

令和元年6月17日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06244

研究課題名(和文) EV/HEV向け脱レアアース高トルク磁束変調同期モータの開発

研究課題名(英文) Development of a Rare-Earth-Free, Flux-Modulating Synchronous Motor With High Torque Density for Electric and Hybrid 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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、EV/HEV向けの新しいトラクションモータとして、高価な永久磁石を使用しない磁束変調同期モータを検討した。主な結果は、次のとおりである。(1)突極形の回転子にオフセットを設けると、逆起電力に含まれる高調波成分が抑制され、コギングトルク及びトルク脈動が低減できる。(2)回転子を従来の突極形からフラックスバリア形あるいはセグメント形に変更しても、トルク密度はほとんど変わらない。(3)外転型の構成では、内転型の構成に比べて高いトルクが得られる。加えて、外転型の構成することで、固定子分割型の構成とほぼ同じトルク密度を得ながら、損失を低減し、効率が向上できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、高価な永久磁石を使用した既存の永久磁石同期モータとは異なる新構造のEV/HEV向けトラクションモータを開発し、その設計法を与えるものである。これにより、より低コストのEV/HEV向けトラクションモータを実現し、地球規模の環境・エネルギー問題の解決に貢献しようというものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, design methods of flux-modulating synchronous motors without using expensive permanent magnets were explored as new types of traction motors for electric vehicles (EVs) and hybrid EVs. The main results are as follows. 1) By setting an offset on the salient-pole rotor, it is possible to suppress the harmonics in the back-EMF waveform and reduce the cogging torque and torque pulsation. 2) Even if the rotor design is changed from the salient-pole type to the flux-barrier type or segment type, their torque densities are almost the same. 3) In the outer-rotor configuration, a high torque can be obtained by effectively utilizing the inner space as compared with the inner-rotor configuration. In addition, the outer-rotor configuration makes it easy to reduce the losses and improve the efficiency while obtaining nearly the same torque density as that of the partitioned-stator configuration.

研究分野：電気機器

キーワード：回転機 モータ 電気自動車 ハイブリッド電気自動車

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 電気自動車 (EV) / ハイブリッド EV (HEV) 駆動用モータの現状と問題点： 現在、EV/HEV は、環境負荷低減と省エネルギー対策に欠かせないものとなっている。これらの動力源には、レアアース材を使った永久磁石同期モータが広く使われている⁽¹⁾。しかし、同モータは、主磁束が永久磁石の特性によってほぼ一定に保たれるため、高速回転域になると巻線の誘導起電力が高くなり、広範囲の速度制御に対して必ずしも有利とは言えない⁽²⁾。また、レアアース材は、地球上に偏在するため、資源的なリスクも高い。このような観点から、近年、レアアース永久磁石を一切使わない脱レアアースモータの開発が、極めて重要な課題となっている⁽³⁾⁽⁴⁾。

(2) 応募者のこれまでの研究成果： 研究代表者は、これまでに永久磁石を使わない新原理/新構造の同期モータとして、「磁束変調同期モータ (FMSM)」を考案し、実験機を用いて、その原理とトルクの発生メカニズムなどを明らかにしてきた^{(5)~(7)}。

2. 研究の目的

本研究では、磁束変調同期モータの性能（特に、トルク）を高める設計法の構築を目的に、有限要素解析 (FEA) を用いて、同モータの (1) 回転子設計 (形状, 種類) の変更ならびに (2) モータ構成の変更が特性に与える影響を調べた。

3. 研究の方法

Fig. 1 に、解析対象とした磁束変調同期モータを示す。Table 1 は、その諸元である。本研究では、このモータをベンチマークに選び、次の事項を検討した。

(1) 回転子設計 (形状, 種類) の変更：
 ① 回転子にオフセットを設ける、
 ② 回転子の突極部にダンパ巻線を装着する、
 ③ 回転子を従来の突極形からフラックスバリア形及びセグメント形に変更する。

(2) モータ構成の変更： ① 従来の内転型から固定子分割型 (電機子巻線と界磁巻線とを別々の固定子に設けた構成) 及び外転型に変更する。② 従来のラジアルギャップ型からアキシアルギャップ型に変更する。

4. 研究成果

(1) 回転子設計 (形状, 種類) の変更に関して、次の結果が得られた。

① 回転子に Fig. 2 のようにオフセットを設けると、逆起電力の全高調波ひずみ率 (THD) 及びコギングトルクの低減にきわめて有効なことが判明した。Fig. 3 に、その効果の一例を示す。

② 回転子突極部へのダンパ巻線の装着を検討した。その結果、同モータでは、電機子巻線が集中巻であるため、これによる起磁力高調波 (特に第 2 空間高調波) の影響でダンパ巻線に不必要な電流が流れ、所望の特性が得られないことがわかった。

③ 回転子を Fig. 4 のフラックスバリア

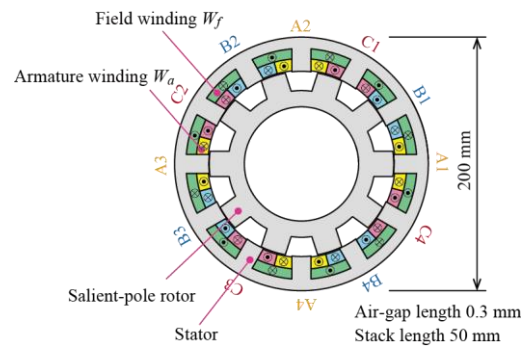


Fig. 1. Inner-rotor FMSM (salient-pole type).

Table 1. Winding specifications of the inner-rotor FMSM.

Parameter	Value
Number of series turns per phase for W_a	212
Number of turns for W_f	1140
Per-phase resistance of W_a at 75 °C [Ω]	0.696
Resistance of W_f at 75 °C [Ω]	6.92
Conductor diameter of W_a [mm]	1.2
Conductor diameter of W_f [mm]	0.9
Slot-fill factor [%]	50

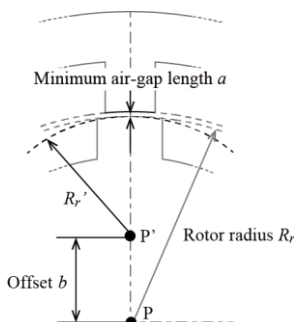


Fig. 2. Salient-pole rotor with an offset.

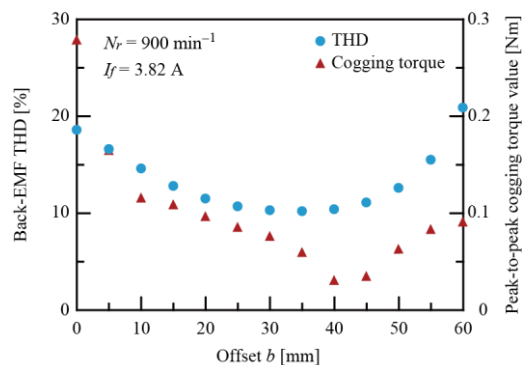


Fig. 3. Back-EMF THD and peak-to-peak cogging torque value.

形及び Fig. 5 のセグメント形に変更して特性を検討したところ、いずれの回転子も、トルクは Fig. 1 に示した単純な突極回転子のものとほぼ同等となり、トルクの向上が望めないことが判明した。

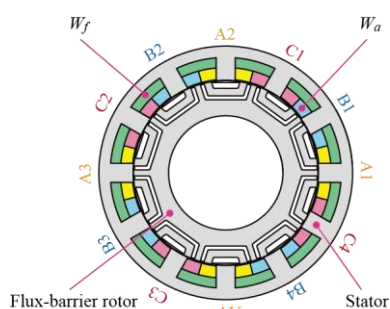


Fig. 4. Inner-rotor FMSM (flux-barrier type).

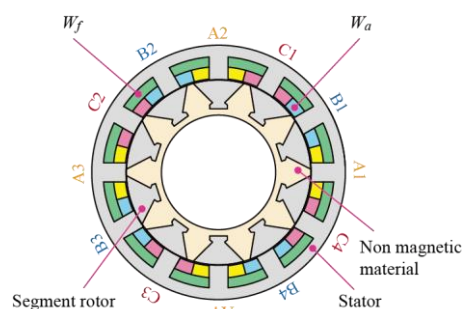


Fig. 5. Inner-rotor FMSM (segment type).

(2) モータ構成の変更に関して、次の結果が得られた。

① Fig. 6 の固定子分割型及び Fig. 7 の外転型の構成を検討した結果、いずれの構成も、Fig. 1 に示した従来の内転型のものに比べて、モータの内部空間を有効に活用することができ、スロット面積が拡大して、高トルク化できることがわかった。Fig. 8 は、これらの結果の一例である。加えて、外転型にすると、固定子分割型に比べて、構成が簡単なだけでなく、損失の低減と効率の向上に有効であることも判明した。

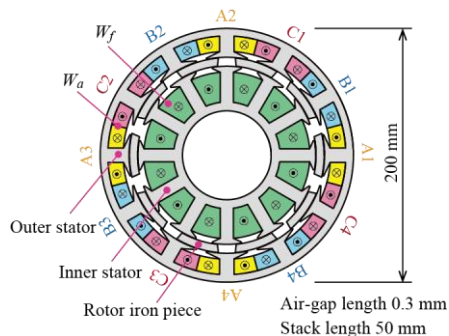


Fig. 6. Partitioned-stator FMSM.

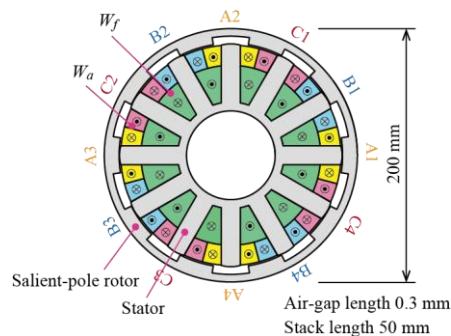


Fig. 7. Outer-rotor FMSM.

② Fig. 1 に示した従来のラジアルギャップ型からアキシヤルギャップ型に変更して特性を検討した結果、コギングトルク及び負荷時のトルク脈動がやや増加するものの、電機子巻線及び界磁巻線の量を効果的に増加することができ、平均トルクを向上できることがわかった。ただし、アキシヤルギャップ型にすると、コアに電磁鋼板を使用する場合、その積層方向をバームクーヘン状にする必要がある。このため、形成方法がやや厄介になる。圧粉コアの適用も考えられるが、小形のものに限られるなど、製作上の課題もある。

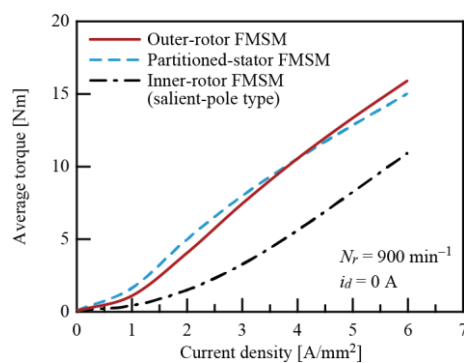


Fig. 8. Torque-current curves.

<引用文献>

- (1) 大熊 繁・高橋 久：「～HEV, EV 化に向けた～ 車載用モータとその制御・応用」, 技術図書, WS No. 261, pp. 65-67 (2009)
- (2) 堀 洋一・寺谷達夫・正木良三：「自動車用モータ技術」, 日刊工業新聞社, p. 10 (2003)
- (3) 森本茂雄：「モータ技術の動向と展望」, *Panasonic Technical Journal*, Vol. 55, No.3, pp. 4-9 (2009)
- (4) 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, p. II (2013)
- (5) T. Fukami, Y. Matsuura, K. Shima, M. Momiyama, and M. Kawamura, "Development of a low-speed multi-pole synchronous machine with a field winding on the stator side," in *Proc. International Conference on Electrical Machines (ICEM 2010)*, Rome, Italy, RF-006335, pp. 1-6 (2010)
- (6) 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, Jun. (2012)
- (7) T. Fukami, H. Aok, K. Shima, M. Momiyama, and M. Kawamura, "Assessment of core losses in a flux-modulating synchronous machine," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 2, pp. 603-611, Mar./Apr. (2012)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① 八倉巻 祐亮, 深見 正:「磁束変調同期モータの解析」, 電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), 査読有, 138 巻, 2018, 831-838
<https://doi.org/10.1541/ieejias.138.831>

〔学会発表〕（計 4 件）

- ① 八倉巻祐亮, 深見 正, 島 和男:「磁束変調同期モータにおける回転子のオフセットがトルク脈動に及ぼす影」, 平成 28 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 福井, 2016 年 9 月 13 日
② 後藤善克, 小山正人, 深見 正:「磁束変調同期モータの銅損を最小にする速度制御法の提案」, 平成 28 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 福井, 2016 年 9 月 13 日
③ 八倉巻祐亮, 深見 正:「固定子分割型および外転型磁束変調同期モータの特性比較」, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, 函館, 2017 年 8 月 29 日
④ 葭田 俊, 深見 正:「磁束変調巻線界磁モータの効率マップ作成」, 平成 30 年度学生による研究発表会, 富山, 2019 年 3 月 2 日

6. 研究組織

研究代表者氏名：深見 正

ローマ字氏名：(Fukami, tadashi)

所属研究機関名：金沢工業大学

部局名：工学部

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：60247434