

2017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の構築と有効性検証

2. 研究目的

本研究課題では、永久磁石同期モータ(PMSM)の出力密度向上のための制御法について、パラメータ変動に対する感度が低い制御法を構築する。

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、永久磁石同期モータ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)制御の適用が求められる。

研究助成 2016 にて、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を比較検討しており、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。

3. 研究内容及び成果

本研究では、 d, q 軸インダクタンス L_d, L_q , 永久磁石による電機子鎖交磁束 Ψ_a のパラメータ変動が MTPF 制御のトルク変動量 ΔT_{em-dm} に与える影響について、下記の関係式を導出した。

$$d \text{ 軸インダクタンス変動 } \Delta L_d \text{ に対して: } \Delta T_{em-dm} \cong \frac{\partial T_{em-dm}}{\partial L_d} \Delta L_d = \frac{P_n \Delta L_d}{2L_d^2} (2\Psi_a \sin \delta_m - \Psi_s \sin 2\delta_m) \quad (1)$$

q 軸インダクタンス変動 ΔL_q に対して:

$$\Delta T_{em-dm} = \frac{\partial T_{em-dm}}{\partial L_q} \Delta L_q = \frac{P_n \Psi_s \Delta L_q}{2L_d L_q^2} \{ 2\Psi_a L_q (1 - L_q) \sin \delta_m + \Psi_s (1 + L_q) (L_d - L_q) \sin 2\delta_m \} \quad (2)$$

永久磁石による電機子鎖交磁束の変動 $\Delta \Psi_a$ に対して:

$$\Delta T_{em-dm} = \frac{P_n}{2L_q L_d} \Delta \Psi_a \left\{ x \frac{d\Psi_s}{d\Psi_a} + \left(x + 2y \frac{d\Psi_s}{d\Psi_a} \right) \Psi_s + \left(x \frac{d\Psi_s}{d\Psi_a} + y \left(\frac{d\Psi_s}{d\Psi_a} \right)^2 \right) \Delta \Psi_a \right\} \quad (3)$$

$$x = 2L_q \sin \delta_m, \quad y = (L_d - L_q) \sin \delta_m$$

ただし、 P_n は極対数、 Ψ_s は電機子鎖交磁束、 δ_m は最大トルク角である。

従来法 (研究助成 2016) では、次式で MTPF 制御のための制限トルク T_{e-MTPF} を与えており、定数 k ($0 < k \leq 1$) を試行錯誤的に決める必要があることから、安定した制御のため定数の調整に手間がかかっていた。

$$T_{e-MTPF} = k \frac{P_n \Psi_s}{2L_d L_q} \{ 2\Psi_a L_q \sin \delta_m + \Psi_s (L_d - L_q) \sin 2\delta_m \},$$

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

M-T 座標上での直接トルク制御(DTC)による PMSM 駆動システムについて、MATLAB/Simulink を用いたシミュレーションに加えて実験を実施した結果、次の成果が得られた。なお、 $P_n = 2, L_d = 72 \text{ mH}, L_q = 368 \text{ mH}, \Psi_a = 0.0785 \text{ Wb}, R_a = 12.04 \Omega$ のモータパラメータを持つ供試機を用いた。

- (a) 図 1 に示したトルク変動量について、試行錯誤で得られた定数 k による運転特性と本研究で導出した (1)~(3) 式による運転特性は同等の傾向が得られており、数式による一般化とその有効性を確認できた。ただし、 d, q 軸インダクタンスの変動量大きい場合には差異が生じた。これは、(1)~(3) 式の導出過程で簡単化のために電機子鎖交磁束 Ψ_s と最大トルク角 δ_m を定数と見なしたためであると考えられる。
- (b) (1)~(3) 式では L_d, L_q, Ψ_a のうち一つのみ独立して変動した場合のトルク変動量を求める式であるが、実際のモータでは軸間干渉などにより互いに影響を受ける。そのため、 d, q 軸インダクタンスが同時に変動する場合についても評価した結果、 d 軸インダクタンスの影響が支配的であることが分かった。これは、図 1(a), (b) において、 d 軸インダクタンス変動がトルク変動量に大きな影響を与えることに関係する。
- (c) 図 1 には実験結果も同時に示した。実験でもパラメータ変動とトルク変動量に関係があることは確認できたが、シミュレーションで得られた特性とは異なる結果になった。インバータでの電圧誤差による影響を考慮できていないことから、DTC での推定磁束誤差が一因であると考えられる。

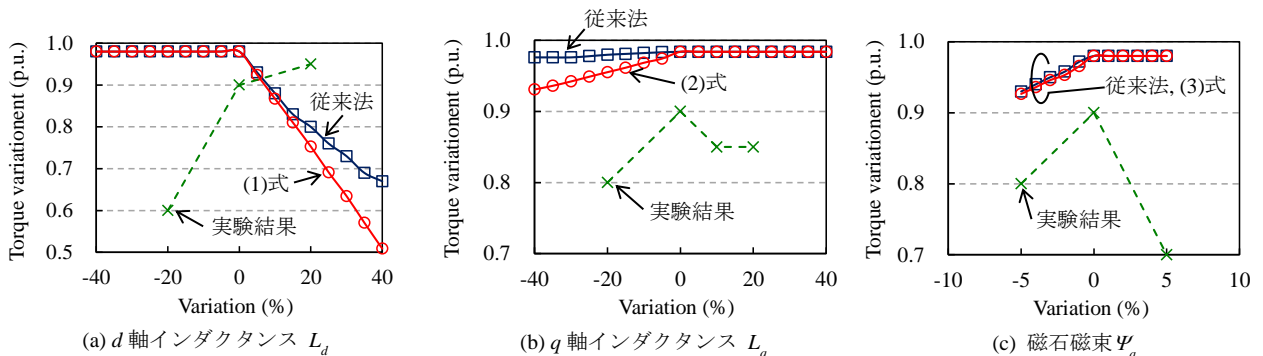


図 1 MTPF 制御時におけるパラメータ変動に対するトルク変動量

4. 今後の研究の見通し

今後は、一般化された数式を用いて制御法の構築を実施する。本研究で導出した数式を用いる際には、パラメータ変動の情報を得る必要がある点が課題である。過去に M-T 座標上での制御法構築において実施したモータパラメータ推定を参考にし、本研究への適用可能性について検討を進める。

また、モータパラメータ変動について、 L_d, L_q, Ψ_a が互いに影響することを考慮する場合には磁界解析などを活用した方が適切だと考えられる。具体的には、 $\Psi_a=0$ 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。

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

L_{T-MTPF} はインダクタンスに相当する物理量ではあるが、実際のモータ構造との関係が明らかにされていないことから、有限要素法やパーミアンス法などを用いて研究を進める予定である。

なお、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異なる結果になっており、対応が必要である。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

- [1] Keisuke Fujii, Yukinori Inoue, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada : "Influence of Parameter Variations on Operating Characteristics of MTPF Control for DTC-based PMSM Drive System", The 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia-), pp. 1189-1195 (2018)
- [2] 藤井啓裕, 井上征則, 森本茂雄, 真田雅之 : 「PMSM におけるモータパラメータ変動が直接トルク制御を用いた最大トルク/磁束制御に与える影響に関する検討」, 電気学会モータドライブ/回転機/自動車合同研究会, MD-18-79/RM-18-65/VT-18-20, pp. 27-32 (2018)
- [3] 藤井啓裕, 井上征則, 森本茂雄, 真田雅之 : 「DTC を用いた PMSM における d, q 軸インダクタンス変動が MTPF 制御の運転特性に与える影響」, 平成 30 年電気関係学会関西連合大会, G4-33 (2018)