

2018年度 永守財団 研究助成 研究報告書

| | |
|---------|--------|
| 所属機関名 | 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に必要なパラメータとモータ構造との関係説明

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構築に加えて、制御に適したモータ構造設計の基礎検討を行う。

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と2017にて、電機子抵抗、インダクタンス、磁石磁束の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、大きな影響が生じるパラメータを明らかにした。

これまでは既存のモータに対して制御法で所望の性能を得る手段が多かったが、反対のアプローチとして制御を容易にするモータ構造を探ることも一つの手段である。例えば、モータ駆動システムでは一般的な $d-q$ 座標ではパラメータ変動が大きい場合でも、見方を変えて他の座標系であれば変動が低減される可能性がある。特に、電機子鎖交磁束に同期した M-T 座標系において、インダクタンスに相当する物理量を用いていたものの、実際のモータ構造との関係は明らかにされていなかった。本研究課題で M-T 座標上でのパラメータとモータ構造との関係について検討を進める。得られた知見が将来のモータ設計に活かせることを目標とする。

3. 研究内容及び成果

M-T 座標上での数式モデルにおけるモータパラメータの電磁氣的意味について検討するために M 軸インダクタンス L_M を定義し、その算出式について検討した。図 1 に座標軸の定義を示す。図 1(a)より、 d - q 座標はモータ構造から定義することができるが、M-T 座標は困難である。しかし、図 1(b)より、ベクトル図を用いることにより M-T 座標は定義できる。本研究では次式の関係性を仮定して、M 軸インダクタンス L_M を定義する。

$$\Psi_o = L_M i_M + \Psi_a \cos \delta_o \tag{1}$$

ただし、 Ψ_o : 電機子鎖交磁束, i_M : M 軸電流, Ψ_a : 永久磁石による電機子鎖交磁束, δ_o : トルク角
 一方で、最大トルク/電流(MTPA)制御を適用する場合において、電機子電流が $I_a = 0$ であれば $\Psi_o = \Psi_a$ となることから、 Ψ_o を i_M の関数として考えると次式の関係を持つ。

$$\Psi_o = k i_M + \Psi_a \quad \text{ただし、} k \text{ は } i_M \text{ に対する } \Psi_o \text{ の微分係数とする。} \tag{2}$$

(2)式と図 1(b)のベクトル図を用いて、次のように k の式を導出した。

$$k = \frac{(\Psi_a + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2 - \Psi_a \sqrt{(\Psi_a + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2}}{(\Psi_a + L_d i_d) i_d + L_q i_q^2} \tag{3}$$

ただし、 L_d, L_q : d, q 軸インダクタンス, i_d, i_q : d, q 軸電流

さらに、(1)式と(2)式を用いて、 L_M の算出式を導出し、次式を得た。

$$L_M = \frac{(\Psi_a + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2 - \Psi_a \cos \delta_o \sqrt{(\Psi_a + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2}}{(\Psi_a + L_d i_d) i_d + L_q i_q^2} \tag{4}$$

導出した式の妥当性を確認するために、極対数 2 の表面磁石同期モータ(SPMSM; $L_d = L_q = 5.1\text{mH}$, $\Psi_a = 0.113\text{Wb}$)と IPMSM ($L_d = 6.4\text{mH}$, $L_q = 15.5\text{mH}$, $\Psi_a = 0.086\text{Wb}$)について、有限要素解析によって得られた特性を示す。図 2 は Ψ_o と i_M の関係である。図 2(a)の SPMSM においては、(2)式で仮定したように一次関数であるといえる。図 2(b)の IPMSM においては電流増加によって微分係数が変化することが分かる。図 3 には(4)式より得られる L_M の値を示す。(4)式は i_d, i_q の関数であるが、SPMSM の場合には L_M を定数と見なすことができ、インダクタンスに相当する量であることが分かった。IPMSM の場合には電流増加により減少することから、磁気飽和による影響が考えられる。

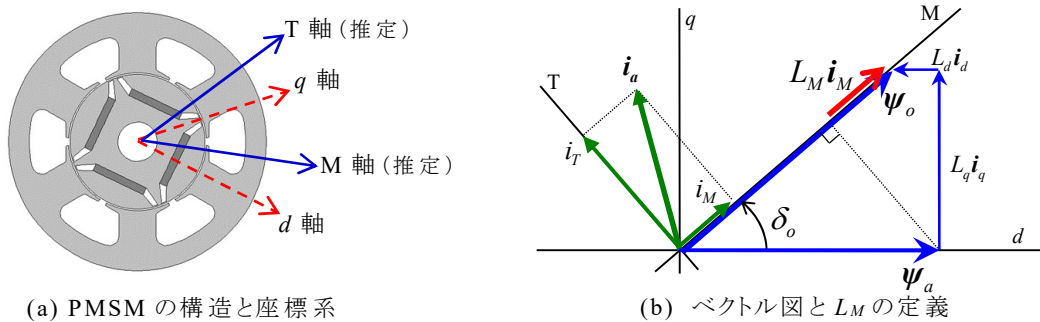
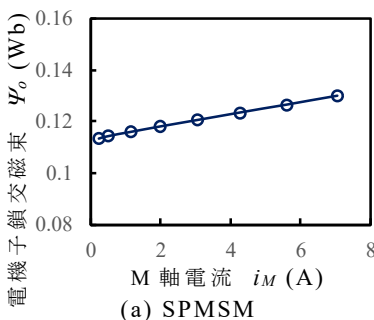
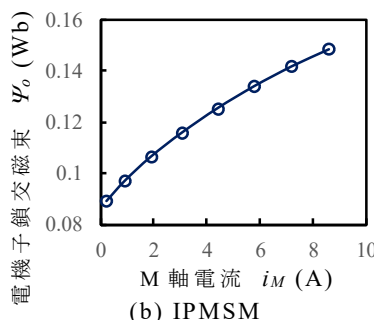


図 1 d - q 座標と M-T 座標の定義とベクトル図



(a) SPMSM



(b) IPMSM

図 2 電機子鎖交磁束と M 軸電流の関係

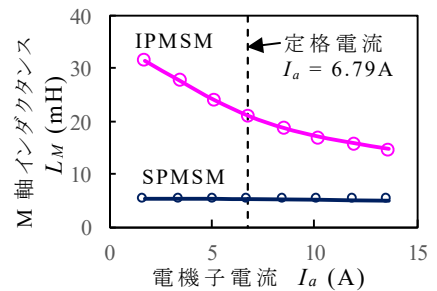


図 3 M 軸インダクタンスの特性

4. 今後の研究の見通し

実験装置準備に時間を要したため、引き続き実験での特性評価を進める必要がある。解析と同様に SPMSM では L_M を定数とでき、IPMSM では電流増加に対して L_M が減少する特性であるか確認し、導出した式の妥当性を評価する。また、同期リラクタンスモータでは $\psi_a = 0$ であることから、導出した式を簡略化できることを確認する。なお、M-T 座標ではインダクタンス変動の影響が小さいことを期待していたが、IPMSM においては変化を無視できない結果になった。したがって、 d - q 座標におけるパラメータ変動と比較検討する必要がある。

さらに、T 軸電流を含めた特性を明らかにすることで、MTPA 制御の新しい制御器の構築に発展させる予定である。直接トルク制御においては、トルクと磁束の関係により MTPA 制御を実現していたが、従来の T 軸電流と磁束の関係を用いる場合には計算法に課題があった。磁束の代わりに本研究で注目した M 軸電流を用いることにより、 d, q 軸電流制御と同様に電流制御系による構成が実現できることを期待している。

5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

[1] 海江田悠, 井上征則, 森本茂雄, 真田雅之: 「PMSM における M-T 座標上での制御パラメータの算出に関する基礎検討」, 令和元年電気関係学会関西連合大会, G4-11 (2019)

今後、令和 2 年電気学会全国大会 (2020 年 3 月) や電気機器とそのシステムに関する国際会議 ICEMS 2020-Hamamatsu (2020 年 11 月) に論文投稿を予定している。