

高周波電流注入に基づく位置センサレス IPM モータ制御系の高性能化

元野和紀[†] 野口季彦 (長岡技術科学大学)

Performance Improvement of Position-Sensorless IPM Motor Drive Using High-Frequency Current Injection

Kazunori Motono, and Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology)

Abstract - This paper presents two techniques to improve control performances of high-frequency current injection based IPM motor drive without a rotor position sensor. The first technique is harmonic-current control using resonant transfer functions in a current control loop, which prevents waveform distortion of the injected harmonic currents caused by spatial harmonics of the motor. The second one is a method to compensate for rotational coordinate transformation error caused by a position estimation error. This method is effective to suppress current ripples as well as speed ripples that depend on the position estimation error. In the paper, both techniques were examined with a DSP based prototype and performance improvement was confirmed through the tests.

キーワード: 高周波電流注入制御, 位置推定誤差補償, 位置センサレス IPM モータ, 高調波無効電力

Keywords : high-frequency current injection , position estimation error compensation , position-sensorless IPM motor , harmonic reactive power

1. はじめに

筆者らはこれまでに高調波無効電力の位相情報を利用した IPM モータの磁極位置センサレス制御法を提案し, 実機により種々の運転特性を検証してきた^[1].

さらに, 運転特性を改善するため, 新たに高周波電流注入制御法, 磁極位置推定誤差に対する電流制御系の補償法, 加速度推定値を利用した外乱補償法を提案し, 計算機シミュレーションによりそれらの特性を検証した^[2]. その結果, いずれの手法も磁極位置推定特性や電流制御特性, 速度制御特性の改善に有効であることを確認した.

本稿では, DSP を中心に構成した全デジタル制御システムと以上の制御特性改善策の実験結果について述べる.

2. 高周波電流注入制御法

<2.1> 共振レギュレータを用いた高周波電流注入法

本制御システムでは電流制御系に比例積分 (PI) レギュレータを使用しているため, 注入すべき高周波電流に対してループゲインが低い. このため, モータの空間高調波などにより高周波電流が歪み, 結果的に磁極位置推定特性に重大な影響を及ぼす.

そこで, モータに注入すべき高周波電流に対して選択的にループゲインを高めるように補償した電流制御系を図 1 のように構成する. この構成で, 通常の PI レギュレータは i_d および i_q の直流成分に関する制御を行い, PI レギュレータと並列に付加した共振レギュレータにより注入する高周波電流成分 i_{dh} および i_{qh} の制御を行う. この共振レギュレータの伝達関数は, 注入する高周波電流の角周波数 ω_h でゲインが無限大となるように設計されている^[3]. したがって, 高周波電流指令値に対しフィードバック電流に含まれる高周波成分は, 原理的に定常偏差なく追従し, モータの着磁状態やスロットに起因する空間高調波の影響を受けにくくなる. PI レギュレータと共振レギュレータを含めた電流ループの一巡伝達関数は次式のように表される.

$$G_{open,d,q}(s) = \left(K_P \frac{s\tau_I + 1}{s\tau_I} + \frac{s}{s^2 + \omega_h^2} \right) \frac{1}{sL_{d,q} + R_a} \quad (1)$$

これより, 電流制御系の閉ループ伝達関数は (2) のように求められる. この伝達関数の周波数特性は注入周波数 (例えば 500 (Hz)) でゲインが 0 (dB), 位相遅れは 0 (deg) となる. したがって, モータの空間高調波が高周波電流制御ルー

$$G_{close,d,q}(s) = \frac{K_P \tau_I s^3 + (K_P + \tau_I) s^2 + \omega_h^2 K_P \tau_I s + \omega_h^2 K_P}{L_{d,q} \tau_I s^4 + (K_P + R_a) \tau_I s^3 + (\omega_h^2 L_{d,q} \tau_I + K_P + \tau_I) s^2 + (R_a + K_P \tau_I) \omega_h^2 s + \omega_h^2 K_P} \quad (2)$$

ブに外乱として作用したとしても、注入された高周波電流はその指令値に偏差なく追従し歪むことはない。

<2.2> 実機による高周波電流注入制御特性の検証

図 2 に示すように実機システムは DSP (TMS320C6711) を用いて、磁極位置・速度センサレス制御ならびに高周波電流注入制御の全てをソフトウェアで実現した。磁極位置推定アルゴリズムは、図 3 に示すように微小振幅 ($i_h=0.0625(A)$) の高周波電流を IPM モータに注入し、注入高周波に関する高調波無効電力 (交流成分) Q'_h の位相と基準位相信号 Q'_{href} との位相比較を行うことにより位置推定誤差 $\Delta\theta_m$ を検出している。位置推定には 3 レベル EXOR および 2 段の PI 要素からなる推定アルゴリズムを用いており、 Q'_h と Q'_{href} が同相となるように PLL と同様の動作を行う。なお、供試機として表 1 に示す IPM モータを使用する。

<2.2.1> 高周波電流軌跡

図 4 (a) に補償なしの場合、(b) に高周波電流注入制御を行った場合の高周波電流軌跡を示す。いずれの場合も周波数 500 (Hz)、振幅 0.0625 (A) の高周波電流指令値を与えたときの応答である。(a) を見てわかるように、注入周波数における電流制御系 PI レギュレータのゲインが低いため、振幅が指令値に追従せず電流軌跡は大きく歪む。また、磁極位置によっても空間高調波の影響で d, q 軸高周波電流の位相にずれが生じ、電流軌跡の傾きが変化する。

これに対し、(b) のように高周波電流注入制御を行った場合は、振幅・位相ともほぼ指令値に偏差なく追従している。特に磁極位置の影響を受けずに常に一定の高周波電流が注入されることがわかる。

<2.2.2> 初期位置推定特性

図 3 (a) の電流制御系における d, q 軸電流指令値を零として、モータが回転しない状態で初期位置推定を行った。磁極位置真値はモータに取り付けられた 2000 (pulse/r) のロータリーエンコーダより得られ、7 セグメント LED にてデジタル表示させる。また、推定磁極位置についても同様に LED で表示させ、真値と比較することによって初期位置推定特性の評価を行う。

図 5 (a) に機械角で磁極位置 0 から 360 (mech.deg) に対する初期位置推定結果を示し、(b) にその推定誤差を示す。図中、円でプロットされたものは高周波電流注入制御を行わない場合の初期位置推定結果であり、クロスのプロットは高周波電流注入制御を行った場合の結果である。これらの実験結果より、補償なしの場合では -10 ~ +5 (mech.deg) 程度の位置推定誤差が生じるが、高周波電流注入制御を行った場合は -4 ~ +2 (mech.deg) 程度に改善されることがわかる。

<2.2.3> 速度ステップ応答特性

図 6 (a) に補償なしの場合、同図 (b) に高周波電流注入制御を行った場合の実験結果を示す。両者は低速運転時の速度ステップ応答で、零速度指令値に ± 100 (r/min) の速度ステップを重畳して実験を行った。その結果、補償なしの場合には磁極位置推定誤差に大きな振動が発生することがわかる。しかし、高周波電流注入制御を行うと、磁極位置によるインダ

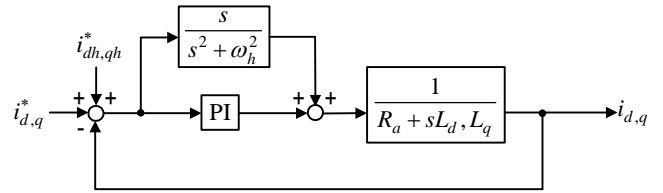


図 1 共振レギュレータをもつ電流制御ループ
Fig. 1. Current control loop with resonant regulator.

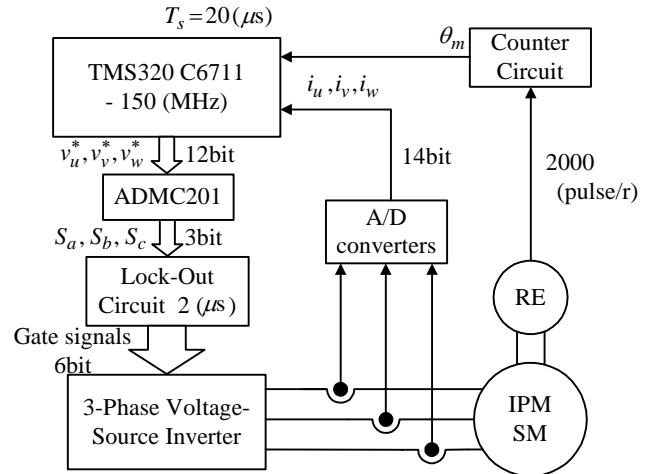
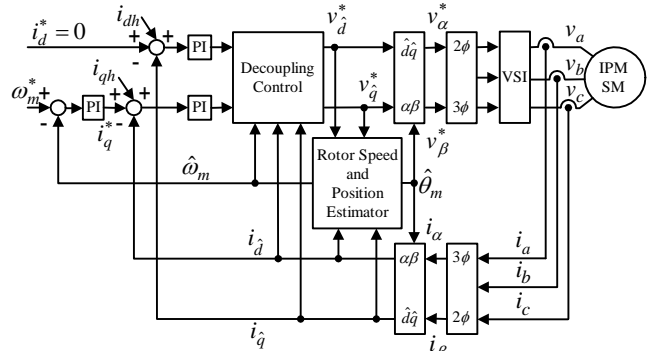
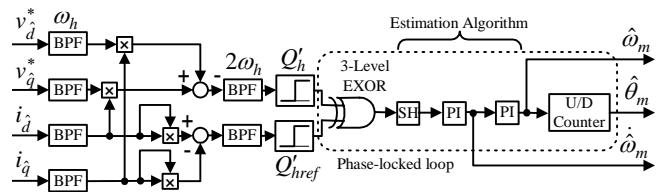


図 2 実験システムの構成
Fig. 2. Implementation of experimental setup.



(a) Block diagram of position-sensorless PM motor drive.



(b) Position-and-speed estimator.

図 3 IPM モータの磁極位置・速度センサレス制御系
Fig. 3. Position-sensorless IPM motor control system.

表 1 モータパラメータと定格

TABLE1 MOTOR PARAMETERS AND RATINGS

Nominal Parameters of Test Motor			
Field flux linkage	0.306 (Wb)	Rated power	100 (W)
Armature resistance	14.8 ()	Rated voltage	200 (V)
Moment of inertia	0.00414 (kgm ²)	Rated current	0.7 (A)
d -axis inductance	0.248 (H)	Rated speed	1500 (r/min)
q -axis inductance	0.485 (H)	Number of pole	4

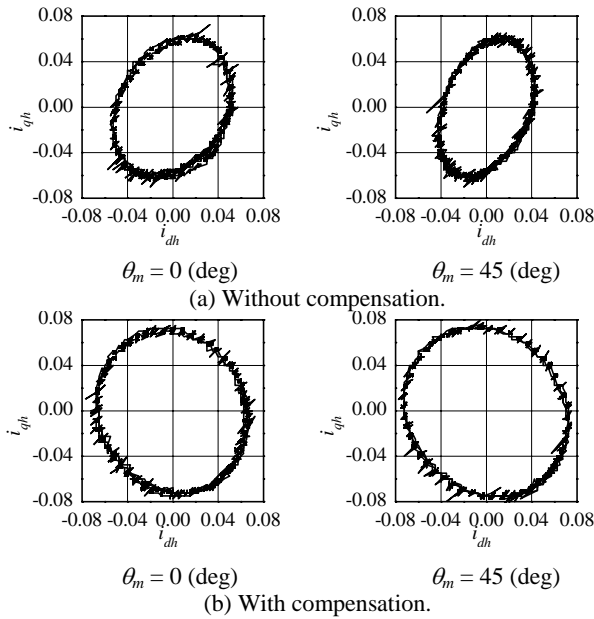


Fig. 4. Injected high-frequency current loci.

クタンスの変動が生じてもフィードバック電流から抽出できる高周波電流の振幅ならびに位相が一定であるため、良好な磁極位置推定が可能で、磁極位置推定誤差の振動が改善されている。

3. 磁極位置推定誤差に対する電流制御系の補償

<3.1> 位置推定誤差を考慮した電流制御系の解析と補償法

図 7 に位置推定誤差を考慮した磁極位置・速度センサレス制御システムの電流制御系を示す。ここでは、回転座標変換を磁極位置真値 θ_m と位置推定値 $\hat{\theta}_m$ の誤差 $\Delta\theta_m = \theta_m - \hat{\theta}_m$ で定義された座標変換行列 (ただし、 $\Delta\theta_m$ は十分小さいと仮定する。) で構成し、 d 軸および q 軸間の干渉項は速度推定値を用いて非干渉化している。このような電流制御系では $\Delta\theta_m$ による新たな干渉が生じるが、電流制御系に与えるそれらの影響は以下のように解析できる。

まず、PI レギュレータの出力等を含めた実際のモータ印加電圧は次式のように求められる。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d' + \Delta\theta_m v_q' - \hat{\omega} L_d i_q + \Delta\theta_m \hat{\omega} (L_d - L_q) i_d + \Delta\theta_m \hat{\omega} \psi \\ v_q' - \Delta\theta_m v_d' + \hat{\omega} L_d i_d - \Delta\theta_m \hat{\omega} (L_d - L_q) i_q + \hat{\omega} \psi \end{bmatrix} \quad (3)$$

(3) で求められた電圧にモータ内部で発生する干渉項を考慮し、 $\omega_m = \hat{\omega}_m$ とすると $\Delta\theta_m$ に関係のない干渉項は非干渉制御により相殺されるが、それ以外は $\Delta\theta_m$ により残留する。したがって、 R_d 、 L_d または L_q へ入力される電圧は次式のように近似できる。

$$\begin{bmatrix} v_d'' \\ v_q'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d' + \Delta\theta_m v_q' + \Delta\theta_m \hat{\omega} (L_d - L_q) i_d + \Delta\theta_m \hat{\omega} \psi \\ v_q' - \Delta\theta_m v_d' - \Delta\theta_m \hat{\omega} (L_d - L_q) i_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

一方、PI レギュレータの出力は以下ようになる。

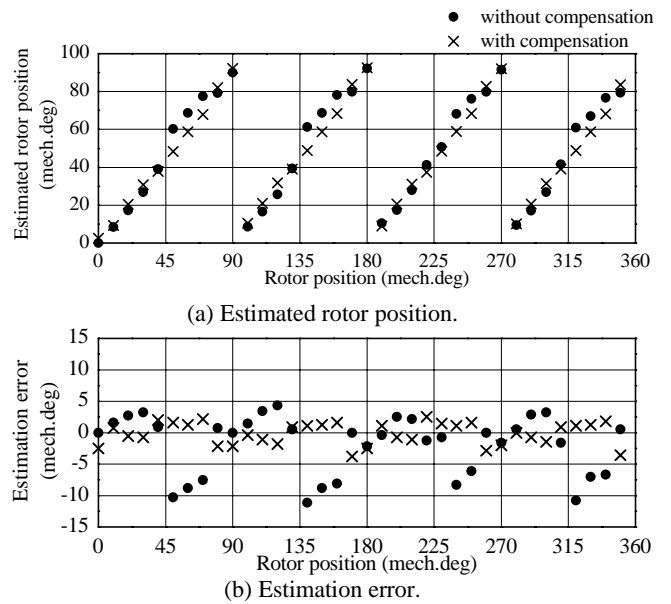


図 5 初期位置推定特性

Fig. 5. Estimated initial rotor position and estimation error.

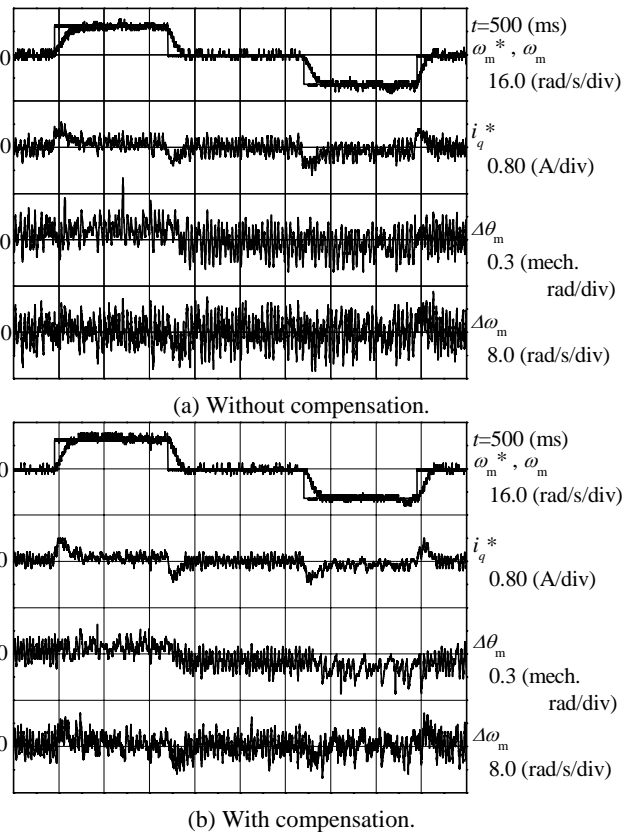


図 6 低速域における速度ステップ応答

Fig. 6. Speed step responses in low-speed range.

$$\begin{bmatrix} v_d' \\ v_q' \end{bmatrix} = G_{PI} \begin{bmatrix} i_d^* - i_d \\ i_q^* - i_q \end{bmatrix} = G_{PI} \begin{bmatrix} i_d^* - i_d + \Delta\theta_m i_q \\ i_q^* - i_q - \Delta\theta_m i_d \end{bmatrix} \quad (5)$$

(4) および (5) から d 、 q 各軸の電流制御系ブロック線図は図 8 のように導かれ、 $\Delta\theta_m$ による新たな干渉項が生じることがわかる。したがって、過渡状態や負荷状態では、 $\Delta\theta_m$

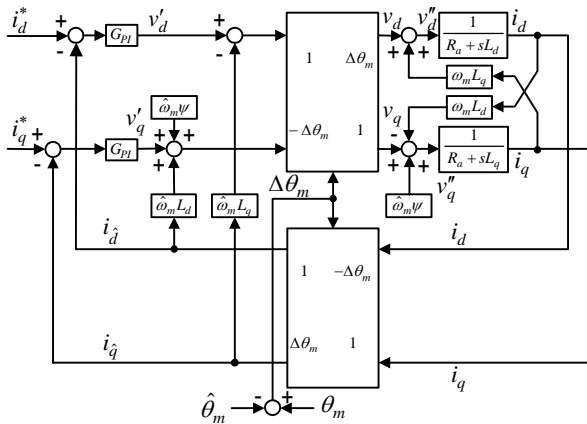


図 7 磁極位置推定誤差を考慮した電流制御系

Fig. 7. Current controller taking position estimation error into account.

に起因する軸ずれにより電流制御が悪化する。図 8 に示された $\Delta\theta_m$ による干渉を除去するため、電流制御系の電圧指令値およびフィードバック電流へ図 9 に示す補償を施す。 $\Delta\theta_m$ が磁極位置推定器により検出可能であれば、それらに対して $\Delta\theta_m$ による干渉成分をフィードフォワード的に補償することで干渉項を除去することができる。

<3.2> 実機による電流制御系の補償特性の検証

図 10 (a) に補償なしの場合、同図 (b) に位置推定誤差に対する電流制御系の補償を施した場合の実験結果を示す。先ほどの実験と同様に速度指令値として 100 (r/min) の速度ステップを与えている。補償前では速度ステップ応答時に位置推定誤差が生じて q 軸電流に振動が現れている。

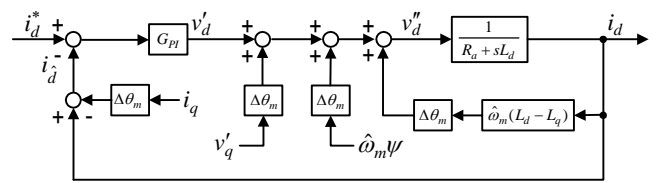
一方、補償後では $\Delta\theta_m$ に関する干渉項が消去されるため位置推定誤差が生じているにもかかわらず、 q 軸電流の振動が抑制されており、その結果、速度応答や定常的な速度脈動も改善されることが確認できた。

5. まとめ

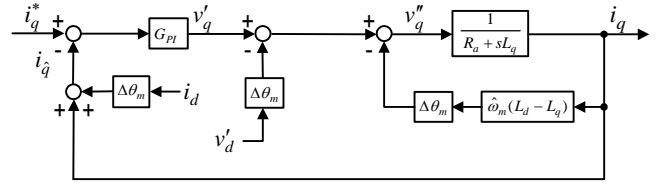
本稿では、高調波無効電力に着目した IPM モータの磁極位置センサレス制御系について、高周波電流注入に対する補償、磁極位置推定誤差に対する電流制御系の補償について実験検証した。その結果、それぞれの補償により電流制御特性、位置推定特性、速度センサレス運転特性が効果的に改善されることを確認した。今後は、外乱補償についても検証する所存である。

参考文献

[1] T. Noguchi, K. Takehana, and S. Kondo, "Mechanical-Sensorless Robust Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor Using Phase Information of Harmonic Reactive Power," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, 37, 6, 1786-1792, 2001.
 [2] 元野, 野口, 竹花: 「高調波瞬时无効電力に基づく磁極位置センサレス PM モータ制御系の高性能化」電学産応, 661 (平 14)
 [3] 石塚, 根津, 佐藤, 山口, 片岡: 「電圧形 PWM 整流回路の共振原理に基づく電源電流制御方式」電学半電変研会, SPC-96-28, 123-132 (平 8)



(a) d -axis current control loop.



(b) q -axis current control loop.

図 8 磁極位置推定誤差による電流ループへの干渉

Fig. 8. Interferences of position estimation error to current loops.

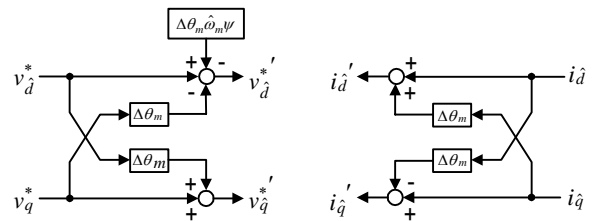
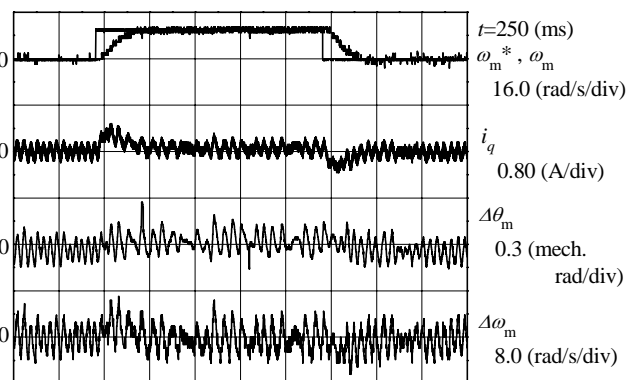
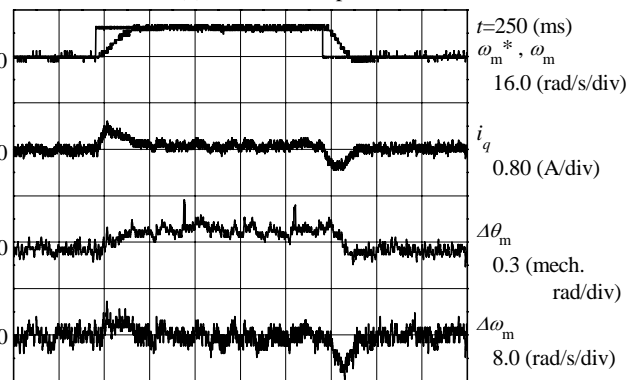


図 9 電流制御系の補償ブロック

Fig. 9. Compensation blocks in current controller.



(a) Without compensation.



(b) With compensation.

図 10 磁極位置推定誤差の補償結果

Fig. 10. Effect of position-estimation-error compensation on speed step responses.