

周期性を利用した位置推定誤差補償を行う PMSM のセンサレスベクトル制御

内藤 雅久*, 熊谷 崇宏, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Sensorless Vector Control of PMSM with Estimated System to Reduce Estimated Error Focusing Periodic Load Fluctuation
Masayuki Naito, Takahiro Kumagai, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1 はじめに

位置センサや速度センサを用いない永久磁石同期電動機(PMSM)の制御法の一つとしてセンサレスベクトル制御がある。センサレスベクトル制御では磁極位置や速度を計算により推定し制御を行っており、推定精度が制御において重要となる。特にコンプレッサのように周期的に変動する負荷を駆動した際は実際の磁極位置と推定した磁極位置の差(位置推定誤差)も周期的に変動する^{[1][2]}。

これまでに著者らは、拡張誘起電圧を用いた位置・速度推定系の PLL に対し並列にバンド・パス・フィルタ(BPF)を挿入することにより、位置推定誤差を低減する手法を提案した⁽³⁾。本論文では、実機検証にてその有用性を確認したため報告する。

2 拡張誘起電圧を用いた位置・速度推定系

図 1 に本論文中で用いる座標系の定義を示す。dq 座標系は永久磁石の磁束方向を d 軸とし、d 軸から 90deg 進んだ軸を q 軸とした座標系である。γδ座標系は位置推定系による推定された座標系であり、推定した d 軸をγ軸、γ軸より 90deg 進んだ軸をδ軸とした座標系である。

(1)式に拡張誘起電圧 e_γ , e_δ を求める式を、(2)式に dq 軸とγδ軸の角度差(位置推定誤差) $\Delta\theta_G$ を求める式を示す。

$$\begin{cases} \hat{e}_\gamma = v_\gamma - Ri_\gamma + \hat{\omega}_e L_q i_\delta \\ \hat{e}_\delta = v_\delta - Ri_\delta - \hat{\omega}_e L_q i_\gamma \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta\theta_G = \tan^{-1}\left(-\frac{\hat{e}_\gamma}{\hat{e}_\delta}\right) \dots\dots\dots (2)$$

(1)式、(2)式において、 $v_{\gamma(\delta)}$:γ(δ)軸電圧、 $i_{\gamma(\delta)}$:γ(δ)軸電流、 R :巻き線抵抗、 L_q :q 軸インダクタンス、 ω_e :推定したモータの電気角周波数をそれぞれ示す。

拡張誘起電圧を用いた位置・速度推定系では(1)式、(2)式より推定した軸ずれ角 $\Delta\theta_G$ を補償することにより実際のモータ速度および位置を推定する。

3 BPF を用いた推定誤差低減法

(3)式に本論文で扱う機械角に対して周期的に変動する変動する負荷 T_L を示す。

$$T_L = T_{L0} + T_L(\theta_m) \dots\dots\dots (3)$$

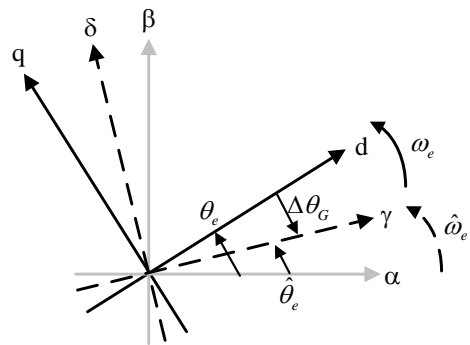


Fig.1. Relationship between motor-axis (dq-axis) and estimation-axis (γδ-axis)

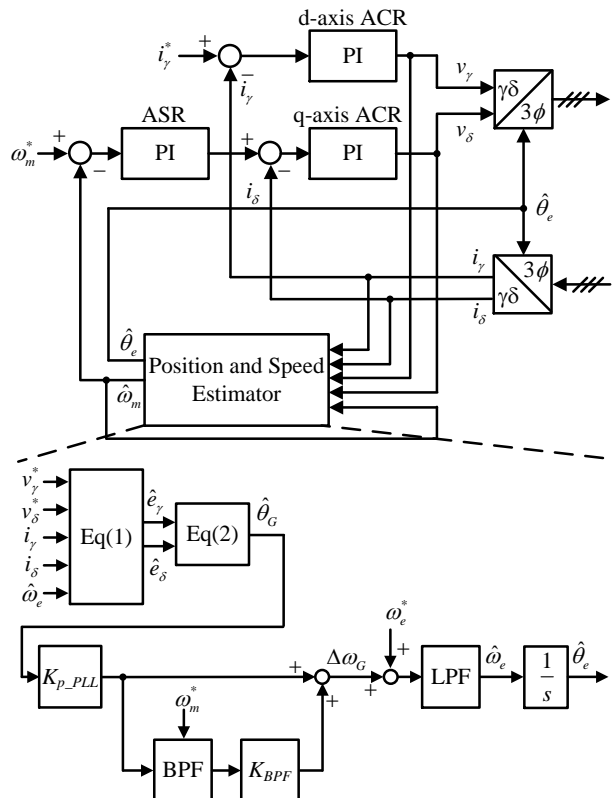


Fig.2. Block diagram of sensorless vector control with proposed position and speed estimator.

(3)式において、 T_{L0} : 負荷トルクの平均値、 θ_m : モータの機械角、 $T_L(\theta_m)$: 負荷トルクの周期変動分をそれぞれ示す。

(4)式に(3)式に示す負荷 T_L を駆動した際の軸ずれ角 $\Delta\theta_G$ を示す。

$$\Delta\theta_G = \tan^{-1} \left[-\frac{v_{\gamma 0} + v_{\gamma}(\theta_m) + \hat{\omega}_c L_q \{i_{\delta 0} + i_{\delta}(\theta_m)\}}{v_{\delta 0} + v_{\delta}(\theta_m) + R \{i_{\delta 0} + i_{\delta}(\theta_m)\}} \right] \dots\dots (4)$$

(4)式より、軸ずれ角 $\Delta\theta_G$ は機械角 θ_m を含む項を有するため、一定の値に収束せずモータ速度 ω_m の周波数で周期的に変動し続ける。

図 2 に提案推定系を有するセンサレスベクトル制御のブロック図を示す。本推定系は軸ずれ角 $\Delta\theta_G$ をゼロに制御する P 制御に対して中心周波数をモータ速度指令値 ω_m^* とする BPF とゲイン K_{BPF} を並列に追加している。これにより P 制御のゲインを変更することなく、位置推定誤差の周期的な変動分を低減する。

4 実験結果

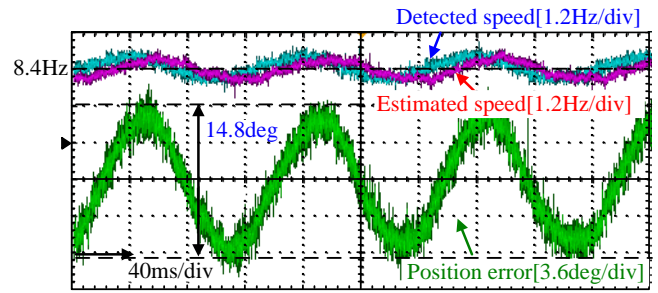
<4・1> BPF による周期的な位置推定誤差低減 提案法の効果を確認するために、モータ速度指令値 ω_m^* を 8.4Hz(定格速度の約 0.1p.u.)、正弦波状の負荷トルクを与え、BPF のゲイン K_{BPF} を変動させた場合の位置推定誤差 θ_G を評価した。

図 3 に BPF のゲイン K_{BPF} が 0.0 と 1.0 の場合の速度位置および推定誤差 θ_G の波形を示す。図より、BPF を並列に挿入することにより、位置推定誤差 θ_G は低減することがわかる。また、実速度と推定速度の差も低減していることわかる。しかし、速度リップルは位置・速度推定系に BPF を加えても変化しない。

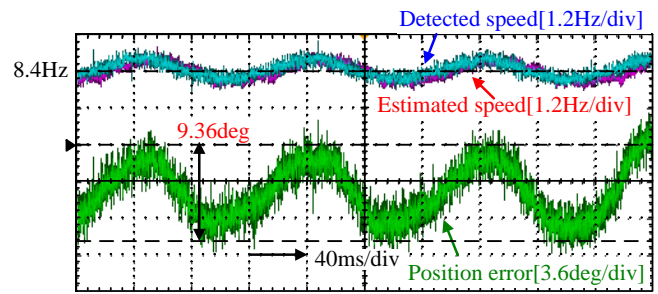
図 4 に BPF のゲイン K_{BPF} と位置推定誤差 θ_G のモータ速度指令値 ω_m^* の周波数成分の関係を示す。図より、BPF のゲイン K_{BPF} を上げていくと位置推定誤差 θ_G は減少していく。しかし、過度にゲインを高くした場合、位置推定誤差 θ_G の低減効果は減少する。

<4・2> 提案推定法を用いた速度リップル低減 本章では位置・速度推定系へ BPF を用いることにより位置推定誤差 θ_G が低減することを利用し、q 軸電流指令に対して事前に求めた速度リップルが低減するような補正量を機械角に応じてフィードフォワードする制御系を検討した。q 軸電流指令へのフィードフォワードで使用する値は実機械角に合わせた値であるので、位置推定誤差 θ_G が小さい方が補正の精度を高めることができる。

図 5 に、提案制御系の実験結果を示す。図より、提案制御系で駆動した結果、速度リップルは 1.2Hz(速度リップル率：14.3%)となった。



(a) K_{BPF} is 0.0



(b) K_{BPF} is 1.0

Fig.3 Result of position estimated error changing K_{BPF}

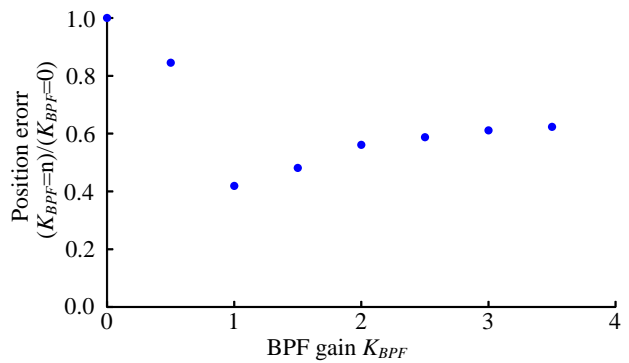


Fig.4 Relations of K_{BPF} and position error.

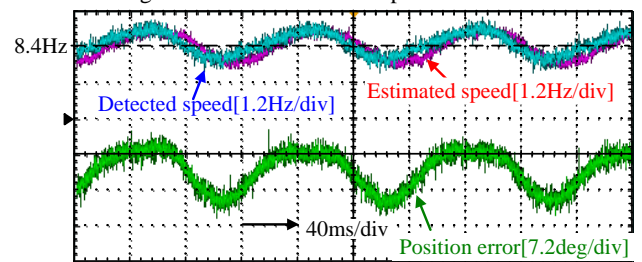


Fig.5 Result of with BPF and q-axis current reference feedforward

文献

- (1) 坂本 他 : IEEJ Tran. IA, Vol. 124, No. 11, p1133-p1140 (2004)
- (2) 能登原 他 : JASIC 3-57 (2019)
- (3) 内藤 他 : 半導体電力変換技術研究会 SPC-19-186 (2019)