

## 2020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、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

鉄損の表現方法の考案にあたり、まず等価鉄損抵抗の特性について調査、検討した。

鉄損を含めた IPMSM の等価回路を図 1 のように考える場合、等価鉄損抵抗  $R_c$  は入力電圧  $V_a$ 、入力電流  $I_a$ 、入力電力  $P$ 、トルク  $T_e$ 、回転子角速度(電気角)  $\omega$  および電機子抵抗  $R_a$  を用いて次式のように表せる。

$$R_c = \frac{V_a^2 + (R_a I_a)^2 - 2R_a P}{P - R_a I_a^2 - \omega T_e} \quad (1) \quad \text{ただし,} \quad V_a = \sqrt{v_d^2 + v_q^2}, I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}, P = v_d i_d + v_q i_q \quad (2)$$

(1)式は座標系や制御方法を問わず利用でき、さらに上式のうち  $V_a, I_a, P$  はパワーメータで、 $T_e, \omega$  はトルクメータで検出できるため、 $R_a$  が既知であれば  $R_c$  を算出できる。

まず(1)式の妥当性を検証するため、電気学会 D モデルの FEA による電磁界解析モデルを作成し、実際の鉄損から求めた  $R_c$  と(1)式より求めた  $R_c$  とをシミュレーションにより比較した。その結果、図 2 に示すように広範囲で特性が一致したため、(1)式が有用であることがわかる。また図 2 はトルク一定の条件であるため、 $d$  軸電流  $i_d$  の変化により固定子鎖交磁束が変化することを考慮すると、解析結果では  $R_c$  が固定子鎖交磁束の依存性を持っていることが伺える。

次に、 $R_c$  の周波数依存性の表現方法を考える。鉄損  $W_l$  の実験式は(3)式で、図 1 の定常状態における鉄損 ( $R_c$  の消費電力)は(4)式で表せる。

$$W_l = \sigma_h f B^\alpha + \sigma_e f^2 B^2 \quad (3) \quad W_l = \frac{V_o^2}{R_c} = \frac{\omega^2(\psi_d^2 + \psi_q^2)}{R_c} = \frac{\omega^2 \Psi_s^2}{R_c} \quad (4)$$

(3)式で  $\alpha$  は 1.6~2.2 程度の値をとるが、 $\alpha=2$  と仮定すると、 $\Psi_s$  は固定子鎖交磁束なので磁束密度  $B$  と比例し、また同期機の場合は回転子角速度(電気角)  $\omega$  が回転磁界の回転周波数  $f$  と比例するので、(3),(4)式から次式の関係が成り立つ。

$$\frac{1}{R_c} = \frac{k_h}{\omega} + k_e \quad (5)$$

また、(1)式から求めた  $R_c$  に対し最小二乗法を用いて(5)式を当てはめると、概ね一致する特性が得られた。そのため、等価鉄損抵抗の周波数依存性を(5)式で表現することにより、より少ない情報量で等価鉄損抵抗の変化を表現できると考えられる。

以上のシミュレーション結果を基に、(1)式を用いて実験機の等価鉄損抵抗  $R_c$  の測定を行った。図 3 に測定結果を示す。高周波数領域で(5)式が適用できないという問題点は生じたが、広範囲でシミュレーションと同様の傾向が得られたため、(1)式を利用した等価鉄損抵抗の測定は有効であると考えられる。なお実験機は市販の IPMSM であるため、シミュレーションとはモータ構造が異なる。

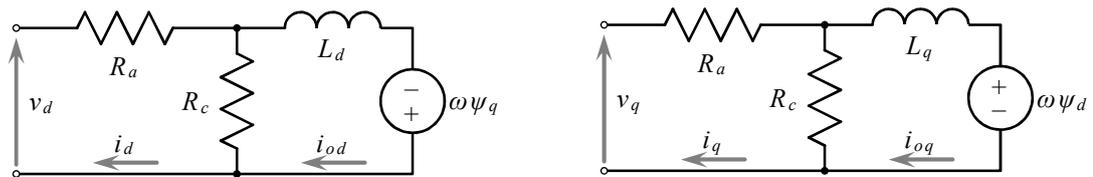


Fig. 1 d- and q-axis equivalent circuits of the PMSM.

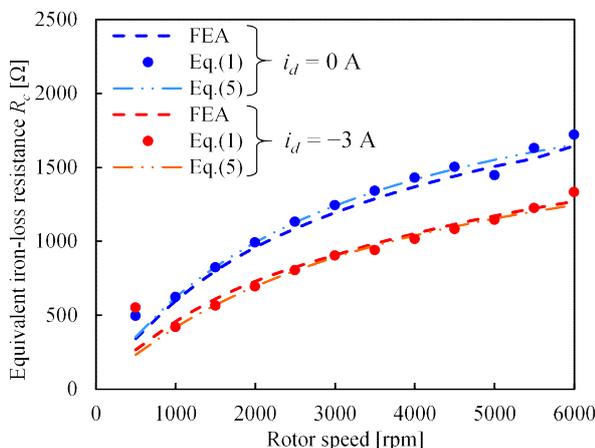


Fig. 2 Simulation results of measurement of equivalent iron-loss resistance.

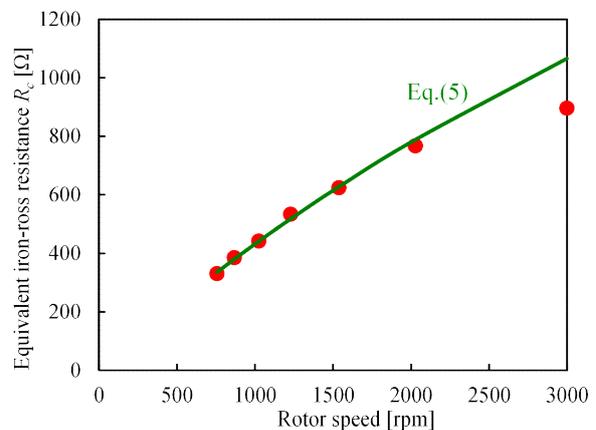


Fig. 3 Experimental results of measurement of equivalent iron-loss resistance.

#### 4. 今後の研究の見通し

---

昨年の研究成果である，直接トルク制御を用いた IPMSM の最大効率制御のための指令値計算則に，(5)式を導入することで，実際に最大効率制御が行えるかどうかを検証する。また，図 2 に見られるような等価鉄損抵抗の固定子磁束依存性を明らかにし，最大効率制御への応用を検討する。

併せて，指令値計算則を実機実験により検証する。

#### 5. 助成研究による主な発表論文，著書名

---

国内会議（査読無）

- [1] 前村貴斗，篠原篤志，山本吉朗：「PMSM 駆動システムの制御法によらない等価鉄損抵抗の計算方法」，電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集，p. 126, 2021年 9月

※電気学会優秀論文発表賞 B 賞 受賞