

車載用高トルク密度アキシアルギャップ PM モータの実機検証

李 志剛* 野口 季彦 神山 博夢 (静岡大学)
服部 晃尚 山田 洋次 横山 誠也 (アスモ株式会社)

Experimental Verification of High-Torque-Density Axial-Gap PM Motor for Automotive Applications
Zhigang Li, Toshihiko Noguchi, Hiromu Kamiyama (Shizuoka University)
Akihisa Hattori, Yoji Yamada, Seiya Yokoyama (ASMO Co, Ltd)

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⁾⁻⁽³⁾。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く、さらに平角銅線を使用することで占積率も高くなるため、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形化でき、車両の軽量化と燃費の改善が可能となる。そこで、本稿では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、その運転特性を実験検証したので報告する。

2. ベンチマークモデルと提案モデルの構造

Fig. 1 にベンチマークモデルを示す。ラジアルギャップ形 PM モータで 8 極 12 スロットとし、三相集中巻が施されている。ステータコアもロータコアも 0.5 mm 厚の電磁鋼板が使用されている。

Fig. 2 に示すように提案モデルは 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には SMC、ロータには S45C を用いている。また、車載用小形モータと言う用途からスペース的に余裕がないため、今回は作りやすさの観点から両ステータ巻線は並列接続されている。なお、ベンチマークモデルと提案モデルは同一直径、同程度の高さ（積厚）であり、ほぼ同じ体積のフェライト磁石を使用している。

3. 三次元電磁界解析による性能予測

実機検証に先立って、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。

Fig. 3 に規格化された 1000 r/min 時のトルク-電流密度特性を示す。ほぼ同じ体格のベンチマークモデルに比べ、提案モデルの方が 2.4 倍以上のトルクを出力できることがわかる。なお、最適設計されたベンチマークモデルの電流密度 20 A/mm²における限界出力トルクを規格化トルクの基準（黒点）として以後の議論を進める。

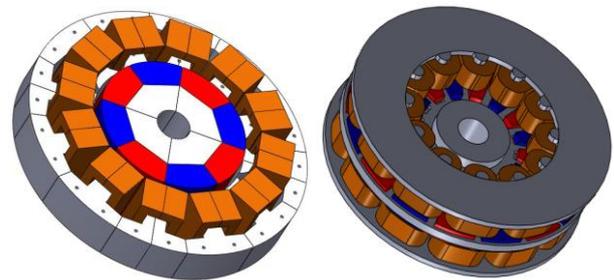


Fig. 1. Benchmark model.

Fig. 2. Proposed model.

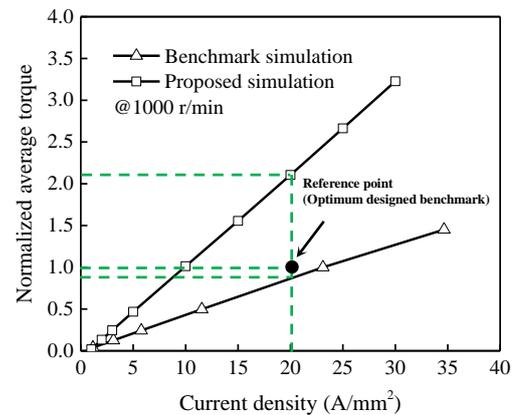


Fig. 3. Torque-current density characteristics (simulation).

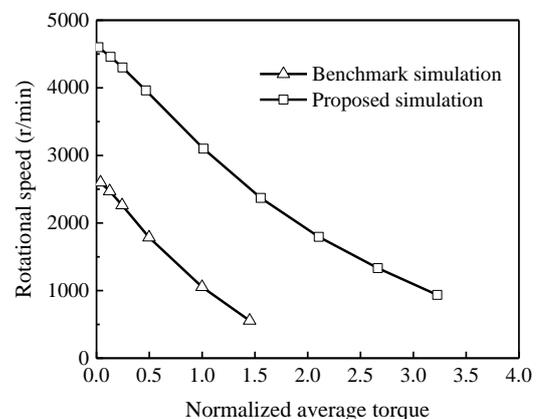


Fig. 4. Speed-torque characteristics (simulation).

Fig. 4 に規格化された回転速度-トルク特性を示す。提案モデルでは、両ステータの巻線が並列になっているため、ベンチマークモデルに比べ、同じ電流密度のときに高回転高トルク特性となっている。

なお、モータの性能をより精度良く予測できるように、ベンチマークモデルも提案モデルも三次元解析を行い、ケース、フレームエンド、接着剤などを考慮した。また、ベンチマークモデルに比べ提案モデルでは極数が倍であり、しかも電磁鋼板も使用しないため鉄損の増大が予想され、トルク低減の原因にもなるので、それらも考慮してシミュレーションを行った。

4. 試作機の概要

Fig. 5 に試作機のステータ及びロータを示す。SMC ステータコアは切削加工後に絶縁物でコーティングを行っている。ステータの内部空間を有効に利用するためベアリングを入れ、ケースやフレームエンドを含むモータ全体の高集積化を図った。ロータについては、トルク密度を上げるためにロータコアを極限まで薄くし、短絡磁束が発生する磁石極間ギャップには鉄リブを挿入してロータコアの強度を上げた。また、遠心力による磁石の飛び出しを防ぐために、外周にも鉄リブを設けて保護した。

5. 実機検証結果

Fig. 6 にベンチマークモデルと提案モデルの実機検証を行った結果として、規格化されたトルク-電流密度特性を示す。ベンチマークモデルも提案モデルも解析と実測の結果の乗離が 5% 以内となり、実測結果においても同じ電流密度のときに提案モデルの方が約 2 倍のトルクを出力できることを確認した。また、試作機においては、負荷側のエアギャップが設計値より 0.1 mm 小さくなり、反負荷側では 0.1 mm 大きくなったため、負荷側のトルク定数が解析値より大きくなり、反負荷側では小さくなるはずであるが、両方とも約 3%, 8% 低下した。これはベアリングが磁石に非常に近い位置にあるため、ベアリング経由でケースとフレームエンドへ磁束が漏れたためであると考えられる。

Fig. 7 に両実機の規格化された回転速度-トルク特性を示す。ベンチマークモデルも提案モデルも、解析と実測の結果が良く一致した。

Fig. 8 に試作機のトルクリブルを示す。電流密度 20 A/mm² において、リップル率が 5% 以内になっており、アキシアルギャップ形 PM モータで問題となるトルクリブルも十分に抑制することができた。

6. まとめ

本稿では、ほぼ同体格のベンチマークモデルに比べ、2.1 倍以上のトルクを出力できるアキシアルギャップ形 PM モータの実機検証を行った。

同じ電流密度で運転し、試作機はベンチマークモデルのおよそ 2 倍のトルクを出力できることを確認した。このとき実測と解析結果の乗離は 5% 以内であり、ほぼシミュレ

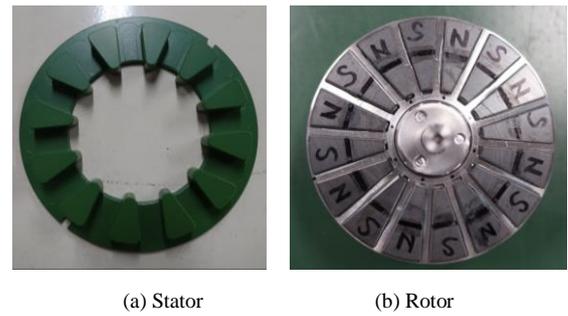


Fig. 5. Prototype machine.

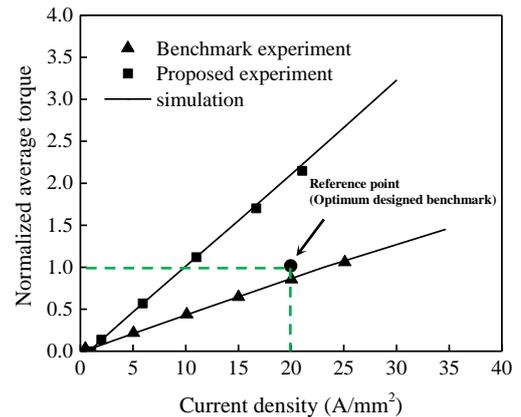


Fig. 6. Torque-current density characteristics (experiment).

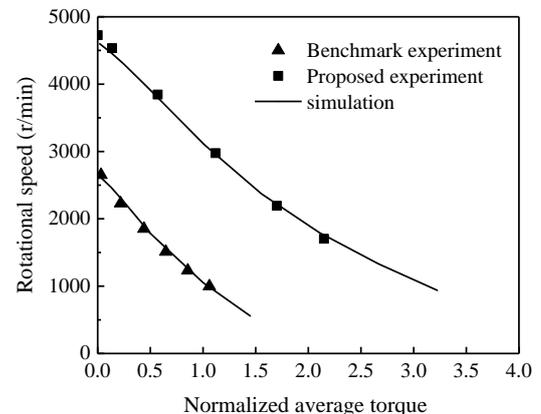


Fig. 7. Speed-torque characteristics (experiment).

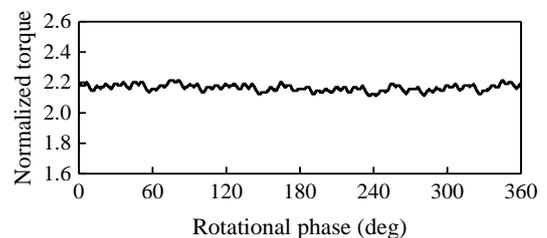


Fig. 8. Torque ripple (experiment).

ション通りの運転特性を試作機でも確認できた。また、トルクリブルも 5% 以内に抑制され、良好な運転特性を得ることができた。

文 献

- (1) 荒川俊史, 他: 電学産大, 3-45, pp.283-284 (2007)
- (2) 曾根広太, 他: 電学全大, 5-025, pp.42-43 (2012)
- (3) 青山・野口: 「空間高調波を界磁エネルギー源とするレアアースフリーモータの基礎検討」, H25 年度電学全大, no.5-051(2013)