

高周波交番電圧重畳に基づいた PM モータ位置センサレス制御における位置推定方式の比較

甲斐峻大朗* 山本吉朗 大濱嘉恭
(鹿児島大学大学院 理工学研究科)

1 はじめに

近年、永久磁石の高性能化に伴い、高効率永久磁石モータの位置センサレス制御が様々な分野で利用されるようになってきた。筆者らは、高周波交番電圧重畳に基づいた PM モータ位置センサレス運転^{[1],[2]}における、位置・速度演算アルゴリズムについて比較検討を行ったので報告する。

2 位置速度推定の原理

図 1 に実験システムの構成を示す。このシステムでは、制御側で制御系の d 軸(以後 dc 軸と呼ぶ)上の V_{dc} に高周波の交番電圧 $V_c \sin(2\pi 500t)$ [$V_c = 60$ V, $f_c = 500$ Hz] を重畳して qc 軸上の電流 i_{qc} の脈動を観測する。 dc - qc 軸と実際のモータ側 d - q 軸との誤差 δ と i_{qc} の脈動の関係により位置を推定する。誤差 δ は、(1)式を用いて求めることができる^{[1],[2]}。

$$\sin 2\delta = \frac{2L_d L_q}{L_d - L_q} \frac{p i_{qc}}{V_c \sin(2\pi 500t)} \quad (1)$$

ここで、 $p=d/dt$ である。具体的には $\delta=0$ のとき、すなわち dc - qc 軸と d - q 軸とが一致したときに、 i_{qc} の脈動分 Δi_{qc} が 0 となることから、 Δi_{qc} を 0 に近づけることにより位置を推定している。 dc - qc 軸と d - q 軸を一致させるために Δi_{qc} を 0 にする制御アルゴリズムを図 2 に示す。

3 無負荷、速度上昇時の各位置推定方式の比較

3.1 方式 A と方式 B₁ の比較

表 1 に示す実験で用いた PM モータの仕様を示す。また位置・速度推定ブロックを図 2 に、各位置推定方式のゲイン設定を表 2 に示す。図 2(a)の方式 A では、推定位置は Δi_{qc} に比例ゲイン K_p をかけた値 P を積分することで得られ、速度は位置を微分することで得られる^[2]。一般に、微分演算に際し、推定位置の 2π から 0 への切り替わりでノイズの対策が必要だが、今回はノイズを評価するため対策していない。この方式 A は図 2(b)において、 $K_p=1000$, $K_f=0$ と設定した方式 B₁ と同様であるが、方式 B₁ では速度を Δi_{qc} から直接求めることができる^[3]。図 3, 4 に位置・速度推定方式 A と方式 B₁ の実験結果を示す。方式 A では速度を位置から計算するため、位置が 2π から 0 に切り替わるときに比例出力 P にノイズが発生してしまう。しかし、方式 B₁ では Δi_{qc} から直接速度を求めることができるため、位置の切り替わりでノイズは発生せず、方式 A よりもノイズに対して強いことがわかる。また、位置推定誤差に関してはどちらの方式も同様に抑制できている。

3.2 方式 B₁ と方式 B₂ の比較

方式 A と方式 B₁ では速度に関して比例ゲインのみを用いて位置推定していたが、比例出力のみで速度を求めると、速度上昇に伴い Δi_{qc} の値は増加し、位置推定誤差が速度に比例して増加してしまう。そのため、位置推定誤差を 0 にすることが構造上困難であった。また、速度指令をステップで変化させる場合には小さな K_p の値をでは速度指令に追従できず制御が外れてしまったため、方式 A、方式 B₁ では

$K_p=1000$ とかなり大きな値に設定している。そのため比例出力 P にノイズが生じ、結果として、推定位置にもノイズ生じてしまうのが問題になっていた。これらの問題を解決するため、方式 B₂ では、積分を加え、比例出力 P と積分出力 I を速度推定に用いることで Δi_{qc} を 0 にできる構成に変更を行った^[3]。方式 B₂ を用いた場合の実験結果を図 5 に示す。積分を追加したことで比例出力 P が方式 B₁ よりも減少しており、推定位置のノイズや、位置推定誤差が抑制できている。

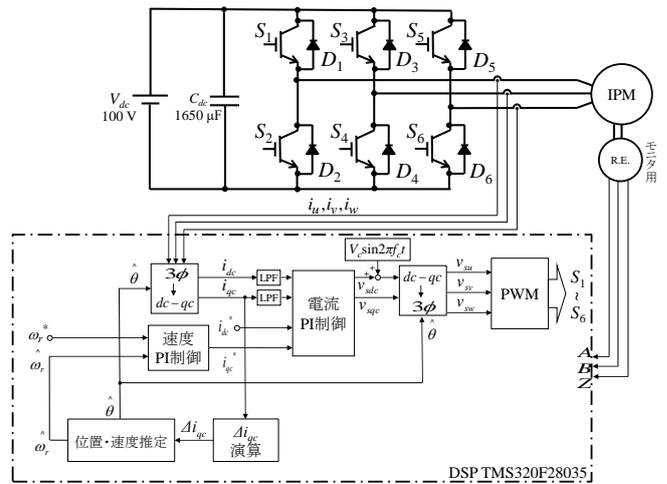


図 1 PM モータ位置センサレス制御におけるシステム構成

表 1 供試機の仕様

極数	8
鎖交磁束 Φ	0.1156 Wb
d 軸インダクタンス	18 mH
q 軸インダクタンス	22 mH
電機子抵抗 R_a	1.75 Ω
定格出力	400 W
定格電圧	210 V
定格電流	1.4 A
定格回転数 N	2300 rpm
定格トルク T	1.60 N · m

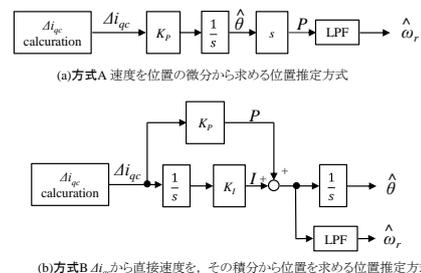


図 2 位置・速度推定のブロック図

表 2 各位置推定方式の位置推定ゲイン

ゲイン設定	方式	B			
		A	B ₁	B ₂	B ₃
K_p	1000	1000	1000	200	
K_f	—	0	100	100	

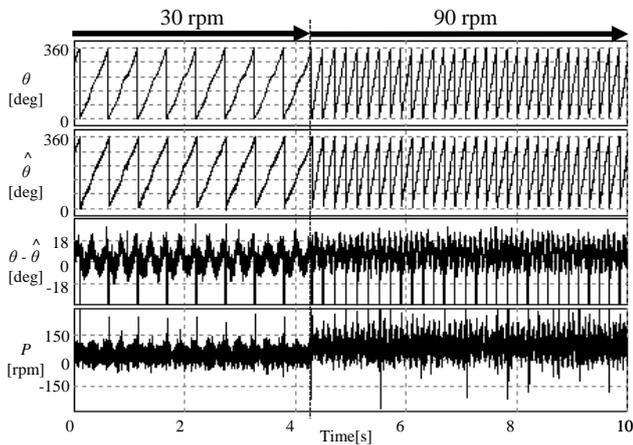


図3 無負荷で速度指令を 30 rpm から 90 rpm にステップ変化させたときの実験結果 (方式 A)

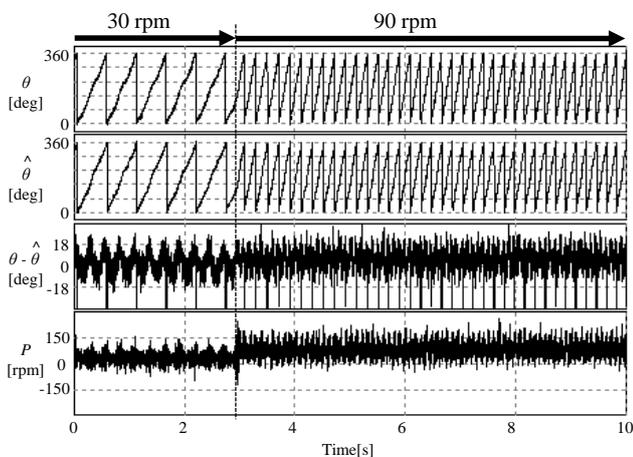


図4 無負荷で速度指令を 30 rpm から 90 rpm にステップ変化させたときの実験結果 (方式 B₁)

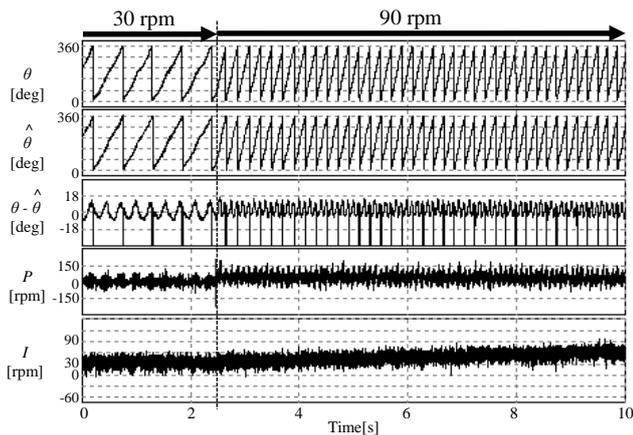


図5 無負荷で速度指令を 30 rpm から 90 rpm にステップ変化させたときの実験結果 (方式 B₂)

3.3 方式 B₂と方式 B₃の比較

図5より、方式 B₂の場合、速度指令を 30 rpm から 90 rpm にステップ変化させた直後、位置推定誤差が増加することなく位置を推定できていることが確認できた。しかし方式 B₂の場合、積分時定数 $\tau (=K_p/K_I)$ が 10 s で長いため、積分制御の応答が悪くなる。方式 B₃ では積分の応答を良くするため、積分時定数 $\tau (=K_p/K_I)$ を 2 s に縮小した。このときの速度ステップ指令に対する位置推定の応答を図6に

示す。速度ステップ直後、図より、方式 B₂ の場合よりも広がるが、時間経過とともに抑制できていることがわかる。また、位置推定誤差の脈動も方式 B₂ の場合よりも抑制できている。これら結果から、位置推定誤差の評価において、定常状態では方式 B₃ のゲイン設定が最も適切であるが、定常時、過渡時ともに位置推定誤差を抑制できるゲイン設定は方式 B₂ の場合であることを明らかにした。

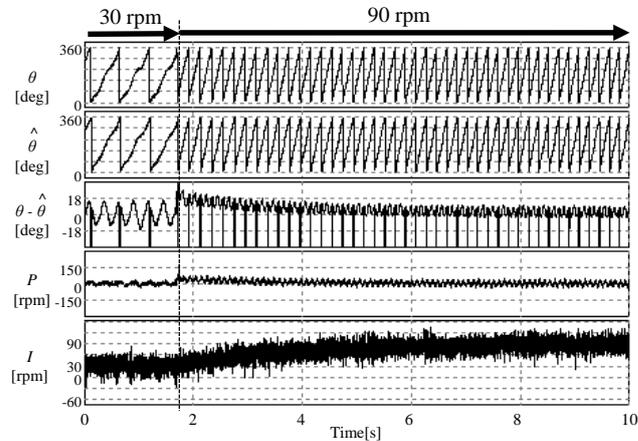


図6 無負荷で速度指令を 30 rpm から 90 rpm にステップ変化させたときの実験結果 (方式 B₃)

4 まとめ

本稿では、高周波交番電圧重畳に基づいた PM モータ位置センサレス制御における位置・速度推定部のアルゴリズムについて比較検討を行い、無負荷における位置推定誤差からそれぞれの方式を評価した。

文献

- [1] T. Aihara, A. Toba, T. Yanase, A. Mashimo, K. Endo : “Sensorless Torque Control of Salient-Pole Synchronous Motor at Zero-Speed Operation”, *IEEE Trans. Power Electronics*, vol.14, pp202-208, January (1999)
- [2] 上別府, 山本, 秋山:平成 26 年度電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, 03-2P-10
- [3] Hugo W. De Kock, Maarten J. Kamper, Ralph M. Kennel:“Anisotropy Comparison of Reluctance and PM Synchronous Machines for Position Sensorless Control Using HF Carrier Injection”, *IEEE Trans. Power Electronics*, vol.24, No.8, pp1905-1913, August, 2009