

2019年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	鹿児島大学 大学院理工学研究科 工学専攻
職位または役職	助教
氏名	篠原 篤志

1. 研究題目

埋込磁石同期モータのセンサレス制御に適した最大効率制御則の開発

2. 研究目的

IPMSM に関する既存の高効率制御法のうち、モータ効率を最大にする制御則(最大効率制御)が提案されているが、同一速度においては、最大出力運転より出力(トルク)が小さい点、解析および定式化が困難な鉄損を考慮に入れる必要性から、最大効率制御は最大出力運転ほど研究・開発が盛んではない。

最大効率制御を検討するにあたって重要となる IPMSM の電氣的損失は、電機子巻線の電気抵抗による銅損と、電磁鋼板の磁気特性の非線形性による鉄損から成る。鉄損はさらにヒステリシス損と渦電流損に分けられ、前者は電磁鋼板のヒステリシス特性、後者は電磁鋼板に生じる渦電流を起因とするが、いずれも固定子に加わる回転・交番磁界が元となっている。最大効率制御を実現する場合は鉄損を考慮する必要があるが、現状では、IPMSM の等価回路において等価鉄損抵抗という形で考慮している。一方、IPMSM の場合は回転速度は印加交流電圧周波数と比例関係にあり、また鉄損のモデル化の際にしばしば用いられる実験式から、鉄損を回転速度の関数として記述する方法もある。本研究では、鉄損が磁束密度の関数でもあるという点に着目し、IPMSM の鉄損を固定子磁束を用いて表現することを試みる。

他方、AC モータの高性能制御のために昨今用いられているベクトル制御は、元来はモータ磁束を制御する制御方式である。磁束の推定には $d-q$ 回転子同期座標系で電流とインダクタンスを用いて推定する方法の他、静止座標系で電圧を積分して推定する方法もある。ここで静止座標系での磁束推定を用いたベクトル制御において、IPMSM の鉄損を固定子磁束を用いて表現すると、回転座標系を用いることのない、センサレス制御に非常に適した最大効率制御が実現可能であると考えられる。固定子磁束を制御に用い、かつ回転座標系を用いることのないセンサレス制御方式として直接トルク制御(DTC)があり、センサレス電流ベクトル制御方式に代わるモータ駆動方式として近年注目されているが、DTCにおける最大効率制御則は、申請者の知る限り存在しない。

ここで、固定子磁束を用いて鉄損を表現することで、DTC における最大効率制御が容易に達成できる可能性がある。本研究では、DTC を用いた IPMSM 駆動システムで最大効率制御を実現するための制御則、およびその制御則に最適な鉄損の表現方法の構築を目指す。

3. 研究内容及び成果

DTC はトルクと電機子鎖交磁束振幅を指令値とする。

鉄損を含めた IPMSM の等価回路を図 1 のように考える場合、銅損と鉄損の総和が最小になるときのトルク T_e と電機子鎖交磁束振幅 Ψ_{s-ME} の間には次式の関係がある。

$$\Psi_{s-ME}^2 = \left(\frac{L_d \Psi_D - L_q \Psi_a}{L_d - L_q} \right)^2 + \left(\frac{L_q T_e}{P_n \Psi_D} \right)^2 \quad (1) \quad \Psi_D = K_2 \Psi_a \left(\frac{1 + x_R}{4} \right) \sqrt{\frac{2}{x_R} - 1} \quad (2)$$

$$x_R = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \left(\sqrt{3x_T^2 + 1} + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\sqrt{3x_T^2 + 1} - 1 \right)^{\frac{1}{3}} \right\}^3} \quad (3) \quad x_T = \frac{16 K_1 (L_q - L_d)}{9 P_n K_2^2 \Psi_a^2} T_e \quad (4)$$

$$K_1 = \sqrt{\frac{R_a + \omega^2 G_c (1 + R_a G_c) L_q^2}{R_a + \omega^2 G_c (1 + R_a G_c) L_d^2}} \quad (5) \quad K_2 = \frac{R_a + \omega^2 G_c (1 + R_a G_c) L_d L_q}{R_a + \omega^2 G_c (1 + R_a G_c) L_d^2} \quad (6)$$

ただし、 R_a は電機子抵抗、 G_c は等価鉄損コンダクタンス(等価鉄損抵抗 R_c の逆数)、 P_n は極対数、 Ψ_a は磁石磁束、 L_d, L_q は d, q 軸インダクタンス、 ω は回転角速度(電気角)である。

(1)~(6)式を用いて指令トルクから計算した Ψ_{s-ME} を DTC の指令磁束 Ψ_s^* として用いることにより、最大効率制御が達成できる。検証として、算出した Ψ_{s-ME} に補正係数 ε を与えて DTC の指令値とした際の効率をシミュレーションで調査すると、図 2 のように、 Ψ_s^* が Ψ_{s-ME} に一致する場合 ($\varepsilon=1$) に最大効率が得られることが確認できた。

最大効率を得るための注意点として、電機子鎖交磁束を正確に推定するために、磁束推定器は鉄損を考慮したものでなければならないことが新たに判明した。そこで、これまでに報告されていた磁束オブザーバは鉄損を考慮していないため、図 3 に示すような鉄損を考慮した磁束オブザーバを併せて提案した。

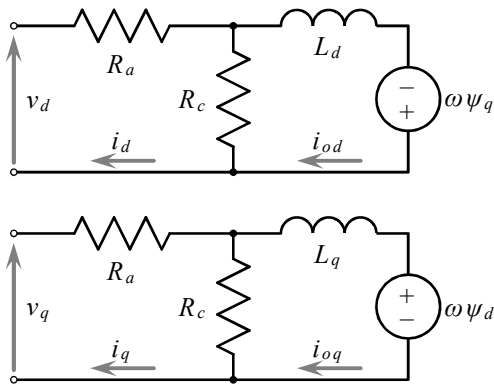


Fig. 1 d- and q-axis equivalent circuits of the PMSM..

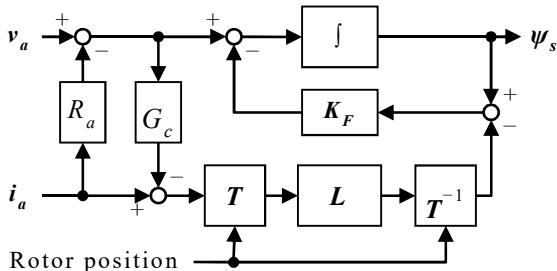


Fig. 3. Stator flux observer considering iron losses.

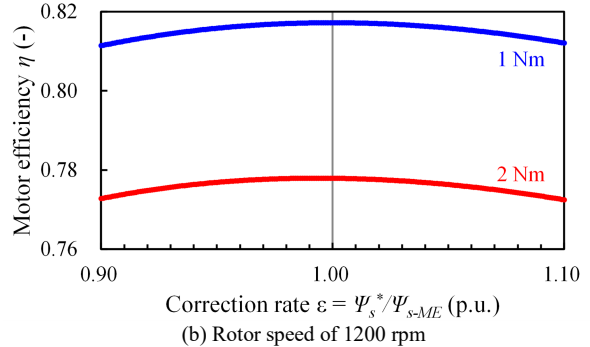
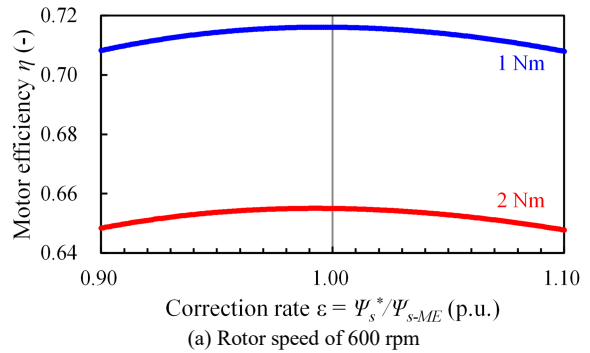


Fig. 2. Simulation results of the relationship between the efficiency and the correction rate under the constant speed and torque.

4. 今後の研究の見通し

本研究成果により、最大効率制御を実現するための定式化は完了した。並行して行っている実験装置の準備に時間を要しているため、今後は実験装置を作成し、本研究成果の実機実験による検証を行う。

一方、最大効率制御を含めた高効率制御における課題の1つに、パラメータ変動への対策がある。例えば、磁気飽和による磁石磁束やインダクタンスの変動は、電流の関数として表現して逐次計算することで対策されている。等価鉄損抵抗の変動も速度の関数として考慮することで対策されているが、磁気飽和現象の等価鉄損抵抗への影響は明確になっていない。この点を明確にするには、有限要素法による電磁界解析を併用する必要がある。そのため継続研究として、磁気飽和の等価鉄損抵抗への影響、あるいは鉄損と固定子磁束との因果関係を電磁界解析により明らかにし、可能であれば(1)~(6)式を G_c に関して整理し、更に簡潔な関係式を追求する。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

国際会議(査読有)

- [1] A. Shinohara and K. Yamamoto, "A reference flux calculation method for realizing maximum efficiency operation in direct torque controlled PMSM drives," the Proceedings of International Conference of Electrical Machine and Systems 2020 (ICEMS-Hamamatsu 2020), pp. 1619-1624.

国内会議(査読無)

- [2] 徳留正典, 篠原篤志, 山本吉朗: 「直接トルク制御を用いた埋込磁石同期機の最大効率制御を達成するための指令磁束計算法」, 令和2年電気学会全国大会講演論文集, 第5分冊, pp. 140-141, 2020年3月
- [3] 篠原篤志, 山本吉朗: 「PMSM向け直接トルク制御の磁束オブザーバにおける鉄損の影響とその考慮」, 令和2年電気学会全国大会講演論文集, 第5分冊, pp. 138-139, 2020年3月