

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 7 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420268

研究課題名(和文)EV用に適した脱レアアース外転型磁束変調同期機の開発

研究課題名(英文)Development of a Rare-Earth-Free, Outer-Rotor, Flux-Modulating Synchronous Machine for Electric Vehicles

研究代表者

深見 正 (Fukami, Tadashi)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：60247434

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、レアアース磁石を使わないEV/HEV用磁束変調同期機(FMSM)を開発した。小形の実験機を用いて、FMSMの電動機としての動作メカニズムとその特性を調べた。併せて、50 kWのFMSMを設計し、その特性を既存の埋込磁石同期機(IPMSM)と比較した。その結果、FMSMは磁石トルクのみで動作することがわかった。また、50 kWのFMSMにおいて、同一体格・同一出力のIPMSMの約9割の最大トルクを発生できることが判明した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a flux-modulating synchronous machine (FMSM) for EV/HEV that does not use rare-earth magnets has been developed. Using a small experimental machine, the operating mechanism and characteristics in a motor mode of the FMSM were investigated. In addition to this, a 50-kW FMSM was designed and its characteristics were compared to those of an existing interior permanent magnet synchronous machine (IPMSM). As a result, the FMSM was found to operate only with the magnet torque. Moreover, it was revealed that, in the 50-kW FMSM, the maximum torque of about 90% of the IPMSM can be generated.

研究分野：工学

キーワード：電気自動車 ハイブリッド車 電動機

## 1. 研究開始当初の背景

近年、エネルギー制約の高まりや地球温暖化対策といった観点から、エネルギー効率が高く、二酸化炭素の排出が少ない電気自動車 (EV) やハイブリッド電気自動車 (HEV) が注目され、これらに用いる電動機の研究開発が活発に進められている<sup>(1)</sup>。

EV/HEV 駆動用電動機には、界磁に永久磁石を埋め込んだ同期電動機 (IPMSM) が広く使われている。IPMSM は、小形・軽量で、低速回転域から高速回転域にわたって高出力、高効率で運転できる特長がある。しかし、永久磁石には、レアアースが使われており、価格の高騰や供給不安などの問題が払拭できない。このため、レアアース磁石を減らす、あるいは一切使わない電動機の開発が強く求められている<sup>(2)</sup>。

研究代表者は、これまでに、レアアース磁石を用いずにブラシレス構造で界磁磁束を可変できる磁束変調同期機 (FMSM) を考案し、発電機としての特性を明らかにしている<sup>(3)</sup>。

## 2. 研究の目的

研究の全体構想は、レアアース磁石を使用しない、脱レアアースの FMSM を電動機として検討し、その要素研究を格段に発展させることによって、より低コストの EV/HEV 駆動用電動機を実現し、地球規模のエネルギー・環境問題の解決に貢献することにある。

具体的な研究目的は、以下の通りである。

- (1) 電動機用の FMSM を新たに試作し、その動作メカニズムを明らかにする。
- (2) 併せて、制御に必要な理論を構築し、FMSM の電動機としての特性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 研究目的 (1) 及び (2) を明らかにするために、実験機を製作し、電動機としての動作メカニズムと特性を、数式、有限要素解析 (FEA)、及び実験により検討した。

(2) 研究目的に追加して、レアアース磁石を使用しないで、FMSM がどの程度の性能 (特に、トルク) を出し得るかを明らかにするために、HEV 駆動用電動機に使われている既存の 50 kW IPMSM と同一体格・同一出力の FMSM を設計し、その特性を FEA により調べた。

## 4. 研究成果

### 4.1 FMSM の構造と動作メカニズムの分析

#### 4.1.1 構造

図 1 に、試作した外転型 FMSM の 1/2 断面図を示す。固定子は各ティースに極数の異なる電機子巻線  $W_a$  と界磁巻線  $W_f$  を集中巻し、回転子は鉄心のみの突極構造としている。 $W_a$  の極数  $2p_a$  は 12 極、 $W_f$  の極数  $2p_f$  は 18 極とし、回転子の突極数  $p_r$  は磁束変調の原理から  $15 = (12+18)/2$  としている。

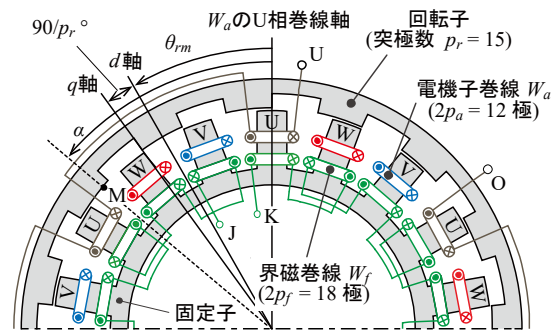


図 1 試作した外転型 FMSM の構造

#### 4.1.2 動作メカニズムの分析

電動機では、インダクタンスが回転子位置に伴い変化すると、それに応じてギャップに蓄えられた磁気エネルギーが動力に変換されてトルクを発生する。そこで、FMSM のインダクタンスを数式と FEA により求め、電磁エネルギー変換の観点からトルクの発生メカニズムを分析した。

FMSM のインダクタンスのうち、代表的なものを数式で示すと、次のようになる。

$$L_u = l_a + rl \int_0^{2\pi} P \cdot n_u^2 \cdot d\alpha = l_a + L_a \quad (1)$$

$$M_{uv} = rl \int_0^{2\pi} P \cdot n_u \cdot n_v \cdot d\alpha = -\frac{1}{2} L_a \quad (2)$$

$$M_{uf} = rl \int_0^{2\pi} P \cdot n_u \cdot n_f \cdot d\alpha = M_{af} \cos(p_r \theta_{rm}) \quad (3)$$

ただし、 $L_u$ :  $W_a$  一相 (U 相) の自己インダクタンス、 $l_a$ :  $W_a$  一相の漏れインダクタンス、 $L_a$ :  $W_a$  一相の有効インダクタンス、 $\alpha$ :  $W_a$  の U 相巻線軸とギャップの M 点とのなす機械角、 $P$ : 単位面積あたりのギャップパーミアンス (固定子スロットの開口部の影響を無視)、 $l$ : 回転子の積厚、 $\theta_{rm}$ :  $W_a$  の U 相巻線軸と回転子の磁極中心軸とのなす機械角 (すなわち、回転子位置  $\theta_{rm} = \omega_{rm} t$ )、 $\omega_{rm}$ : 回転子の回転角速度、 $r$ : 固定子中心からの内半径、 $M_{uv}$ :  $W_a$  相間 (U-V 間) の相互インダクタンス、 $M_{uf}$ :  $W_a$  一相と  $W_f$  との間の相互インダクタンス、 $M_{af}$ :  $W_a$  一相と  $W_f$  との間の相互インダクタンスの最大値。

式 (1) ~ (3) から、 $L_u$  と  $M_{uv}$  は  $\theta_{rm}$  にかかわらず一定であり、 $M_{uf}$  は  $\theta_{rm}$  によって正弦波状に変化することがわかる。

これらのことを FEA でも調べた。図 2 に、その結果を示す。図から、FEA でも、式 (1) ~ (3) と同じインダクタンス特性となることが確認できる。

したがって、FMSM は、 $\theta_{rm}$  に対する  $M_{uf}$  の変化でトルクを発生し、いわゆる磁石トルクのみで動作することがわかる。

### 4.2 FMSM の電動機特性の解析

#### 4.2.1 dq 座標系のトルク式

EV/HEV 用電動機では、瞬時に所望トルクを得るため、

ベクトル制御が使われている。そこで、ベクトル制御に必要なとなる  $dq$  座標系のトルク式を求めた。

$$T = p_r M_{df} I_f i_q \quad (4)$$

ここで、 $T$ : 平均トルク、 $M_{df}$ :  $d$  軸巻線と  $W_f$  との相互インダクタンス、 $I_f$ : 界磁電流、 $i_q$ :  $q$  軸電流。

式 (4) から、FMSM をベクトル制御すると、トルクは電機子電流と界磁電流により制御できることがわかる。

図 3 に、FMSM の駆動システムを示す。これを用いて、FMSM を式 (4) のトルク式に基づきベクトル制御した。

**4.2.2 最大トルク制御 ( $i_d=0$  制御)** 図 4 に、 $d$  軸電流  $i_d$  を 0 (電流位相角  $\beta=0$ ) に設定し、FMSM を最大トルク制御した場合の  $q$  軸電流トルク特性を示す。図から、FMSM をベクトル制御すると、トルクを式 (4) の通りに電機子電流と界磁電流により制御できることがわかる。

**4.2.3 弱め界磁制御** FMSM の回転速度  $N_r$  が  $600 \text{ min}^{-1}$  のときを基底速度  $N_b$  と定義し、それ以上では、 $N_b$  のときの  $W_a$  の線間電圧 (端子電圧) を一定に保つようにして、FMSM を弱め界磁制御した。電動機定数は、FEA により求め、未飽和のものを用いた。

$N_b$  では、 $i_d=0$  制御 ( $\beta=0$ ) であるため、制限電圧  $V_{om}$  は、次式で与えられる。

$$V_{om} = p_r \times \frac{2\pi N_b}{60} \sqrt{(M_{df} I_f)^2 + (\sqrt{3} L_q I_a)^2} \quad (5)$$

したがって、実験機の場合、 $M_{df}=13.5 \text{ mH}$ 、 $I_f=3.18 \text{ A}$ 、 $q$  軸インダクタンス  $L_q=4.6 \text{ mH}$ 、電機子電流  $I_a=5.65 \text{ A}$  であるので、 $V_{om}=58.0 \text{ V}$  となる。

本研究では、実験機に対して、 $I_a$  が定格値 ( $5.65 \text{ A}$ ) と定格の 7 割の値 ( $3.96 \text{ A}$ ) ときの 2 種類について、弱め界磁特性を調べた。

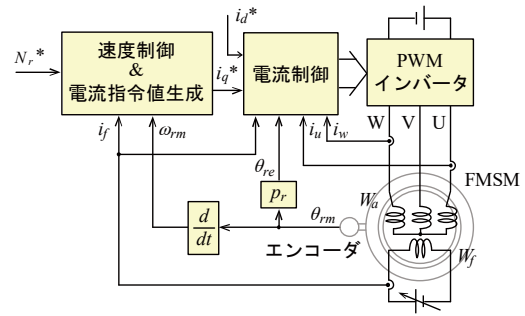
FMSM は、 $W_a$  と  $W_f$  の 2 つの巻線を有する。このため、 $I_a$  だけでなく  $I_f$  により弱め界磁制御ができる。

図 5 に、 $i_d$ 、 $i_q$  変更時の特性 ( $I_a$  が定格時) を示す。図からわかるように、 $I_a$  が定格の範囲では、 $I_f$  を変えず  $I_a$  による  $i_d$  と  $i_q$  の両方を制御すると、定出力運転でき、運転範囲を広くとることができる。

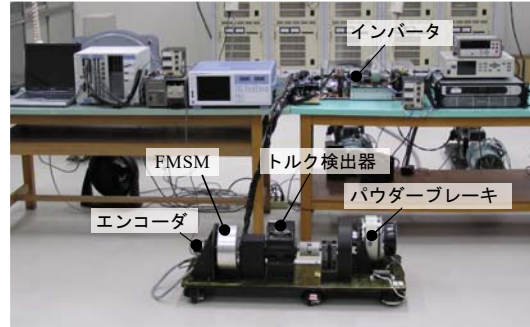
図 6 に、 $i_d$ 、 $i_q$ 、及び  $I_f$  変更時の特性 ( $I_a$  が定格の 7 割) を示す。その結果、 $2400 \text{ min}^{-1}$  のときの界磁銅損は  $28 \text{ W}$  と  $I_f$  を変更しない場合の  $61 \text{ W}$  と比べて半減した。また、 $I_a$  が小さい場合、 $I_a$  ( $i_d$  と  $i_q$ ) による弱め界磁制御のほかに  $I_f$  を変更すると、界磁銅損を低減でき、かつ定出力運転できることがわかった。このため、 $I_a$  が小さい範囲では、 $I_a$  だけでなく  $I_f$  による弱め界磁制御を併用することで、より高効率で運転できる。

### 4.3 HEV 駆動用 50 kW FMSM の設計と特性シミュレーション

#### 4.3.1 FMSM と IPMSM の構造 50 kW



(a) ブロック線図



(b) 外観

図 3 駆動システム

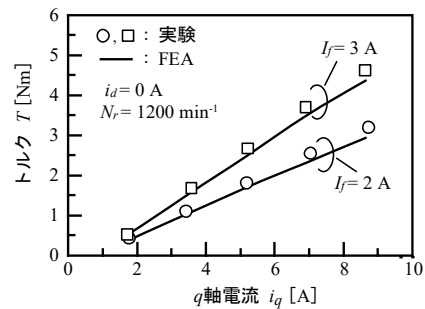


図 4  $q$  軸電流トルク特性

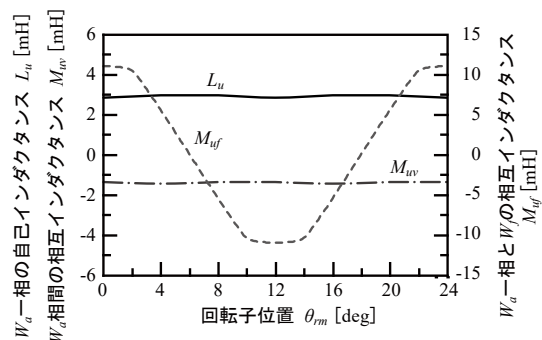
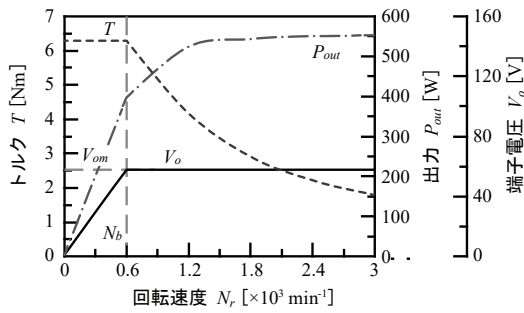


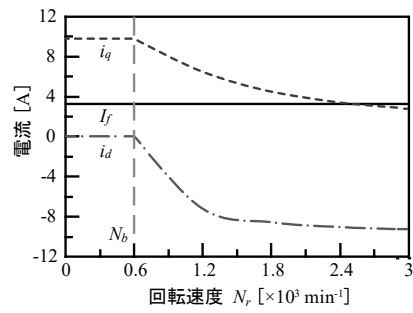
図 2 インダクタンス特性

FMSM の設計に当たっては、レアアース磁石相当のトルクを得るため、巻線占積率と鉄心積厚を増加させた。

図 7 に、前述の方針に基づき設計した 50 kW FMSM の構造を示す。 $W_a$  と  $W_f$  は集中巻であり、 $2p_a$  は 8 極、 $2p_f$  は 12 極とし、回転子の突極数は 10 に選定した。

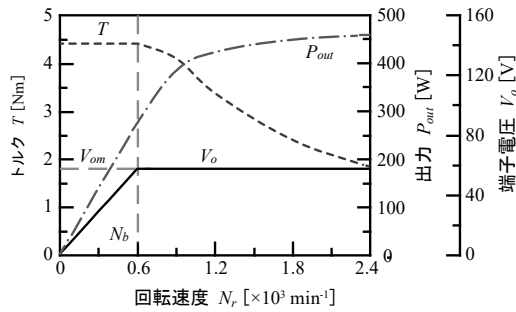


(a) トルク, 出力, 端子電圧特性

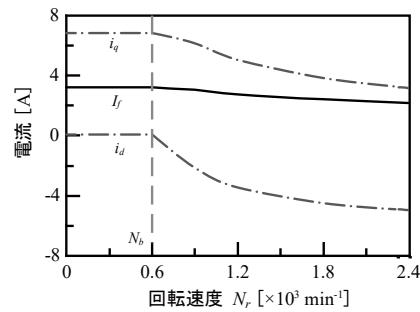


(b) 電流特性

図5  $i_d, i_q$ 変更 ( $I_a=5.65$  A,  $I_f=3.18$  A)



(a) トルク, 出力, 端子電圧特性



(b) 電流特性

図6  $i_d, i_q, I_f$ 変更 ( $I_a=3.96$  A,  $I_f=3.18$  A)

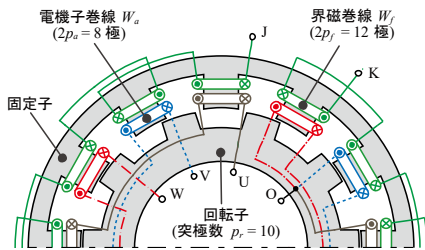


図7 50 kW FMSMの構造

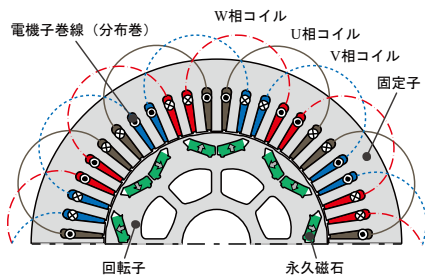


図8 50 kW IPMSMの構造

一方、図8に、ベンチマークとした既存の50 kW IPMSMの構造を示す。IPMSMの設計に当たっては、HEV (トヨタ・プリウス) に使われている電動機<sup>(4)</sup>を参考にし、これとほぼ同一仕様にした。

FMSMは、集中巻であるため、分布巻のIPMSMより、巻線占積率を1.5~2倍程度高

く設計できる。また、巻線法の違いにより、図9に示すように、コイルエンドを短く設計できるため、同一軸長で考えた場合、鉄心積厚も増加できる。

表1に、両機の詳細な設計パラメータを示す。

**4.3.2 特性シミュレーション** 図10と図11に、電流密度を40 A/mm<sup>2</sup> ( $I_a=160.85$  A)としたときの最大トルクの比較とそのときのトルク脈動を示す。図10から、FMSMでは、 $\beta=10$  degのとき、最大トルク207.41 Nmが発生し、レアアース磁石を使わずにIPMSMの約9割の値を出し得ることがわかる。また、図11から、FMSMのトルク脈動がIPMSMと比べて半分程度と小さいことも確認できる。

#### 4.4 まとめ

以下に本研究で得られた成果を要約する。

- (1) 電機子巻線の自己インダクタンスと相互インダクタンスは、回転子位置によらず一定である。また、電機子巻線と界磁巻線との相互インダクタンスは、回転子位置によって正弦波状に変化する。このことは、FMSMが両突極構造を有するにもかかわらず、円筒形同期機と類似のインダクタンス特性を持つことを意味している。
- (2) トルクは、電機子巻線と界磁巻線との相互インダクタンスの変化のみで発生する。このことは、FMSMがいわゆる磁石トルクのみで動作することを意味している。
- (3) FMSMをベクトル制御すると、トルク

表 1 設計パラメータ

パラメータ	FMSM	IPMSM
固定子外径	266 mm	266 mm
固定子内径	194 mm	162 mm
ギャップ長	1 mm	1 mm
鉄心積厚	70 mm	50 mm
電機子電流密度	40 A/mm <sup>2</sup>	40 A/mm <sup>2</sup>
界磁電流密度	40 A/mm <sup>2</sup>	—
巻線占積率	44.50 %	28.50 %
動作極数	20 (= 8+12)	8
鉄心材料	20JNEH1200	20JNEH1200
永久磁石	—	N39UH

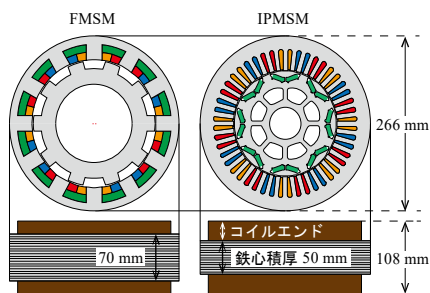


図 9 鉄心積厚とコイルエンドの長さ

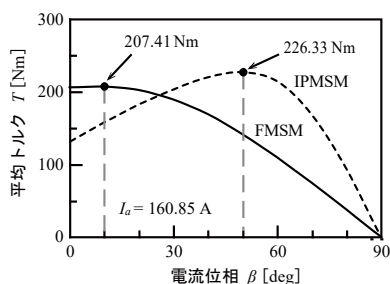


図 10 電流位相トルク特性

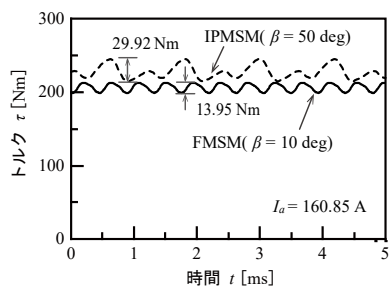


図 11 トルク脈動

は、電機子電流と界磁電流により制御できる。

- (4) 電機子電流を定格値にして弱め界磁制御した場合、界磁電流を一定にして、 $d$  軸電流と  $q$  軸電流の両方を制御すると、定出力で運転範囲を広げることができる。
- (5) 電機子電流を定格の 7 割（使用した実

験機の場合) にして弱め界磁制御した場合、 $d$  軸電流と  $q$  軸電流のほかに、界磁電流を調整すると、高効率で定出力運転できる。

- (6) 50 kW の FMSM は、同一体格・同一出力の IPMSM に比べて、レアアース磁石を使わずに約 9 割の最大トルクを発生できる。

#### <引用文献>

- (1) 西尾 章・平野雅弘・加藤義樹・入江隆之・馬場 功:「電気自動車用小型・軽量・高出力 IPM モータの開発」, 三菱重工技報, vol. 40, no. 5, pp. 266-269 (2003-9)
- (2) 松井信行:「省レアアース・脱レアアースモータ」, 日刊工業新聞社, pp. 60-203 (2013)
- (3) T. Fukami, Y. Matsuura, K. Shima, M. Momiyama, and M. Kawamura, “A Multipole Synchronous Machine With Nonoverlapping Concentrated Armature and Field Windings on the Stator,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 6, pp. 2583-2591, Jun. 2012.
- (4) T. A. Burress, S. L. Campbell, C. L. Coomer, C. W. Ayers, A. A. Wereszczak, J. P. Cunningham, L. D. Marlino, L. E. Seiber, and H. T. Lin, “Evaluation of the 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive System,” *Oak Ridge National Laboratory Technical Report*, ORNL/TM-2010/253, Mar. 2011.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 深見 正・山田知徳・島 和男・津田敏宏・川村光弘:「磁束変調同期電動機」, 電学論 D, Vol. 134, no. 6, pp. 634-640, 査読有 (2014-6)  
DOI:10.1541/ieejias.134.634

[学会発表] (計 2 件)

- ① 植野祐介・深見 正・島 和男:「磁束変調同期電動機の運転特性」, 平成 26 年度電気関係学会北陸支部連合大会, A30 (2014-9)
- ② 植野祐介・深見 正・島 和男:「HEV 用磁束変調同期機的设计と特性シミュレーション」, 平成 27 年度電気関係学会北陸支部連合大会, A3-3 (2015-9)

#### 6. 研究組織

研究代表者

深見 正 (Fukami, Tadashi)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号: 60247434