

センサレス IPM モータの位置推定誤差に対する 電流制御系の補償

竹花 公宏* 野口 季彦 (長岡技術科学大学)

Position-Estimation-Based-Error Compensation in Current Controller of Sensorless IPM Motor

Kimihiro Takehana, and Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

本論文では高調波瞬时无効電力の位相情報に着目した磁極位置・速度センサレス IPM モータの位置推定誤差に対する電流制御系の補償を検討し、その補償特性を計算機シミュレーションにより確認したので報告する^{[1], [2]}。

2. 位置推定誤差を考慮した電流制御系の解析と補償法

Fig. 1 に位置推定誤差を考慮した磁極位置・速度センサレス IPM モータ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 と磁極位置推定値 $\hat{\theta}_m$ 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、 $\cos\Delta\theta_m \approx 1$, $\sin\Delta\theta_m \approx \Delta\theta_m$) で構成し、 d 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 $\Delta\theta_m$ による新たな干渉項を生じるので、電流制御系に与えるそれらの影響を以下のように解析する。

まず、PI レギュレータの出力、非干渉制御、回転座標変換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。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d^* + \Delta\theta_m v_q^* - \hat{\omega}_m L_q i_q + \Delta\theta_m \hat{\omega}_m (L_d - L_q) i_d + \Delta\theta_m \hat{\omega}_m \psi \\ v_q^* - \Delta\theta_m v_d^* + \hat{\omega}_m L_d i_d - \Delta\theta_m \hat{\omega}_m (L_d - L_q) i_q + \hat{\omega}_m \psi \end{bmatrix} \quad (1)$$

上式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_a , 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。

$$\begin{bmatrix} v_d' \\ v_q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d^* + \Delta\theta_m v_q^* + \Delta\theta_m \hat{\omega}_m (L_d - L_q) i_d + \Delta\theta_m \hat{\omega}_m \psi \\ v_q^* - \Delta\theta_m v_d^* - \Delta\theta_m \hat{\omega}_m (L_d - L_q) i_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

一方、PI レギュレータの出力は以下のように求められる。

$$\begin{bmatrix} v_d^* \\ v_q^* \end{bmatrix} = G_{PI} \begin{bmatrix} i_d^* - i_d \\ i_q^* - i_q \end{bmatrix} = G_{PI} \begin{bmatrix} i_d^* - i_d + \Delta\theta_m i_q \\ i_q^* - i_q - \Delta\theta_m i_d \end{bmatrix} \quad (3)$$

(2) および (3) 式から d , q 各軸の電流制御系ブロック線図は Fig. 2 のように得られ、 $\Delta\theta_m$ 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、 $\Delta\theta_m$ に起因する軸ずれにより電流制御特性が劣化する。Fig. 2 に示された $\Delta\theta_m$ による干渉項を除去するために、電流制御系の電圧指令値お

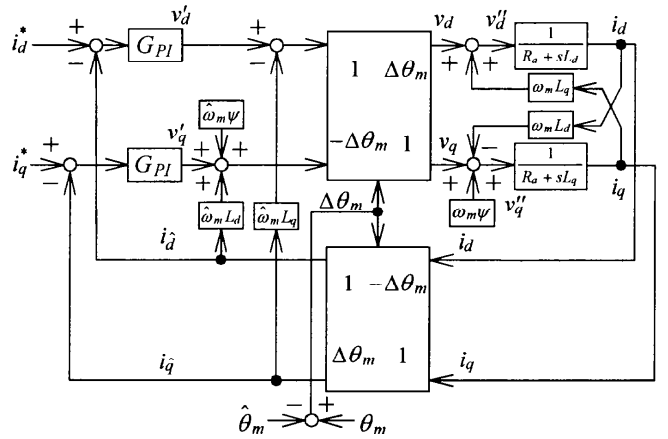


図 1 位置推定誤差を考慮した電流制御系

Fig. 1 Current controller taking position-estimation-error into account.

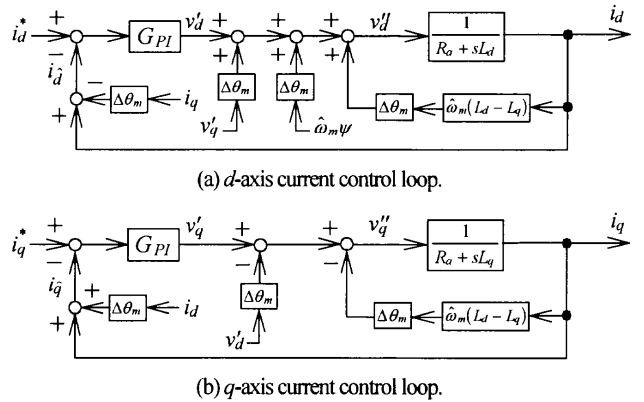
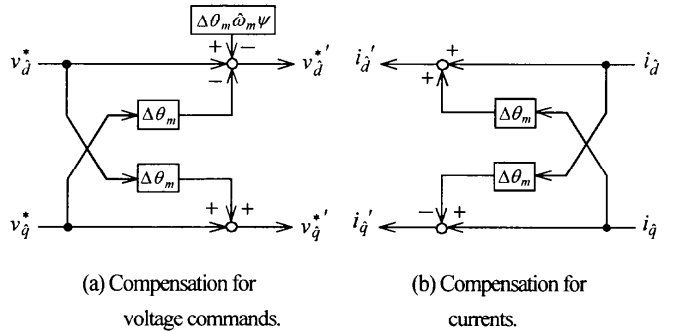


図 2 推定誤差による電流ループの干渉

Fig. 2 Interferences with current control loops caused by estimation error.



(a) Compensation for voltage commands.

(b) Compensation for currents.

図 3 電流制御系の補償ブロック

Fig. 3 Compensation blocks in current controller.

よび電流フィードバック値へ Fig. 3 に示す補償を施す。 $\Delta\theta_m$ がコントローラで検出可能であれば、電圧指令値および電流フィードバック値に $\Delta\theta_m$ により干渉する成分をフィードフォワード的に加えることで干渉項の除去を行うことができる。

3. シミュレーションによる検証

〈3.1〉 位置・速度センサレス制御システムの構成

Fig. 4 は高調波瞬時無効電力を利用した IPM モータの位置・速度センサレス制御システムである。位置推定機構は電圧指令値と電流フィードバック値を入力し、注入高調波に関する高調波瞬時無効電力（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って $\Delta\theta_m$ を検出している。この $\Delta\theta_m$ を積分要素により動的に修正し磁極位置推定値 $\hat{\theta}_m$ を生成する。一方、速度推定値は積分要素の入力から得られるが、位相遅れが生じるため $\Delta\theta_m$ を擬似微分して得られる $\Delta\omega_m$ をフィードフォワード的に $\hat{\theta}_m$ に加えている。このような位置・速度センサレス制御システムへ Fig. 3 の補償ブロックを Fig. 4(a) のように加え補償効果の確認を行った。ここでは d 軸電流指令値を $i_d^* = 0$ 一定とし、速度が過渡的に変化しているときの電流 i_d, i_q および速度応答に与える影響を比較評価した。シミュレーションプログラムは Fig. 3 および Fig. 4 に基づき構成されており、非干渉制御や電流リミッタ、インバータのキャリア変調も組み込まれている。

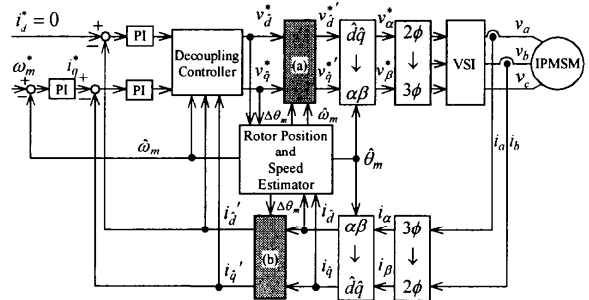
〈3.2〉 シミュレーション結果

Fig. 5(a) に位置推定誤差補償前、同図(b) に補償後のシミュレーション結果を示す。補償前は速度ステップ応答時に位置推定誤差が生じるため、軸ずれにより d, q 軸電流が影響を受け、その結果速度応答に振動を発生させていることがわかる。一方、補償後は $\Delta\theta_m$ に関する干渉項が補償されるため、 $\Delta\theta_m$ が生じているにもかかわらず d, q 軸電流に及ぼす影響が軽減され速度推定値も良好に真値に追従していることがわかる。また、このような補償を行っても脱調することはなく、安定に磁極位置・速度センサレス運転が可能である。

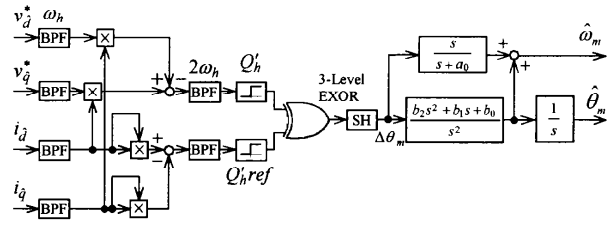
ここでは、Fig. 4(b) のサンプルホールド SH から検出される $\Delta\theta_m$ 自体に遅れが生じるため、 $\Delta\theta_m$ に対する電流制御系の完全な補償は望めないが、以上の補償を施すことでセンサレス運転時の電流制御系において応答性や安定性を更に改善できる。

4. まとめ

本論文では、高調波瞬時無効電力の位相情報に着目した磁極位置・速度センサレス IPM モータの位置推定誤差が電流制御系へ与える影響を解析し、その補償法を検討した。その結果、位置推定誤差が電流制御系に与える干渉項の影響を軽減でき、電流制御および速度制御特性を改善できることを計算機シミュレーションにより確認した。



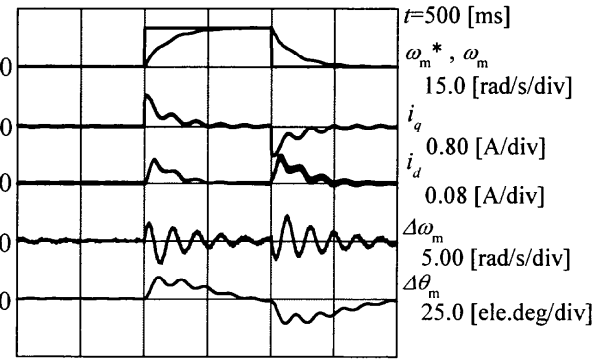
(a) Block diagram of sensorless controller.



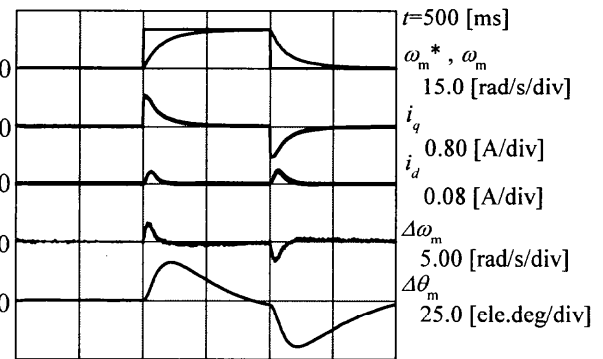
(b) Position and speed estimator.

図4 センサレス IPM 制御システム

Fig. 4 Sensorless IPM control system.



(a) Without compensation.



(b) With compensation.

図5 速度ステップ応答

Fig. 5 Speed step responses.

参考文献

- [1] T. Noguchi, K. Takehana, S. Kondo : IEEE Annu. Mect. Conf, Vol. II pp.1781-1786 (2000)
- [2] 竹花, 野口, 近藤 : 電学半研資, SPC-00-38 (平12)