

令和 4 年 4 月 15 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04359

研究課題名(和文) 磁束変調原理を利用したEV向け可変磁束永久磁石モータの開発

研究課題名(英文) Development of a Variable-Flux Permanent Magnet Motor for EVs Using Flux Modulation Principle

研究代表者

深見 正 (Tadashi, Fukami)

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：磁束変調ハイブリッドモータ(FHM)と名付けた新しいタイプの可変磁束永久磁石モータを開発した。FHMは、電機子と界磁極の二つの固定子と、鉄片を組み込んだ一つの回転子からなる。界磁極は永久磁石と電磁石から構成され、界磁電流により主磁束が調整できる。本研究では、0.8kWのプロトタイプ機を製作し、実験と三次元有限要素解析(3-D FEA)により、FHMの原理の有効性を確認した。また、二つの固定子の相対位置が機器定数に与える影響を3-D FEAにより明らかにした。これらの結果は、FHMとその制御システムの設計に有用である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、磁極から出る磁束を変化させ運転範囲を拡大できる新構造の永久磁石モータを開発し、その原理と設計法を与えている。EV向けトラクションモータの高効率化に寄与し、カーボンニュートラル実現に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：A new type of variable-flux permanent magnet motor, called the flux-modulating hybrid field motor (FHM), has been developed. The FHM consists of two stators (the armature and field poles) and one rotor incorporating iron pieces. The field poles comprise permanent magnets and electromagnets, and the magnetic flux of the electromagnets can be adjusted by changing the field current. In this study, a 0.8 kW prototype machine was fabricated, and the validity of the FHM's principle was confirmed through experiments and 3-D finite element analysis (3-D FEA). The influence of the relative position of the two stators on the machine constants was also clarified by 3-D FEA. These findings are useful for future designs of FHMs and their control systems.

研究分野：電気機器

キーワード：回転機 モータ 電気自動車

1. 研究開始当初の背景

(1) 現状：カーボンニュートラル実現に向けて、世界的に電気自動車（EV）の普及機運が高まっている。EV用主機モータは、EVの心臓ともいえ、その効率を向上すれば、直ちにEVの性能向上につながる。同モータでは、始動時や登坂時の低速・高トルクの状態から高速道路を巡航する際の高速・低トルクの状態まで、どの運転領域でも効率の高いことが求められる⁽¹⁾。

(2) 課題：現在、EV用主機モータには、界磁極（磁極）にネオジウム磁石を用いた永久磁石モータの研究・開発が主流である。同モータでは、ネオジウム磁石の強い磁力を活用して低速時に高いトルクが得られる。しかし、この磁力は、平坦な道路を走行する際の常用運転時には必要以上に強い。このため、無駄な電力を消費する。また、高速運転時にはモータの端子電圧が高くなり、これを抑えようとするとう効率が悪化する。一般に、永久磁石は固定磁力であり、磁束を変化できないので、モータの設計上、前述の特性を満足するのはなかなか難しい。最近、こうした永久磁石モータの課題に対して、モータ構造を改良する動きが活発化している⁽¹⁾。ここで、技術課題の根底となるのは、回転速度に応じて界磁極から発生する磁束を変化させることにある。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者が独自に検討してきた「磁束変調原理」⁽²⁾を利用して、Fig. 1に示すように界磁極を固定子に配置し、これに設けた電磁石によって回転速度に応じて磁束が変化できる、新原理/新構造の可変磁束永久磁石モータを開発する。併せて、その原理の有効性と設計に有用な指針を得る。

以降、開発するモータを「磁束変調ハイブリッド界磁モータ（FHM）」と呼称する。

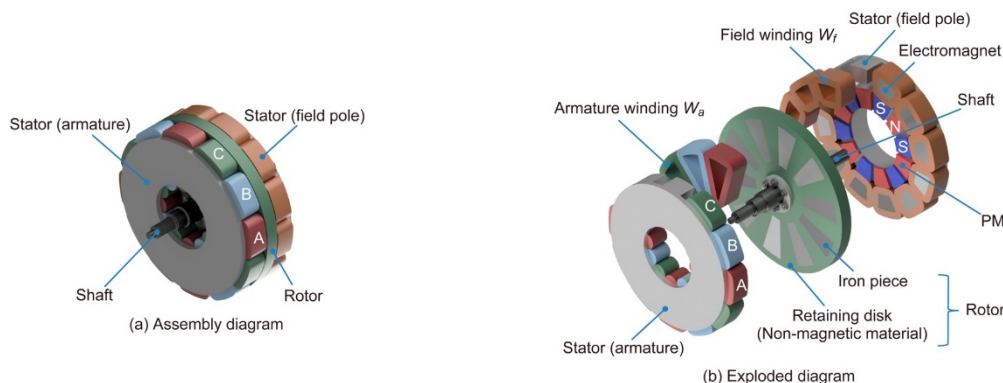


Fig. 1. Basic structure of the FHM.

3. 研究の方法

(1) 開発するFHMの実験機を製作して、その原理の有効性を実験と三次元有限要素解析（3-D FEA）により確認する。

(2) 電機子と界磁極の二つの固定子の相対位置（相対角）が機器定数（鎖交磁束とインダクタンス）に与える影響を3-D FEAにより明らかにする。

4. 研究成果

(1) FHMの実験機を製作して、次の成果を得た。

① 実験機の製作：Figs. 2-3に、製作した実験機の構造と写真を示す。実験機は、極数20、連続定格で出力0.8 kW、基底速度/最高速度 $900/2700 \text{ min}^{-1}$ である。また、実験機は空冷であり、特別な冷却装置を設けていない。このため、電機子巻線 W_a 及び界磁巻線 W_f の最大電流密度は連続定格で 5 A/mm^2 とし、電機子電流ベクトルの大きさ I_a は 13.9 A 、界磁電流 I_f は 4 A とした。固定子鉄心及び回転子鉄片は電磁鋼板を使用し、これらは軸を中心にバームクーヘン状に積層した。鉄片の保持ディスクには強度確保のためにステンレス材を使用し、保持ディスクの両面を樹脂製のカバーで覆って鉄片の保持を確実にした。永久磁石（PM）にはネオジウム磁石を用いた。

② 実験結果（紙面の制約上、3-D FEAの結果は省略する）：Fig. 4に、実験機の数値制御特性の一例を示す。実験では、基底速度 $N = 900 \text{ min}^{-1}$ まで I_a を 13.9 A 、 I_f を 4 A 、 d 軸電流 i_d を 0 A 一定とすることで定トルク運転を行った。また、基底速度から最高速度 $N = 2700 \text{ min}^{-1}$ までは、線間電圧 V_l が 150 V 一定となるように I_a 、電流位相 β 及び I_f を調整し、最大出力で定出力運転を行った。Fig. 4から明らかなように、基底速度まで定トルク運転、基底速度以上で V_l の上昇を抑えながら定出力運転をすることができる。これにより、製作した実験機が設計通りに動作することを確認した。

Fig. 5に、 $N = 1800 \text{ min}^{-1}$ における実験機の効率特性の一例を示す。Fig. 5から、トルク T に合わせて I_f を変化させると、 I_f 一定の場合に比べて、低トルク領域で効率 η が改善していること

分かる。これにより、FHMの界磁調整機能の有効性を確認した。

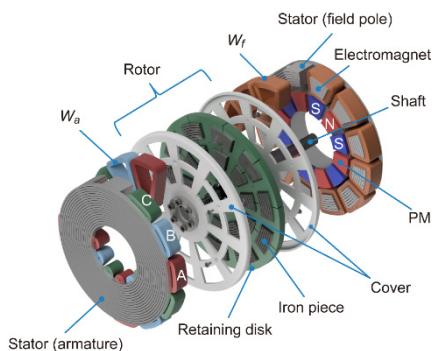


Fig. 2. Structure of the prototype machine.

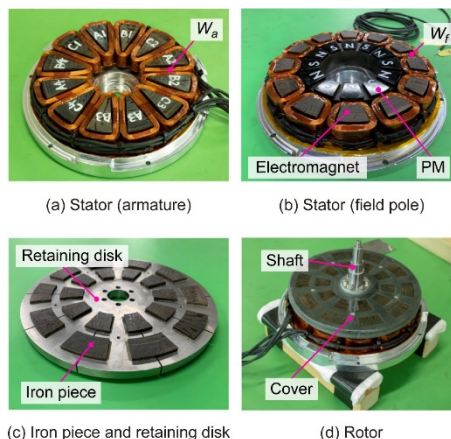


Fig. 3. Photographs of the prototype machine.

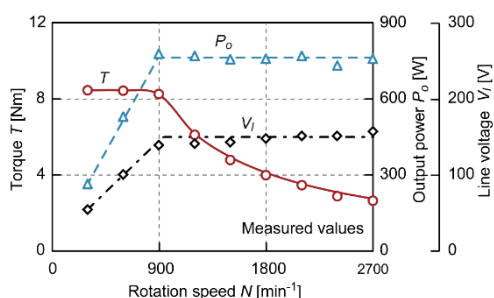


Fig. 4. Speed control characteristics.

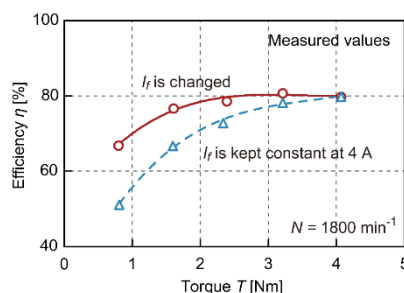


Fig. 5. Efficiency characteristics.

(2) 電機子と界磁極の二つの固定子の相対角が機器定数（鎖交磁束とインダクタンス）に与える影響を検討し、次の成果を得た。

① 電機子巻線 W_a の d 軸鎖交磁束 Ψ_{df} : Fig. 6 に、 W_a 開放時の Ψ_{df} (q 軸電流 $i_q=0$, I_f) に及ぼす電機子と界磁極の相対角 α の影響を示す。Fig. 6 から分かるように、 α を大きくすると、 $\Psi_{df}(0, I_f)$ が増加する。したがって、界磁極による W_a の d 軸鎖交磁束は、相対角を最大値にすると、最大になることが判明した。

② 電機子巻線 W_a の d , q 軸自己インダクタンス L_d , L_q : Fig. 7 に、 $L_d(i_d, i_q=13.9, I_f=4)$ に及ぼす α の影響を示す。Fig. 7 から、 $L_d(i_d, 13.9, 4)$ は、 α に対して変化しないことが分かる。また、 L_q についても α にほとんど依存しないことが判明した。

これらの結果は、FHMとその制御システム的设计に有用である。

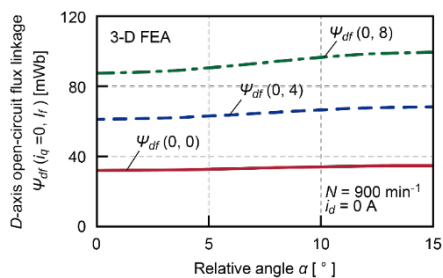


Fig. 6. Effect of relative angle on d -axis open-circuit flux linkage.

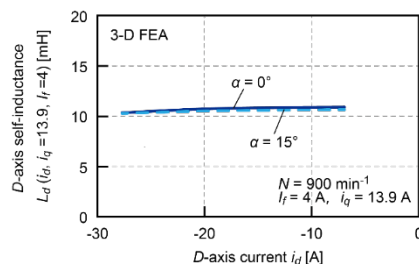


Fig. 7. Effect of relative angle on d -axis inductance.

<引用文献>

- (1) H. Yang, Z. Q. Zhu, H. Lin, and W. Chu, "Flux Adjustable Permanent Magnet Machines: A Technology Status Review," *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 14-30 (2016)
- (2) 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 Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 6, pp. 2583-2591 (2012)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hongo Kazuki, Fukami Tadashi, Koyama Masato, Mitsuda Hiroshi, Ito Kazumasa	4. 巻 141
2. 論文標題 Machine Parameters of Flux-Modulating Hybrid Field Motors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 431 ~ 437
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.141.431	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jike Naoya, Fukami Tadashi, Koyama Masato, Mitsuda Hiroshi, Ito Kazumasa, Yamada Masaki	4. 巻 140
2. 論文標題 Principle and Basic Characteristics of a Flux-Modulating Hybrid Field Motor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 542 ~ 549
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.140.542	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 本郷和樹・深見正・小山正人・満田宇宙・伊藤一将・山田正樹
2. 発表標題 磁束変調ハイブリッド界磁モータのd,q軸モデルに関する考察
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺家尚哉・深見正・小山正人・満田宇宙・山田正樹
2. 発表標題 磁束変調ハイブリッド界磁モータにおける回転子渦電流損の低減
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺家尚哉・深見正・小山正人・満田宇宙・伊藤一将・山田正樹
2. 発表標題 磁束変調ハイブリッド界磁モータの実機検証
3. 学会等名 電気学会回転機研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関