

パワー密度を向上した 低電圧大電流スロットレス超高速モータに関する検討

学生員 荻須 崇文* 正員 野口 季彦 (静岡大学)

Study on Low-Voltage and High-Current
Slotless Ultra High-Speed Motor with Improved Power Density
Takahumi Ogisu*, Student Member, Toshihiko Noguchi, Member (Shizuoka University)

This paper describes an ultra high-speed permanent-magnet slotless motor design for a supercharger mounted on an automotive engine. In this paper, a 1.5 kW, 150,000-r/min PM motor fed by 12-V battery is discussed. The motor is specially designed to achieve its efficiency over 97% (excluding mechanical losses) and to raise its power density to 22.3 W/cm³ at the same time.

キーワード：スロットレスモータ，高速モータ，パワー密度

Keywords：Slotless motor, high-speed motor, power density

1. はじめに

筆者らは車載用過給機の電動化を目的として、12 V 電源で駆動される超高速永久磁石モータ (1.5 kW, 150,000 r/min) の開発を推進してきた^{(1),(2)}。このモータでは低電圧、大電流、高周波運転が行われるため、同期インダクタンスや漏れインダクタンスを極限まで低減するように固定子巻線のターン数を 2 ターンとしている。本稿では、これまでに開発してきた超高速永久磁石モータをスロットレス構造とすることにより更なるパワー密度の向上を図ったので報告する。

2. スロットレス超高速モータの設計

(2.1) 最適パーミアンス係数

超高速永久磁石モータの駆動特性は、永久磁石の B-H 曲線における動作点を決定するパーミアンス係数 p_u に強く依存する。 p_u は次式のように近似することができる。

$$p_u \approx \ell_m / \ell_g \quad (1)$$

ここで ℓ_m は磁石厚さ、 ℓ_g はエアギャップ長である。

一方、インバータを含めたモータ駆動システムの総合効率を改善するため、モータ損失だけでなくインバータ損失も考慮して検討しなければならない。モータ駆動システムの最大効率条件は以下のように記述することができる。

$$W_i^{st} + W_e^{mag} = W_c + W_{Ron} \quad (2)$$

ここで W_i^{st} は固定子鉄心の鉄損、 W_e^{mag} は永久磁石内の渦電流損、 W_c は固定子巻線の銅損、 W_{Ron} はインバータの導通損である。本設計では(2)を満足する p_u の最適値を求め、モ

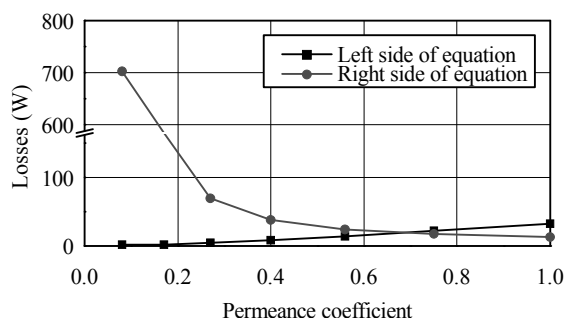


図1 パーミアンス係数に対する損失特性

Fig. 1. Losses characteristics with respect to permeance coefficient.

表 1 磁石厚さによる 5 種類の設計条件

Table 1. Five design conditions with respect to magnet thickness.

Design type	#1	#2	#3	#4	#5
Permanent magnet thickness ℓ_m (mm)	3	4	5	6	7
Air gap length ℓ_g (mm)	4.3	5.7	7.1	8.6	10
Current density (A/mm ²)	100.7	39.1	20.6	12.8	8.5

ータ駆動システムの効率最大化を狙う。図 1 に p_u の変化に対する(2)の左辺と右辺に分けた損失解析結果を示す。この図より、 $p_u = 0.69$ が最適値であり、(2)を満たすことから総損失が最小になると予想される。

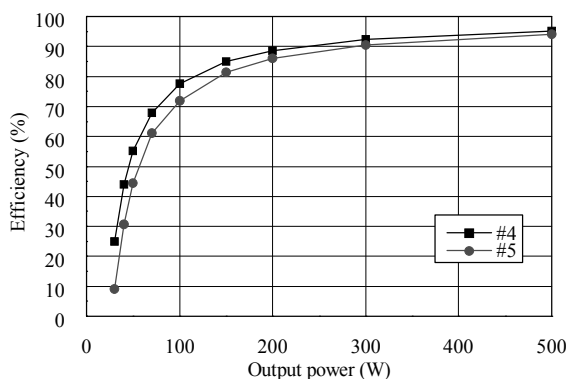


図2 形状#4 と形状#5 の低出力範囲における電氣的効率は
Fig. 2. Electrical efficiency in low-output range of #4 and #5.

〈2・2〉磁石厚さとエアギャップ長

表1に示したように $p_u = 0.69$ となる磁石厚さ l_m 、エアギャップ長 l_g の異なる5形状のモータを想定し更に検討を進める。表より#1, #2, #3の形状でモータを設計した場合、エアギャップ長が小さく、巻線を挿入するスペースが少ないため、電流密度が非常に高くなる。一方、#4, #5の形状については電流密度は 10 A/mm^2 前後であり、定格出力範囲において電氣的効率は差は見られない。しかし、図2より電磁界解析の結果、500 W未下の低出力範囲では#4の形状をもつモータの方が電氣的効率が良いため、#4の磁石厚さ $l_m = 6 \text{ mm}$ とエアギャップ長 $l_g = 8.7 \text{ mm}$ が最適値であると判断できる。

〈2・3〉継鉄幅

図3に固定子鉄心内径を一定として、継鉄幅を変化させたときの定格出力における損失計算結果を示す。図より、継鉄幅が小さいほど損失は低くなるが、継鉄幅5 mm以下では継鉄で磁気飽和が生じるため所望のトルクを出力することができない。したがって、継鉄幅の最適値は6 mmであると判断される。以上より、今回設計したスロットレス超高速モータの各部寸法は図4のようになる。このモータは 67.2 cm^3 の体積で最大3 kWを出力することができる。

図5に本モータと従来試作を行ったスロットを有するモータの定格運転時における諸損失（機械損は含まない計算結果）を示す。このようにスロットレス構造とすることにより、総損失は3.7 W増加する。巻線の銅損は電流密度が大きくなったため約2倍に増加するものの、固定子鉄心の鉄損はティース鉄損がなくなるため4.1 W低減する。さらに空間高調波を低減することで磁石渦電流損を0.7 W低減することができる。

3. まとめ

本稿では、12 V電源で駆動されるスロットレス超高速モータにおいて、パーミアンス係数、固定子鉄心形状に関する最適化を検討した。電磁界解析の結果、本モータは従来のモータに対して電氣的効率は0.3ポイント劣るが

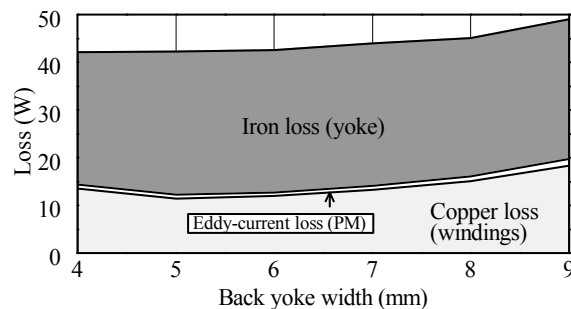


図3 継鉄幅に対する損失計算結果
Fig. 3. Loss analysis result with respect to back yoke width.

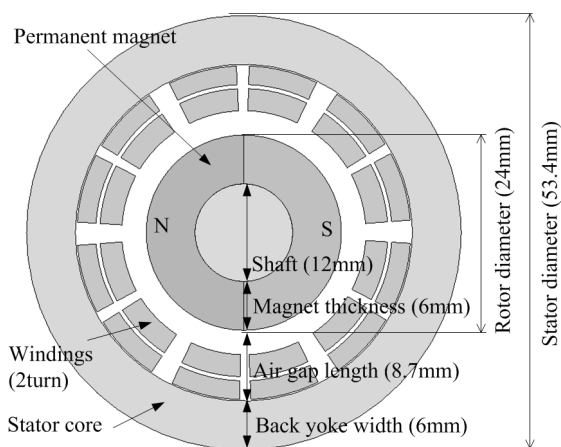


図4 スロットレス超高速モータ断面形状
Fig. 4. Cross section diagram of designed ultra high-speed slotless motor.

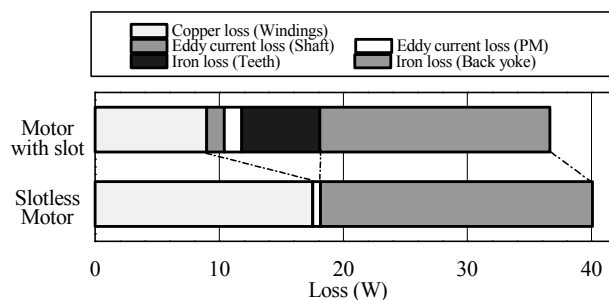


図5 定格運転時の諸損失計算結果（機械損は含まず）
Fig. 5. Calculated losses at rated operation (excluded mechanical losses).

97.3%と高効率を達成でき、パワー密度については従来の約1.7倍に相当する 22.3 W/cm^3 を達成できると考えられる。今後、試作機により実験的に運転特性を検証する所存である。

文 献

- (1) 鹿野・和田・野口：「12V電源駆動超高速PMモータの効率とパワー密度向上に関する検討」電気学会全国大会, 5-011 (2008)
- (2) 鹿野・和田・野口：「12V電源駆動超高速PMモータの開発」電気学会全国大会, 5-010 (2008)