

車載用高トルク密度アキシアルギャップ PM モータの 損失要因と高効率化

服部 晃尚^{*a)} 山田 洋次 横山 誠也 (アスモ株式会社)
神山 博夢 野口 季彦 (静岡大学)

Loss Analysis and Efficiency Enhancement of High-Torque Density Axial-Gap PM Motor for Automotive Applications

Akihisa Hattori^{*}, Yoji Yamada, Seiya Yokoyama (ASMO Co, Ltd)
Hiromu Kamiyama, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

キーワード：アキシアルギャップ，モータ，鉄損，渦電流損，効率，フェライト磁石

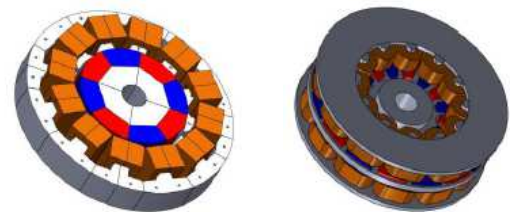
Keywords : Axial-gap, motor, iron loss, eddy-current loss, efficiency, ferrite magnet

1. まえがき

近年、アキシアルギャップ形 PM モータの研究が活発に行われている⁽¹⁾。特にパンケーキ形モータの場合、ラジアルギャップ形に比べ、アキシアルギャップ形はトルク発生面が大きいので、高トルク密度化が期待できる。車載用小形モータにおいては、減速機を含む回転機構を小型化でき、車両の軽量化と燃費の改善が可能となる。自動車の燃費改善による CO₂ 排出量削減のため、車載用モータの高効率化は重要な課題である⁽²⁾。著者らは、これまでにダブルステータアキシアルギャップ形 PM モータを試作し、ベンチマークモータに対し、同一電流密度で 2.1 倍のトルクを出力できることを実機検証にて明らかにした⁽³⁾。しかし、その損失要因と効率特性に関しては明らかにしていない。そこで、本稿では高トルク密度アキシアルギャップ形 PM モータの効率測定結果と損失要因分析に加え、損失低減策について検討したので報告する。

2. ベンチマークモータと提案モータの構造

図 1 に従来のラジアルギャップモータと検討対象であるダブルステータアキシアルギャップモータの構造を示す。提案モータは 16 極のロータをもち、その両側に 12 スロットを有するステータを配した 2 ステータ、1 ロータ方式のパンケーキ形両面アキシアルギャップ構造を採用している。このモータは三次元磁路を有するためステータコアは SMC を用いてバックヨークとティースを一体整形しており、ロータコアには S10C を用いている。なお、使用している磁石は両モータともフェライト磁石であり、提案モータの使用磁石量はベンチマークモータに対して 1.01 倍である。

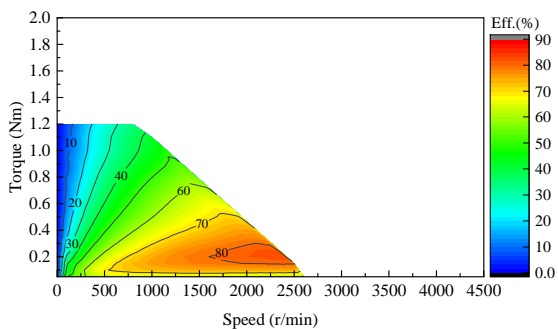


(a) Benchmark radial-gap motor. (b) Proposed axial-gap motor.

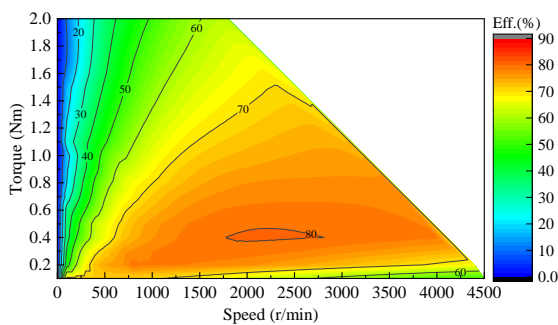
Fig. 1. Motor structures.

3. 三次元電磁界解析による性能予測

実機測定に先立って、有限要素法に基づく電磁界解析シミュレーションを行った。使用したソフトウェアは JMAG-Designer Ver. 14.1 である。図 2 に解析により求めたベンチマークモータと提案モータの効率マップを示す。ベンチマークモータの効率マップと比べ、提案モータは高効率領域が広いことがわかる。これは、提案モータの全損失に占める銅損の比率がベンチマークモータより小さく、逆に鉄損の割合が比較的大きいため、出力トルクの増大に応じほぼ二乗に比例する銅損の増加が緩やかなためである。したがって、銅損と鉄損が拮抗する高効率領域が広がる。これに対し、ベンチマークモータは銅損と鉄損の割合が逆転する領域が広く、出力トルクの増大とともに銅損が急激に増加するため効率特性が先鋭化する。また、ベンチマークモータの解析における最大効率は 85 % (@ $T = 0.2 \text{ Nm}$, $N = 2300 \text{ r/min}$) であるのに対し、提案モータの最大効率は 80 % (@ $T = 0.4 \text{ Nm}$, $N = 2300 \text{ r/min}$) であり、提案モータの最大効率がベンチマークモータに対して約 5 point 低いことがわかった。

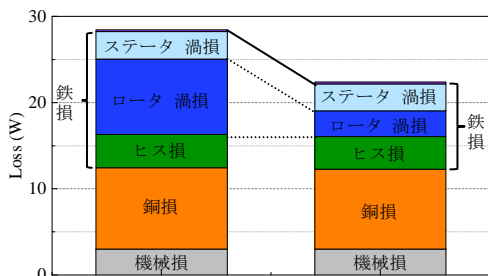


(a) Benchmark radial-gap motor.



(b) Proposed axial-gap motor.

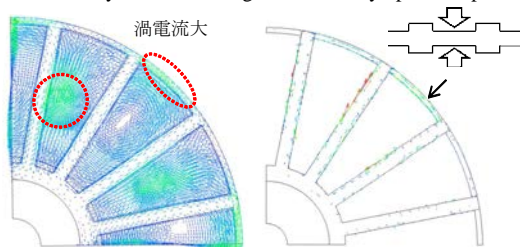
Fig. 2. Efficiency map (analysis).



(a) Proposed motor.

(b) Improved motor.

Fig. 3. Loss analysis results at highest-efficiency operation point.



(a) Proposed motor.

(b) Improved motor.

Fig. 4. Eddy current loss distribution at $\theta = 5.25$ deg (mech.).

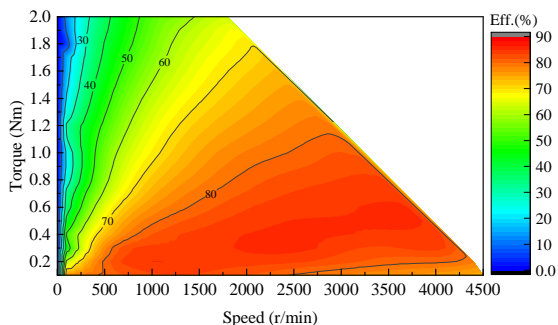


Fig. 5. Efficiency map (improved motor).

4. 実機による運転特性の検証

試作機を用いて種々の回転速度、電流密度で実負荷試験を行い効率を測定した。効率はモータの出力トルクおよび回転数より求めた平均動力と、モータへの平均入力電力から算出した。解析と実測値で効率マップを比較したところ、解析に対して低トルク領域の実測値が約 3 point 高い数値であったが、効率分布は同等の特性が得られた。

最高効率点における損失について、解析値をもとに要因別に分析した。図 3 (a) にトルク 0.4 Nm、回転数 2300 r/min (最高効率点) における損失割合を示す。機械損は実測の無負荷時トルクより算出した係数を用いて求めた。図 3 (a) より全損失中铁損の占める割合が 54 % と最も大きく、鉄損の中でもロータコアにおける渦電流損の割合が全損失比で 30 % と最大である。

5. 損失分布とその低減対策

〈5・1〉ロータ渦電流損の分布 図 4 (a) に試作モータのロータコアにおける渦電流損分布を示す。試作モータは巻線の界磁磁束がロータコアアキシヤル面に対して垂直に貫通するため、ロータコアに渦電流が流れる。特に、バックヨークとロータコア外周部における渦電流損が大きくなっている。

〈5・2〉ロータ渦電流損対策後の構造と効果 ロータコアにおける渦電流損が顕著であることが明らかになったので、ロータコアのバックヨークを除き、コア外周部を潰し加工することで、どの程度の損失低減が期待できるのかを解析的に検証した。図 3 (b) に対策後のトルク 0.4 Nm、回転数 2300 r/min における損失割合を示す。図 4 (b) に対策後のロータコア渦電流損分布を示す。外周部を潰し加工することで、渦電流経路の一部の電気抵抗を大きくできるため、ロータコアに流れる渦電流が小さくなっていることがわかる。結果、ロータコアにおける渦電流損を 65 % 低減でき、効率を 4 % 改善できることがわかった。図 5 に対策後の効率マップを示す。このようにロータ渦電流損の対策を施すことにより、高効率領域をさらに拡大することができる。

6. まとめ

本稿では高トルク密度アキシヤルギャップ形 PM モータの効率測定と損失要因分析に加え、電磁界解析に基づく損失低減策を検討した。その結果、最高効率点における鉄損の主要因はロータコアの渦電流損であることを明らかにし、対策を施すことでそれを 65 % 低減 (効率+4 %) できることを示した。今後、更なる損失低減策を講じて実機検証により効果を確認していく。

文 献

- (1) 曾根広太, 他: 電学産大, Vol. 3, No.3-37 pp.193-198 (2012)
- (2) 水谷良治, 他: 電学論文誌, Vol.135, No.9 pp.884-891 (2015)
- (3) 李志剛, 他: 電学全大, Vol. 5, No.5-017 pp.29-30 (2016)