

直流バス電流の PWM 高調波を利用した 磁極位置・電流センサレス IPM モータの初期位置推定特性

学生員 村田 和紀* 正員 野口 季彦 (長岡技術科学大学)

Initial Rotor Position Estimation Characteristics of Mechanical-Current Sensorless IPM Motor Using PWM Harmonics Detected in DC-Bus Current

Kazunori Murata*, Student Member, and Toshihiko Noguchi, Member (Nagaoka University of Technology)

Abstract – This paper describes an initial rotor position estimation method of an interior permanent-magnet motor with neither a mechanical rotor position transducer nor an inverter output current transducer. The voltage-source PWM inverter is operated with a frequency-modulated three-phase carrier modulation technique and injects PWM harmonic voltages to the motor. The corresponding PWM harmonic current is detected by a single shunt resistor in the DC-bus and is utilized to estimate the rotor position of the motor on the basis of the rotor saliency. A prototype experimental setup has been developed and experimental tests have been conducted to examine initial rotor position estimation characteristics. As a result, an offset error was scarcely observed but good linearity was confirmed in estimating the initial rotor position.

キーワード：IPM モータ, 磁極位置・電流センサレス制御, 直流バス電流検出, PWM 高調波, 初期位置推定

Keywords : IPM motor, mechanical-current sensorless control, DC-bus current detection, PWM harmonics, initial rotor position estimation

1. はじめに

筆者らは周波数変調形三相キャリア変調により発生する PWM 高調波電流を利用した内部永久磁石 (IPM) モータの磁極位置センサレス制御法を検討してきた^{[1][2]}。更に究極的なセンサレス制御システムを実現するため、三相交流電流に代わって直流バス電流を検出し、そこで得られた PWM 高調波電流を利用する手法を提案した^{[3][4]}。

本稿では、直流バス電流検出によるモータ電流の復元とそれに含まれる PWM 高調波を利用した初期位置推定特性を実験的に確認したので報告する。

2. 直流バス電流から抽出された PWM 高調波による磁極位置推定

<2.1> 直流バス電流検出によるモータ電流の復元

三相キャリア PWM によるインバータの出力電圧ベクトルは非ゼロ電圧ベクトルのみからなり、三相キャリアの相順に対応した順序で 6 つの電圧ベクトルが切り換わる。そのため、直流バス電流 I_{dc} には常にインバータのスイッチングモード S_u, S_v, S_w に対応した離散的なモータ電流の振幅情報が反映される^[5]。その関係は Fig. 1 に示したとおりであり、 I_{dc} は(1)のように表される。

$$I_{dc} = S_u i_u + S_v i_v + S_w i_w \quad (1)$$

しかし、1 回のスイッチングで得られる電流情報は 1 相分のみであるため、ベクトル制御に必要な $3\phi-2\phi$ 変換を行うことができない。そこで、1 回前のスイッチングにおける他相の電流情報と、三相電流の和が零である条件を利用して、スイッチングモードに応じて $3\phi-2\phi$ 変換の式を(2)~(4)のように切り換える。

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \sqrt{3} & 0 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_w \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -\sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \sqrt{3} & 0 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \end{bmatrix} \quad (4)$$

Fig. 2 は直流バス電流のサンプリングと二相電流の復元方法を模式的に示したものである。例えば、現在のスイッチングモードが $v_{(6)}$ であり、 w 相の電流が直流バスから検出されているとする。次のスイッチングモード $v_{(2)}$ に遷移する際、 w 相の電流値はスイッチングの直前で零次ホールドしておき、新たな v 相の電流値を直流バス電流から得る。このようにして 1 回前のスイッチングモー

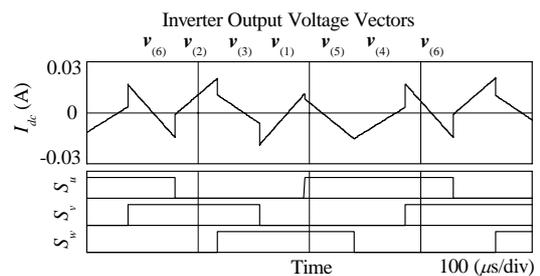


図1 インバータスイッチングモードと直流バス電流
Fig. 1. Inverter switching modes and DC-bus current.

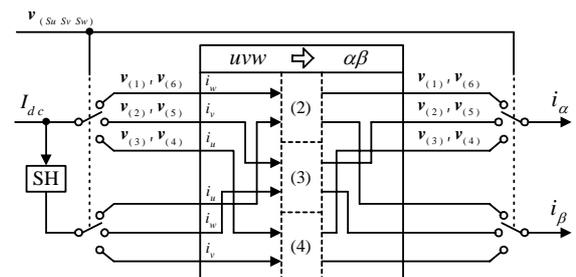


図2 直流バス電流のサンプリングとモータ電流の復元
Fig. 2. DC-bus current sampling and motor current restoration.

ドにおける電流情報を使用するが、(3)を用いて二相電流の復元を行うことができる。

<2.2> PWM 高調波電流を利用した磁極位置推定

Fig. 3 に磁極位置・電流センサレス制御システムを示す。直流バスから得られた二相電流は $\hat{d}-\hat{q}$ 推定座標へ変換された後、キャリア周波数に相当する PWM 高調波電流 i_{dh}, i_{qh} を抽出するために同図(b)のように帯域通過フィルタ (BPF) に入力される。これら i_{dh}, i_{qh} の位相差は磁極位置真値と推定位置が一致したとき 90 (elec. deg) であるため、この位相差から 90 (elec. deg) を減じることで磁極位置推定誤差 $\Delta\theta_m$ を得ることができる。更にこの $\Delta\theta_m$ を位置推定アルゴリズムに相当する二次低域通過フィルタ (LPF) に入力し、 $\Delta\theta_m$ を零に収束するように磁極位置推定値 $\hat{\theta}_m$ を動的に修正する。

3. 実験システムと初期位置推定特性

<3.1> モータ電流の復元特性

Fig. 4(a)にインバータ出力電流をホール CT で直接検出した場合の二相電流を、同図(b)に直流バス電流から復元した二相電流を示す。これらの電流はマイクロコントローラ SH7046F (10bit の A/D 変換器を内蔵) に取り込んだ後、D/A 出力させたものであり、モータ電流の復元は良好に行われており両者の波形は良く一致している。

<3.2> 初期位置推定特性

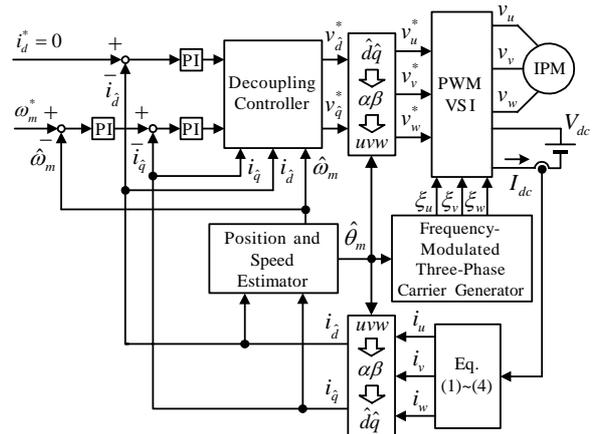
Fig. 5(a)は回転子を 10 (mech. deg)毎に固定し静止時の磁極位置推定を行った結果である。同図(b)は真値と推定値の誤差であり、現時点では平均的に 22 (mech. deg)のオフセット誤差が見られるが、同図(a)に示されているように良好なりニアリティーをもつ推定結果が得られた。このオフセット誤差については直流バス電流のサンプリングに起因する復元遅れが関係していると思われるので、今後、その補償法について検討しなければならない。

4. まとめ

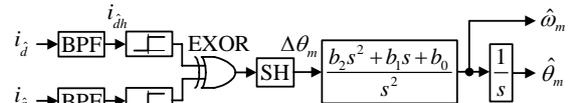
本稿ではモータ電流を直流バス電流から復元し、そこに含まれる PWM 高調波を用いて IPM モータの磁極位置を推定する手法について検討した。実験検証の結果、推定値には平均的なオフセット誤差が見られるものの良好なりニアリティーを確認することができた。

参考文献

[1] 小山・阿部・樋口・小川・Mamo : 「PWM インバータのキャリア周波数成分を用いた IPM モータのセンサレス制御」, 電気学会論文誌 D, 122 巻 5 号, 509-515 (2002)
 [2] T. Noguchi, and S. Kohno, "Mechanical-Sensorless Permanent-Magnet Motor Drive Using Relative Phase Information of Harmonic Currents Caused by Frequency-Modulated Three-Phase PWM Carriers," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 39, 4, 1085-1090 (2003)
 [3] 村田・野口 : 「直流バス電流から得られる PWM 高調波情報を利用した IPM モータの磁極位置センサレス制御法」, 電気学会産業応用部門大会, 1-60, 347-350 (2004)



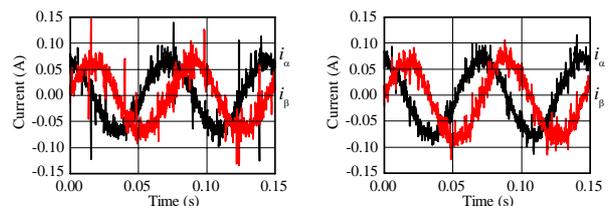
(a) Block diagram of whole controller.



(b) Block diagram of rotor position estimator.

図 3 磁極位置・電流センサレス制御システム

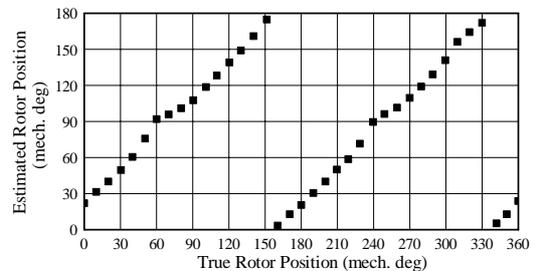
Fig. 3. Mechanical-current sensorless control system.



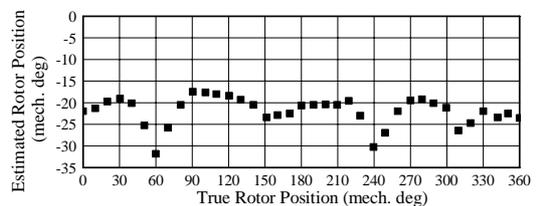
(a) Detected motor currents. (b) Restored motor currents.

図 4 ホール CT による検出電流と復元された電流

Fig. 4. Detected currents with HCT and restored currents.



(a) Estimated initial rotor position.



(b) Initial rotor position estimation error.

図 5 静止時の磁極位置推定特性

Fig. 5. Characteristics of initial rotor position estimation.

[4] 中河・久保田 : 「三相三角波キャリアを用いた直流部電流のみの測定による磁極位置推定法の検証」, 電気学会全国大会, 4-143, 227-228 (2005)
 [5] Y. Murai, Y. Tanizawa, and M. Yoshida, "Three-Phase Current-Waveform-Detection on PWM Inverters from DC Link Current-Steps," *IEE-Japan Proc. IPEC*, 1, 271-275 (1995)