

磁性線材と磁性薄帯を適用したシングルステータ ダブルアキシアルギャップ PM モータの検討

宇佐美和明* , 野口季彦 (静岡大学)

Study on Single-Stator Double-Axial-Gap PM Motor Using Ferromagnetic Wires and Electromagnetic Steel Sheets
Kazuaki Usami*, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. はじめに

筆者らは Fig. 1 のようなシングルステータダブルアキシアルギャップ PM モータのコア材料と構造について検討してきた。このようなモータは磁路が三次元となるため、一般的に磁性材料として SMC (Soft Magnetic Composite) が用いられている。しかし、SMC は電気絶縁被覆を施した磁性鉄粉の製造に高度な技術を必要とするため、一般に高価でコア製造時に大型プレス機も必要とする。そこで、シングルステータダブルアキシアルギャップ PM モータのステータ内磁束が軸方向に交番することとロータ内の磁束方向に着目し、針状の磁性線材を用いたステータコアと渦状に磁性薄帯を巻いたロータコアを有するモータ構造を提案する。本稿では、同一構造同一寸法のモータに提案した構造を適用し、運転特性に与える影響を検討したので報告する。

2. ステータコアとロータコアの構造

(2-1) 渦電流経路

Fig. 2 に針状の磁性線材を用いたステータコア断面を示す。ここで検討するダブルアキシアルギャップ PM モータの磁束は中央に置かれたステータコアを軸方向に流れるため、交番磁界によって発生する渦電流はコア断面を環状に流れる。ステータコアが導電性のブロック材の場合はその最外周を渦電流が流れる。電気絶縁被覆を施した磁性線材を結束してステータコアに適用した場合は、それぞれの磁性線材の断面に沿って渦電流が流れる。SMC を利用した場合は磁性粉粒中に渦電流が流れ、いずれの場合も鉄損としてモータの効率を劣化させる大きな要因となる。Fig. 3 に磁性薄帯を渦状に巻いて作成したロータコアを示す。ロータコア内部は理想的には磁石磁束による直流磁界のみであるため渦電流は流れないが、実際には電気子磁束により交番磁界が重畳するため渦電流が生じる。そのため、磁性薄帯を用いて渦電流経路を小さくすることで渦電流損の低減を図る。図は渦状のコア構造を明確にするため厚さを誇張している。実際にロータコアに用いる磁性薄帯は 25~500 μm の厚さとする。

(2-2) 渦電流の低減方法

渦電流の低減には渦電流経路を小さくすることが有効

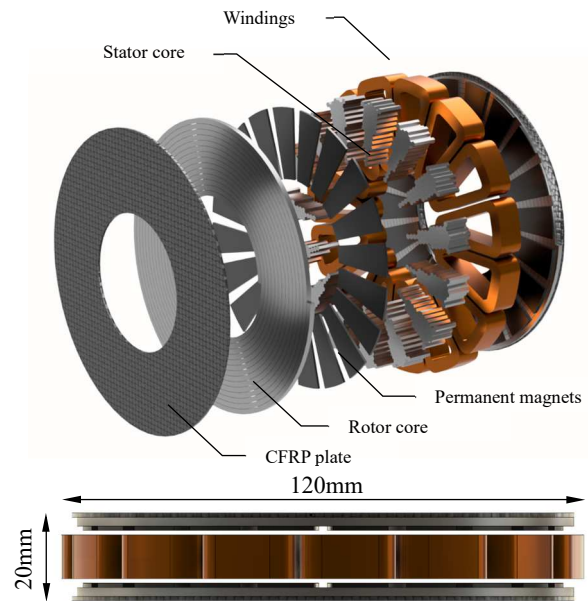


Fig. 1. Overview of investigated motor.

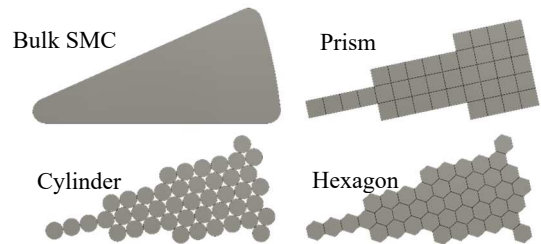


Fig. 2. Stator core structures.

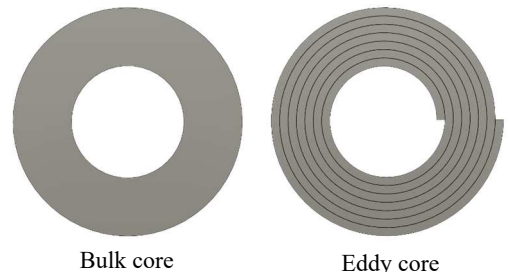


Fig. 3. Rotor core structures.

である。表面が電氣的に絶縁された線材を束ねることによりステータコアを形成し、コア断面積を小さくすることで渦電流損を低減できる。一方、ロータコアの渦電流損を低減するには、磁性薄帯の厚さを小さくすることが有効である。

3. 三次元電磁界解析の諸条件

電磁界解析ソフト JMAG Designer 18.1™ を用いて解析を行った。前述の Fig. 1 が解析対象とするモータの全磁気回路である。解析対象の磁気回路直径は 120 mm、厚さは 20 mm、出力は 1 kW とし、スロットコンビネーションとして 15s20p を採用した。q 軸のみに通電し、電流は 5.0 A/phase、回転数は 3000 r/min とする。また、永久磁石は N46MH-MF (信越化学) で、常温を想定して解析を行った。

基準となるモータは Hogan 700HR 5P (SMC) をロータコアとステータコアに用いたモデルである。提案するモータはステータコアの構造が 3 種類 (円柱 1.0mm 72.9%、角柱 1.0m 79.3%、六角柱 1.0mm 79.7%) とステータコアの材料を 2 種類 (JFE スチール 50JN230 電磁鋼板、日立金属 YEP-BX パーマロイ) の計 6 モデルで解析した。また、ロータコアには渦状に加工した 50JN230 を用いている。ステータコアが占める空間における磁性材料の占積率は括弧内の%で示した。解析メッシュについては十分な事前検討を行って、必要な解析精度が得られるメッシュサイズを採用し、1 モデルあたり 100~200 万要素としている。

4. 解析結果

4.1 トルク特性

Fig. 4 に平均トルク特性を示す。基準モータのトルクが 3.41Nm で磁性線材を用いたモータは 3.28Nm 前後である。磁性線材で構成したステータコアの占積率は 80%程度であるが、基準モータと比較して 96%のトルクが得られる。

4.2 渦電流損

Fig. 5 にステータコアとロータコアに生じる渦電流損を示す。 $t = 0.5 \text{ mm}$ の電磁鋼板相当の磁性線材を用いたステータコアは基準モータのステータコアと比較して約 7 倍の渦電流損が生じる。一方、基準モータのロータコアで生じる渦電流損は 7.11W、渦状構造のロータコアで生じる渦電流損は 20.7W であった。

4.3 ヒステリシス損

Fig. 6 にステータコアで生じるヒステリシス損を示す。磁性線材を用いたステータコアは基準モータよりもヒステリシス損が大幅に抑制されていることがわかる。特に YEP-BX を用いた場合は 1/10 以下に低減している。基準モータのロータコアで生じるヒステリシス損は 5.07W、渦状構造のロータコアで生じるヒステリシス損は 1.26W であった。

5. まとめ

本稿では針状の磁性線材を用いたステータコアと渦状の磁性薄帯を用いたロータコアで構成したシングルステータダブルアキシヤルギャップ PM モータを検討し、トルク特性と各部に生じる損失を比較評価した。電磁鋼板を打

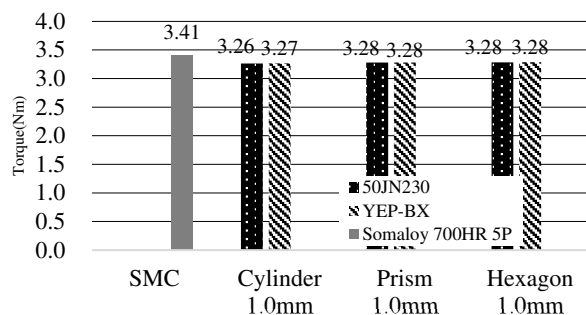


Fig. 4. Average torque comparison.

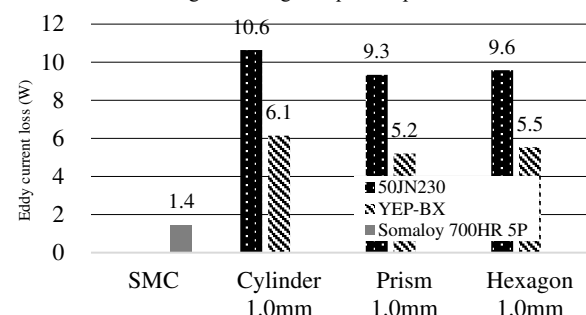


Fig. 5. Eddy current losses of stator core and rotor core.

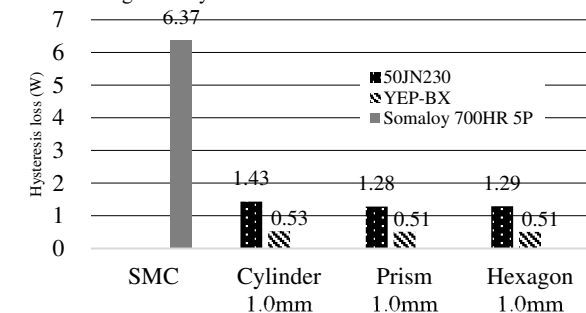


Fig. 6. Hysteresis losses of stator core and rotor core.

ち抜いてコアを製造する場合、廃棄物が多く発生する。針状の磁性線材や渦状の磁性薄帯は切断と曲げ加工のみで製造できるため理想的には廃棄物を無くすることができ、製造コストの低減につながる。本稿では解析時間の観点から $\phi 1.0 \text{ mm}$ の磁性線材と $t = 0.5 \text{ mm}$ の電磁鋼板を用いて解析を行ったが、 $\phi 0.5 \text{ mm}$ の磁性線材と厚さ $t = 0.2 \text{ mm}$ の電磁鋼板を用いることにより更なる占積率向上と渦電流損の低減を図ることができる。理論的には、ステータコアとロータコアで生じる渦電流損は 5.96W となり、SMC を用いた場合の 8.51W を下回る。また、渦状構造のロータコアは磁気特性に優れたアモルファス薄帯を用いることができるため、更なる高周波駆動にも適用することが可能である。

文献

- (1) K.Takishima, K.Sakai, "Starting Characteristics of Axial and Radial Type Ultra-Lightweight Motors Based on Magnetic Resonance Coupling," *IEEE J. Industry Applications*, vol. 8, no. 3, pp. 471-479 (2019).
- (2) 榎本・王・正木・相馬: 「鉄基アモルファス鉄心を適用したアキシヤルギャップモータの大容量化」日本 AEM 学会誌, Vol. 21, No.2 (2013)
- (3) 三浦・茅野・竹本・小笠原: 「次世代ハイブリッド自動車用フェライト磁石アキシヤルギャップモータの提案」半導体電力変換研究会, Vol.149, No. SPC-09-159, pp. 59-64 (2009)