

高トルク密度車載用扁平モータの開発

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

Development of High-Torque Density Pancake Motor for Automotive Applications

Hiromu Kamiyama, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University), Akihisa Hattori, Yoji Yamada, Seiya Yokoyama (ASMO Co., LTD.)

1. まえがき

近年, アキシタルギャップ形 PM モータの研究が活発に行われている⁽¹⁾⁽²⁾。特に扁平形状の場合, ラジアルギャップ形に比べ, アキシタルギャップ形はトルク発生面が多く, 高トルク密度化による小型化を期待できる。車載用補機モータでは軽量化による燃費改善と省スペース化による車両のコンパクト化, デザイン性向上に貢献する。そこで, 本稿ではダブルステータアキシタルギャップ形 PM モータの小型化に関して検討したので報告する。

2. 検討のための前提条件と目標

図 1(a)に示すベンチマークモデルのモータ体格は $\phi 80$ L62.5 であり, 8 極 12 スロットの希土類ボンド磁石を使った三相集中巻ラジアルギャップ形モータである。また, モータ駆動回路は図 1(b), 目標とする速度トルク特性は図 1(c)に示した通りである。ここで, R_{dc} は直流バス抵抗, R_{ac} はワイヤハーネス抵抗, η はインバータ効率とする。

表 1 に本モータの前提条件を示す。高トルク密度化を検討し, ベンチマークと同等の出力を維持しながら, 体積を半減することを目標とする。

3. 電気回路設計

大まかな電気回路設計は前提条件を基に行い, 電氣的に余裕をもった駆動電圧や電機子巻線仕様を求める。

<3.1> 電圧余裕の検討 まず, 回路の電圧降下と誘起電圧を許容できる駆動条件を検討する。線電流 I におけるモータ入力相電圧 V は下式によって求められる。

$$V = \frac{(V_{dc} - R_{dc}I/\sqrt{2})\eta}{\sqrt{6}} - R_{ac}I \quad (1)$$

また, トルク T と線間の速度起電力 E は次式で表される。

$$T = K_T I_q = K_T \sqrt{3}I \quad (2)$$

$$E = K_E \omega \quad (3)$$

このとき, $K_T = K_E$ が成り立つため, 目標最大トルク T_{max} と最大線電流 I_{max} から T_{max} を出力するために必要な誘起電圧定数 K_E が決まる。そこで, 次式により, I_{max} における相電圧余裕 V_{mgn} を求め, その結果を図 2(a)に示す。

$$V_{mgn} = V - \frac{E}{\sqrt{3}} = V - \frac{K_E \omega}{\sqrt{3}} = V - \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{T_{max}}{\sqrt{3}I_{max}} \omega \quad (4)$$

V_{mgn} は目標特性の中で E の影響の高い動作点①で最も厳しくなり, $I_{max} = 68A_{rms}$ 以上で有効な電圧を得ることができる。

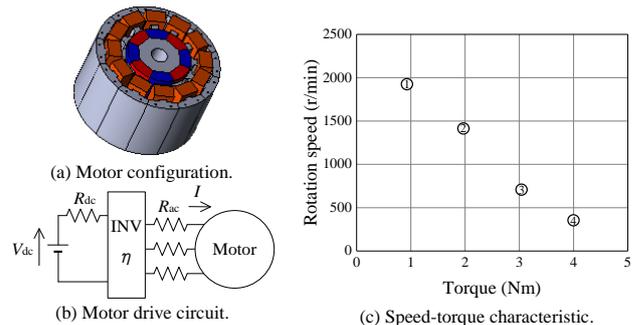


図 1 ベンチマークモデル

Fig. 1. Benchmark model.

表 1 前提条件

Table 1. Preconditions.

Motor outer diameter	80 mm
Supply voltage V_{dc}	11 V
Maximum current density	Less than $30 A_{rms}/mm^2$
Volume of magnet	Less than benchmark

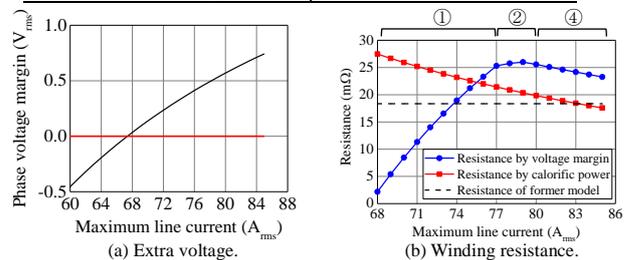


図 2 電気回路設計

Fig. 2. Electrical circuit design.

<3.2> 電機子巻線の検討 電機子巻線抵抗 R の電圧降下のみを考慮し V_{mgn} から R を求め, さらに駆動限界の発熱量からも R を求める。それらの式を以下に示す。

$$R = \frac{V_{mgn}}{I} \quad (5)$$

$$R = \frac{\text{Calorific Power}}{3I^2} \quad (6)$$

I における設計可能な R を図 2(b)に示す。 V_{mgn} から求めた R は, 図 2(b)に示すように各電流値において最も R が小さくなる動作点で計算している。破線は過去に設計したアキシタルギャップモータの抵抗値である⁽³⁾。回転数の低い動作点④は鉄損等の影響が少ないため, I_{max} を $80 \sim 84A_{rms}$ の範囲で設計することで V_{mgn} を維持できる。最大電流密度と上記の I_{max} の範囲から設計可能な巻線径を決める。ダブルステータの構造上, 上下で巻線を並列接続するため 2 並列と 4 並列を検討し, その結果, 巻線径を $\phi 0.95mm$ または

φ1.35mm に決定した。

4. 磁気回路設計

次に三次元電磁界解析ソフト JMAG-Designer Ver.15.1 を用いて磁気回路を検討する。トルクは次式で表せる。

$$T \propto P \Psi_a I \quad (7)$$

ここで、 Ψ_a は総磁束鎖交数であり、巻線係数やティース断面積、コイルターン数、磁石磁束によって決まる。これらの係数に影響を与えるパラメータについて検討する。

<4.1> スロットコンビネーションの検討

極数と巻線係数はスロットコンビネーションによってのみ決まる。図 3(a)に各スロットコンビネーションにおけるトルクを示す。他のパラメータに影響を与えないようにモータ全体としてのコイルターン数、磁石量、ティース断面積を一定にした。スロット断面積一定のため、スロット数の変化に合わせてスロット幅を調整したが、スロット幅の変更はティース外径の変更の余地を与える。よって、スロット数の異なるモデル同士の比較は行わず、適当なスロットコンビネーションを選ぶと 10p9s (10 極 9 スロット) , 14p12s, 16p15s が候補となる。

<4.2> スロット幅の検討

スロット幅の増加でコイルターン数は増加するが、ティース断面積は減少し磁石磁束の鎖交数は減少する。巻線径φ0.95 またはφ1.35 で製造可能なスロット幅で検討を行う。まず、各スロット幅におけるコイルターン数の割合を以下の式で求める。

$$N = \frac{S_n N_o}{P_n} \quad (8)$$

ここで、 S_n はスロット数、 N_o は単位高さあたりのコイルターン数、 P_n は巻線並列数である。また、磁石のオーバーハング量とアンペアターンを一定にし、スロット幅に対する規格化したコイルターン数とトルクを図 3(b)に、それらの積を図 3(c)に示す。その結果、14p12s のスロット幅 3.8mm で最大となった。磁石オーバーハング量一定のため、スロット幅が大きいかほど磁石量は少ない。

<4.3> 磁石形状の検討

磁石のオーバーハング量に対するトルクと、オーバーハング変化に対するトルク変化量/磁石変化量の関係を内径側と外径側について検討した。それぞれ図 3(d), (e)に示す。オーバーハング量に対してトルクは外径側で約 1.2 倍、内径側で約 1.1 倍の増加を見込める。また、使用可能な磁石量に制限があるので、内径側と外径側オーバーハングの優先順位を図(e)により決定する。

<4.4> 磁気回路の決定

これまで検討してきたパラメータから、大トルクを期待できる磁気回路を選択し、(スロットコンビネーション、巻線径、列数) で表す。磁石形状は磁石オーバーハング量の検討と使用可能な磁石量から求める。解析結果の比較を図 3(f)に示す。この結果、14p12s で巻線径φ0.95mm、列数 3 でトルクが最大となることがわかった。しかし、目標トルクは未達のため、軸長を伸ばして微

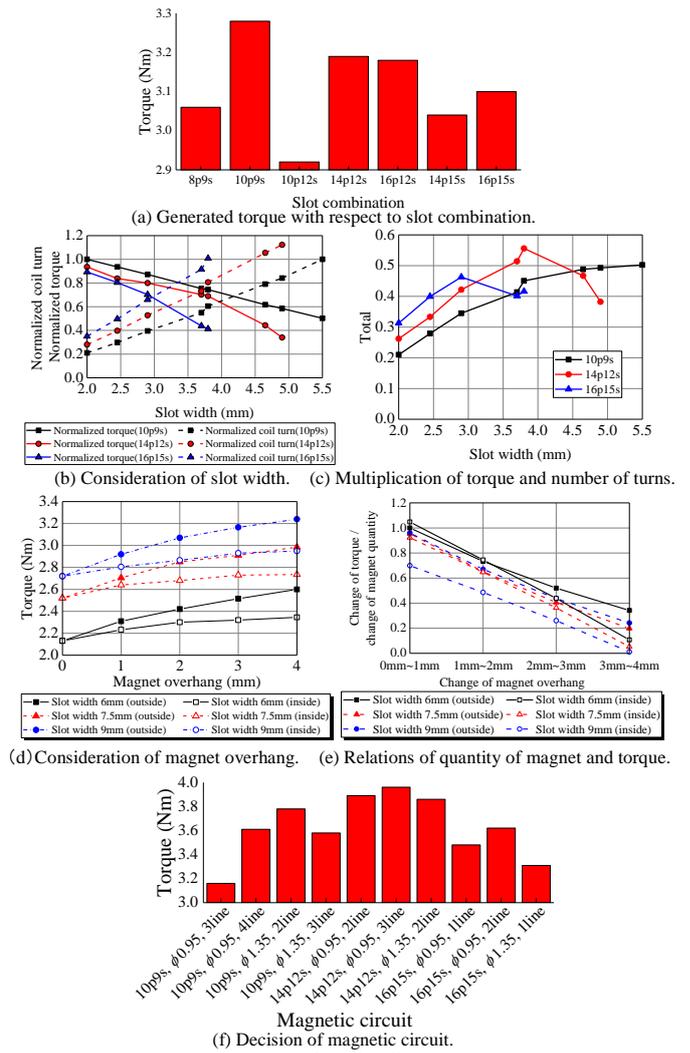


図 3 磁気回路設計

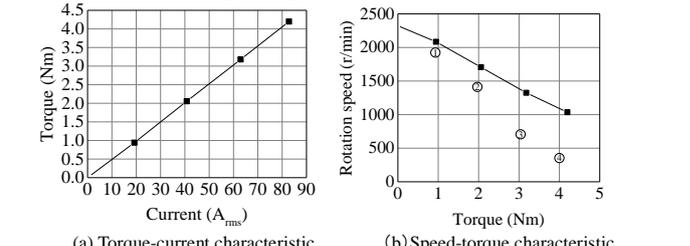


図 4 モータ特性

調整することで最終形状を決定し、磁石厚みは 5.6mm、モータ軸長は 34.8mm となった。

5. まとめ

図 4 に上記最適設計モデルのシミュレーション結果を示す。要求仕様を満たしつつ体積▲44%でベンチマークモデルと同等の性能が得られることを確認した。

文献

(1) 荒川俊史, 他: 電学産大, 3-45, pp.283-284 (2007)
 (2) 曾根広太, 他: 電学大, 5-025, pp.42-43 (2012)
 (3) 李 志剛, 他: 電学大, 5-017, (2016)