格電流 $6.1\text{ A}_{\text{rms}}$ の振幅の1%程度と非常に小さいが、良好なセンサレス制御ができている。

3.2 位置センサレス制御時の騒音の比較

PWM停止時、センサ付き駆動、INFORM方式によるセン

表1. 実験パラメータ

List of experimental parameters

項目		数値
モータ	定格電流	6.1 A _{rms}
	d軸インダクタンス L_d	9.77 mH
	q軸インダクタンス L_q	22.4 mH
	永久磁石による鎖交磁束 ϕ_p	0.288 Wb
制御	キャリア周波数	10 kHz
	電流微分時間 Δt	8 μs

サレス駆動、及び開発した対称型キャリアによるPWM方式によるセンサレス駆動の場合について、騒音の比較を図9に示す。キャリア周波数は10 kHzに設定した。

PWM停止時は、PMSMとして完全に通電をオフしており、このとき発生している騒音スペクトルは測定環境の暗騒音である。

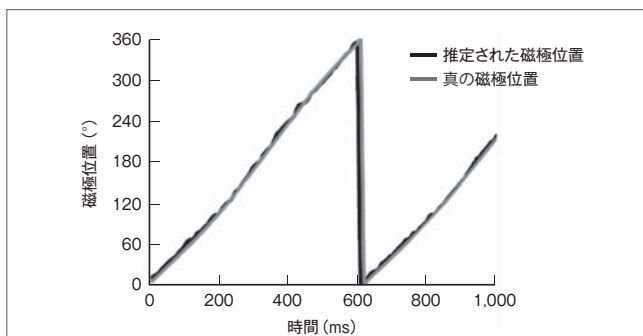


図7. 無負荷時の磁極位置推定特性 — 開発方式による無負荷時の磁極位置の推定結果は、真の磁極位置によく一致している。
Estimation of magnetic pole position at time of no load

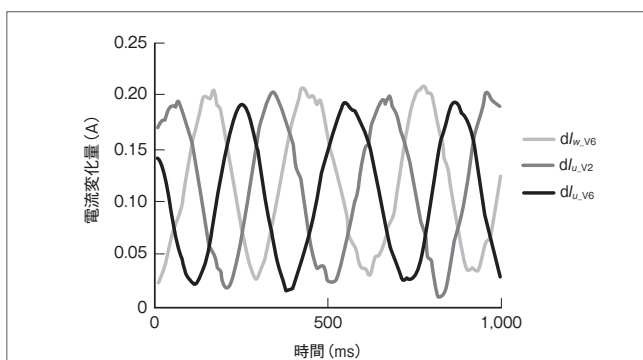


図8. 無負荷時の3相電流変化量検出値 — 無負荷時の3相電流変化量検出値は、磁極位置に応じて正弦波状に変化しており、良好なセンサレス制御ができた。
Changes in derivative values of three-phase currents at time of no load

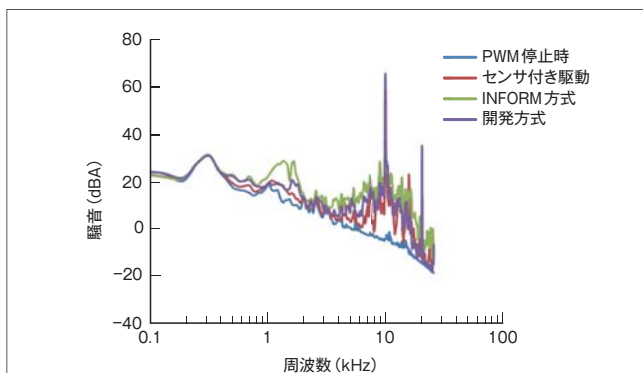


図9. 制御方式による騒音の比較 — 低周波の騒音は、開発方式が従来のINFORM方式より10 dBA程度低下しており、低騒音化を実現できた。
Comparison of noise levels of position-sensorless control technologies

センサ付き駆動は、特別な信号は印加していないため、他の駆動方式に比べて全周波数範囲で騒音値が低い。

INFORM方式は、テスト電圧を10 msごとに印加した。騒音はセンサ付き駆動に比べると1~2 kHz領域で増加しており、可聴域である15 kHz以下の周波数であるため問題が大きい。

開発方式は、1~2 kHz付近の可聴域の耳障りな騒音値を約10 dBA低減できており、低騒音化が実現できている。一方、キャリア周波数である10 kHzの騒音は残っているが、別途実施したキャリア周波数を16 kHzに設定した実験では、人の可聴域を超えるため、騒音が聞こえないことを確認している⁽⁵⁾。

4 あとがき

テスト電圧を印加せず、PMSMを駆動するPWM電圧波形を対称型キャリアを用いて生成する、低速駆動域での新しいセンサレス制御方式を開発した。テスト電圧を印加しないため、従来のINFORM方式よりも可聴域の騒音を約10 dBA低減しながら、低速駆動域で位置センサレス制御を実現できることを確認した。

今後は、製品への適用に向け、更なる騒音低減のための改良や磁極位置検出精度の向上などを検討していく。

文献

- 中沢洋介. “永久磁石リラクタンスモータの回転センサレス制御”. 電気学会自動車研究会資料, VT-02, 1-13. 東京, 2002-03, 電気学会. 2002, p.67-72.
- Schroedl, M. "Sensorless Control of AC Machines at Low Speed and Standstill Based on "INFORM" Method". Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty First IAS Annual Meeting, Volume 1. San Diego, CA, USA, 1996-10, IEEE. 1996, p.270-277.
- 前川佐理 他. 対称型キャリアを用いたPWM高調波による低速センサレス制御の提案. 電気学会論文誌D. 135, 6, 2015, p.596-602.
- 前川佐理 他. 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. 134, 1, 2014, p.96-105.
- 前川佐理 他. “対称型キャリアを用いたPWM高調波による低速センサレス制御の高周波化”. 平成28年電気学会全国大会論文集4. 仙台, 2016-03, 電気学会. 2016, p.205-206.



前川 佐理 MAEKAWA Sari, D.Eng.

生産調達統括部 生産技術センター 制御技術研究部主任研究員, 博士(工学)。パワーエレクトロニクス, EMI, 及びモータドライブの研究・開発に従事。電気学会, IEEE会員。Control Technology Research Dept.



柴野 勇介 SHIBANO Yusuke

生産調達統括部 生産技術センター 制御技術研究部。パワーエレクトロニクス及びモータドライブの研究・開発に従事。電気学会会員。Control Technology Research Dept.



長谷川 幸久 HASEGAWA Yukihisa

生産調達統括部 生産技術センター 制御技術研究部研究主幹。モータ, モータ制御, 及びインバータの研究・開発に従事。電気学会, 精密工学会会員。Control Technology Research Dept.