

2016 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関名 (大学、大学院、研究所名)	公立大学法人 大阪府立大学
職位または役職	准教授
氏名	井上 征則

1. 研究題目

永久磁石同期モータの出力密度向上のための制御法に関する研究

2. 研究目的

本研究課題では、永久磁石同期モータ(PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor)の出力密度向上のための制御法について、回転子速度・位置センサレス駆動システムにおけるモータパラメータ変動が運転特性に与える影響を明らかにする。

モータが様々な分野で幅広く利用されるようになり、装置の小型化のため出力密度の向上が求められている。モータの性能を表す指標として、トルクと回転速度が用いられ、これらを増加させることができれば出力密度増加につながる。トルク増加については一般に電磁鋼板の飽和磁束密度、電機子巻線の電流密度によって決まるため、材料や冷却の性能向上が求められる。一方で、回転速度の増加については機械的制約があるものの、電気的にはモータへの印加電圧によって決まるため、電圧と電流を適切に制御する必要がある。特に、PMSM では電機子電圧を一定に制御する弱め磁束制御を適用することにより高速回転領域での運転が可能になるが、更なるモータ出力向上には電機子鎖交磁束に対して最大トルクとなる最大トルク/磁束(MTPF: Maximum Torque Per Flux)制御の適用が求められる。

PMSM 駆動システムで一般に用いられる d, q 軸上での電流制御方式では MTPF 制御の方法が報告されているが、 $d-q$ 座標変換のために回転子位置センサもしくは位置推定が必要である。しかし、回転子位置センサの設置はモータ駆動システムのコスト増加を招く。位置推定によりコスト増加は回避できるが、モータモデルに基づく位置推定が用いられることが多く、モータパラメータ変動による影響を受ける。従来は電圧の余裕度を大きく与えることでパラメータ変動の影響を小さくしていたがモータ出力も低下する。したがって、モータ出力を最大限利用するためには、パラメータ変動に対する感度が低い制御方法が求められ、本研究で影響を明らかにすることにより、将来の制御則構築につなげる。

3. 研究内容及び成果

下記のトルク制限式を用いた MTPF 制御について、モータパラメータ変動が運転特性に与える影響を評価した。直接トルク制御に指令トルクとして与えることで回転子位置センサレス駆動となる。

$$T_{e-MTPF} = k \frac{P_n \Psi_s}{2L_d L_q} \{2\Psi_d L_q \sin \delta_m + \Psi_s (L_d - L_q) \sin 2\delta_m\}, \quad \delta_m = \cos^{-1} \left[\frac{1}{4} \left\{ a/\Psi_s - \sqrt{(a/\Psi_s)^2 + 8} \right\} \right], \quad a = \frac{L_q}{L_q - L_d} \Psi_a$$

ただし、 k : 定数($0 < k \leq 1$), P_n : 極対数, Ψ_s : 電機子鎖交磁束, L_d, L_q : d, q 軸インダクタンス, Ψ_a : 永久磁石による電機子鎖交磁束, δ_m : 最大トルク角

なお、PMSM の高速運転のため、次式で得た値を指令磁束として弱め磁束制御を同時に行っている。

$$\Psi_{s-FW} = \frac{I}{\omega} \left\{ -R_a i_T + \sqrt{V_{am}^2 - (R_a i_M)^2} \right\}$$

ただし、 R_a : 電機子抵抗, V_{am} : 電機子電圧の制限値, i_M, i_T : M, T 軸電流, ω : 電気角速度

MATLAB/Simulink を用いた PMSM 駆動システムのシミュレーションによって次の成果が得られた。なお、モータパラメータは $P_n = 2, L_d = 72 \text{ mH}, L_q = 368 \text{ mH}, \Psi_a = 0.0785 \text{ Wb}, R_a = 12.04 \Omega$ とし、制御器にはこれらの値を与え、モータモデルのパラメータを変動させた。また、 $V_{am} = 50 \text{ V}$ とし、回転速度 0 から 4000 min^{-1} の加速特性で制御特性を評価した。

- (1) トルク制限に用いる定数 k について、 k を小さくすると制御を安定に行うことが可能となるが、モータ出力を最大化するために k は制御を安定に行うことができる値の範囲内なるべく大きい値が望ましい。
- (2) モータパラメータ変動が MTPF 制御に与える影響について比較検討した。結果を図 1 に示す。PMSM では磁気飽和の影響による L_q 変動を主に考慮する機会が多いが、MTPF 制御では他のパラメータ (L_d, Ψ_a, R_a) の方が大きな影響を与えることが分かった。これは、MTPF 制御では電機子電流が制限値未満 ($I_a < I_{am}$) となる運転状態のため、磁気飽和の影響が緩和されることが一因と予想される。
- (3) 環境温度によって変化する電機子抵抗については、モータの R_a が制御器に与える値より小さい場合 (図 1(c) で変動率が負の領域)、定数 k の値を小さくしても制御が不安定化するため MTPF 制御特性を評価できず、他の対策が必要である課題も分かった。

L_q 変動については実機実験も実施した。結果を図 2 に示す。しかし、シミュレーション結果とは異なり、パラメータ変動を与えない場合でも $k=0.85$ まで減少させないと運転できなかった。図 2(b) より、 L_q 誤差 -20% を与えると、推定トルクが指令トルクに追従せず、MTPF 制御を満足していない。これは、インバータの電圧誤差などを考慮すべきであり、引き続き検討が必要である。

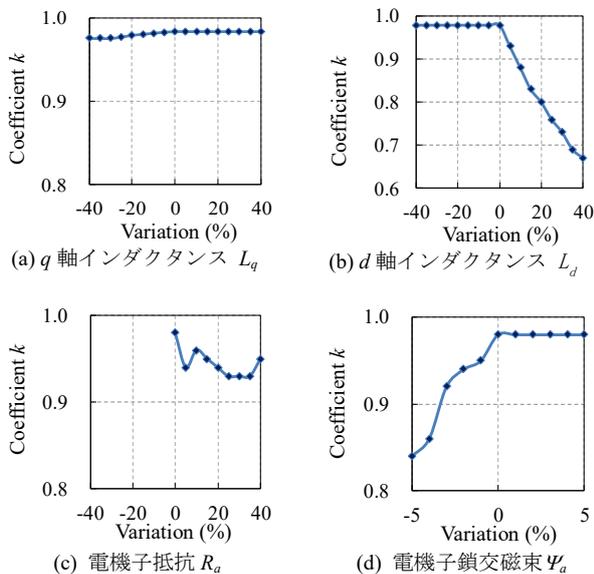


図 1 パラメータ変動に対する定数 k の特性

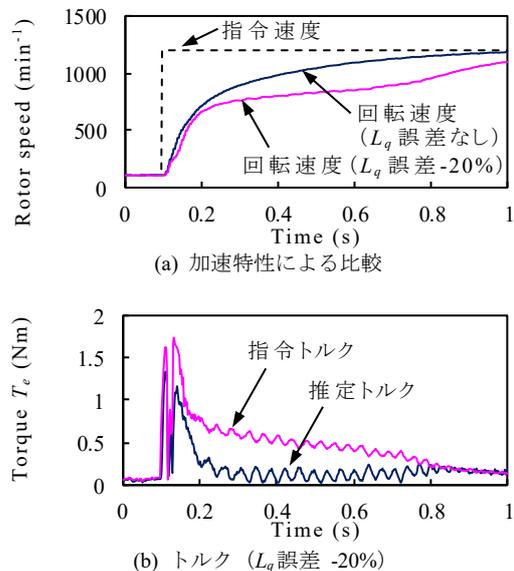


図 2 L_q 誤差による影響の実験結果 ($k=0.85$)

4. 今後の研究の見通し

今後は得られた知見を基にして現状の制御法改善、もしくは新しい手法の構築に取り組む。特に、電機子鎖交磁束に同期した M-T 座標系での検討に注力することにより、モータ駆動システムでは一般的な $d-q$ 座標とは異なる利点を持つ制御法を構築する。

具体的には、 $\Psi_d=0$ の特別な場合である同期リラクタンスモータでは次式で MTPF 制御を実現できることを先行研究で明らかにしており、 L_{T-MTPF} を PMSM にも適用できるよう拡張し、M-T 座標上でのモータパラメータとして取り扱う。

$$T_{e-MTPF} = \frac{P_n \Psi_s^2}{L_{T-MTPF}} \quad \text{ただし、} L_{T-MTPF} \text{ は磁気飽和を無視できれば } \frac{2L_d L_q}{L_d - L_q} \text{ で与えられる。}$$

なお、事前に計画していたインバータでの電圧誤差による影響評価を十分に実施できていないため、引き続き実機実験で評価を進める。インバータでの電圧誤差としては、デッドタイムによる電圧誤差が支配的であり、指令電圧に誤差補償を適用しているものの、実機実験結果がシミュレーション結果と大きく異なる結果になってしまっている。また、最大出力 125W の PMSM を実験機として使用したが、モータベンチのメンテナンス不足のため機械損が大きく、MTPF 制御が適用される高速領域まで加速困難なケースもあった。今後は機械的なメンテナンスにも注力し、制御特性評価のための環境を整える。一方で、これまで他の研究で使用していた定格出力 400W の PMSM に加えて、5kW クラスの永久磁石補助形同期リラクタンスモータでも制御特性評価を重視したい。永久磁石補助形同期リラクタンスモータでは、MTPF 制御が必要となる速度領域が広いいため、パラメータ変動による影響の評価がより重要になる。

5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

- [1] 藤井啓裕, 井上征則, 森本茂雄, 真田雅之: 「直接トルク制御を用いた PMSM におけるモータパラメータ変動が MTPF 制御の運転特性に与える影響」, 平成 29 年電気関係学会関西連合大会, pp. 88-89 (2017)
- [2] Keisuke Fujii, Yukinori Inoue, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada, “The Influence of DTC-Based PMSM Parameter Variations on Operating Characteristics for MTPF Control,” The 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia-), 2018. (Extended summary 投稿中)