

2021 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	鹿児島大学 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、報告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。

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

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

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

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_{sme} 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。

上記の内容は研究助成 2019 で報告したが、研究助成 2021 では実機実験による検証を行った。検証に用いた IPMSM の各種モータ定数を表 1 に示す。ここで鉄損の周波数依存性を考慮し、等価鉄損コンダクタンス G_c を次式のように ω に対する関数としている。

$$G_c = 0.00031 + \frac{0.342}{\omega} \text{ [S]} \quad (7)$$

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実機実験により調査すると、図 2 のように、 Ψ_s^* が Ψ_{sme} に一致する場合 ($\varepsilon=1$) に最大効率を得られることが確認できた。

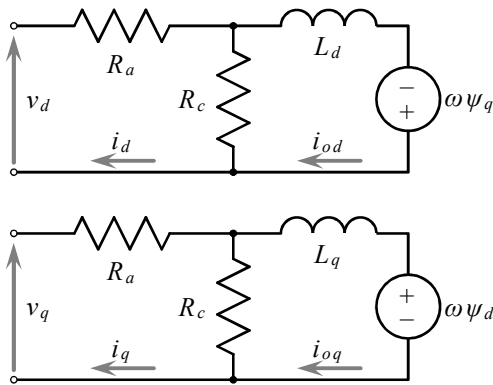


Fig. 1 d - and q -axis equivalent circuits of the PMSM..

Table 1. Parameters of the tested systems.

Number of pole pairs P_n	3
Armature resistance R_a	1.877 Ω
Equivalent iron-loss conductance G_c	Eq.(7)
d -axis inductance L_d	14.80 mH
q -axis inductance L_q	29.38 mH
Rated power	0.75 kW
Rated speed	1150 min^{-1}
Rated phase current	3.3 A
Inverter carrier frequency	10 kHz

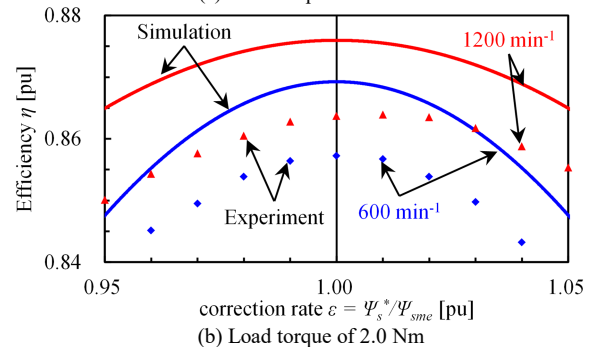
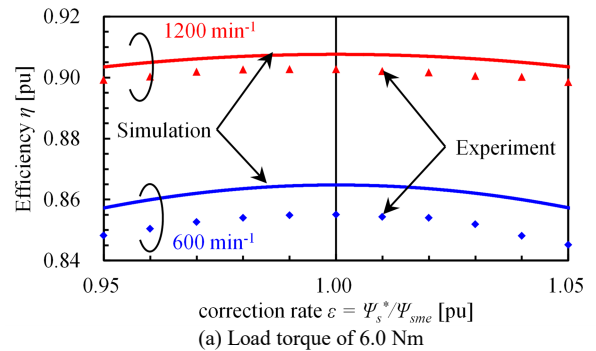


Fig. 2. The relationship between the efficiency and the correction rate under the constant speed and torque.

4. 今後の研究の見通し

今回検証に用いた IPMSM は、定格電流内で磁気飽和が比較的生じにくいモータであった。そのためインダクタンスや磁石磁束を定数として検証できたが、自動車駆動用 IPMSM や SynRM など、磁気飽和が生じやすい同期モータではインダクタンスや磁石磁束が磁気飽和の影響により変動する。これらモータ定数の変動しやすいモータにおいても同様に最大効率運転が実現できるか、今後検証していく。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

【学術論文(査読付き)】

電気学会論文誌へ投稿準備中

【国内学術会議予稿(査読なし)】

前村貴斗・篠原篤志・山本吉朗:「直接トルク制御を用いた IPMSM の最大効率運転に関する検討」, 2022 年電気学会全国大会講演論文集, 第 5 分冊, pp.144-145 (2022)

前村貴斗・篠原篤志・山本吉朗:「直接トルク制御を用いた IPMSM の最大効率運転の実機検証」, 第 75 回電気・情報関係学会九州支部大会講演論文集, pp.118-119 (2022)