

中空・大直径・扁平構造をもつ アウターロータ形 PM モータの最適設計

学生員 佐々木 幹人 正員 野口 季彦 (長岡技術科学大学)

Optimum Design of Outer-Rotor Permanent-Magnet Motor with Hollow, Large Diameter and Flat Structure

Mikito Sasaki, Student Member, Toshihiko Noguchi, Member (Nagaoka University of Technology)

This paper describes an optimum design of an outer-rotor permanent-magnet motor with a hollow, large diameter and flat structure, which is applied to a cylindrical display. Design requirements and a basic configuration of the motor are discussed, and FEM electromagnetic-field analyses are conducted to optimize the detailed shape of the motor. Every dimensions investigated in these analyses are determined to achieve higher power density without sacrificing the motor efficiency. As a result, the electrical efficiency and the power density of the designed motor are 93.2 % and 8.08 W/kg, respectively.

キーワード : PM モータ, モータ効率, パワー密度, アウターロータ, パーミアンス係数, FEM 解析

Keywords : PM motor, motor efficiency, power density, outer-rotor, permeance coefficient, FEM analysis

1. はじめに

近年, 街頭や商業施設への設置を目的とした 100 インチを超える大画面映像装置の研究開発が盛んに進められている。複数のディスプレイや発光ダイオードを用いる従来の映像方式は高輝度, 高精細な画像が得られる反面, 重量, 消費電力, 価格の点でなおも解決すべき課題は多い。また, 平面的な画像しか出力できず, 円柱のように曲率を有する壁面に設置することは困難である。

そこで, 本論文では, アウターロータ形 PM モータと LED アレイを組み合わせた 360° 指向性をもつ円筒型映像装置を提案するとともに, LED アレイを回転させるモータの最適設計について検討した。この映像装置は発光ダイオードを直線状に並べた LED アレイをモータでダイレクトドライブし, 残像効果により光源が走査して作る画像を 1 次元から 2 次元へ拡張するものである。光源として LED アレイを用いることで, 安価に長寿命かつ高輝度を実現することが

できる。モータ設計では電気的特性と同時に機械的特性の検討が必要である。しかし, ここでは主としてアウターロータ形 PM モータ単体の電気的特性に焦点を絞り, 有限要素法 (FEM) に基づく電磁界解析により, モータ効率とパワー密度に着目した最適設計を検討したので報告する⁽¹⁾⁽²⁾。

2. アウターロータ形 PM モータの概要

〈2・1〉 アウターロータ形 PM モータの目標仕様 図1のような円筒型映像装置を開発するにあたり, アウターロータ形 PM モータの目標仕様を表1のように定めた。電源は単相または三相 200 V の商用電源を想定したため, インバータ直流バス電圧を 270 V として設計を行った。このモータは一定速度で LED アレイをダイレクトドライブするだけであるため, 定格出力はロータ支持軸受の摩擦損と LED アレイの風損から定めた。図2に示したように, モータの回転速度と映像装置の画質には密接な関係があり, 映像装置のフレームレートを f frame/s, モータの回転速度を N r/min, LED アレイの本数を n とすると, それらの関係は次式のように表される。

$$f = n \frac{N}{60} \quad (1)$$

動画を出力する場合, 滑らかな映像が得られるのは 15 frame/s 以上であるため, 回転子の周速や製造コストを考慮して LED アレイを 4 本, モータの回転速度を 200 r/min に決定した。

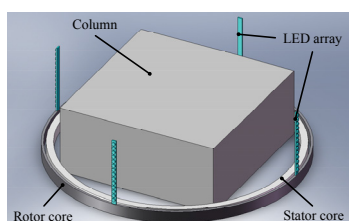


図1 円筒型映像装置の概略
Fig. 1. Schematic diagram of cylindrical display.

表 1 アウターロータ形 PM モータドライブの目標仕様
Table 1. Design specifications of outer-rotor PM motor drive.

Inverter DC-bus voltage (V)	270
Rated power (W)	200
Rated torque (Nm)	9.55
Rated speed (r/min)	200

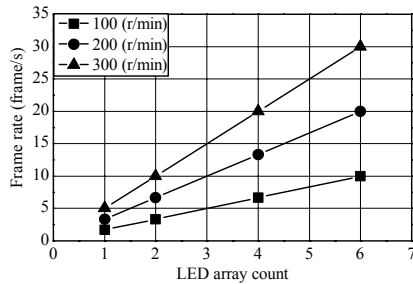


図 2 フレームレート, LED アレイ数, 回転速度の関係
Fig. 2. Relationship between frame rate and LED array count.

〈2・2〉 アウターロータ形 PM モータの構成 アウターロータ形 PM モータの構成を図 3 に示す。本モータは既設建造物の柱に設置することを想定しているため、固定子を中空、直径を約 1000 mm としている。また、LED アレイにより作り出される画像を可能な限り大きくするため、モータの鉛直方向鉄心積厚を 50 mm と定め扁平構造を採用している。

前述のようにモータの負荷は機械損だけであるため、消費電力とパワー密度、製造コストの観点からフェライト磁石を用いた PM モータで十分であると考えられる。更に、ティースとスロットからなる固定子鉄心を全周にわたり配置せず、磁性材料部と非磁性材料部を交互に配置することによって、必要な出力を確保しつつ軽量化とパワー密度の向上を図る。磁性材料部には安価な 0.35 mm 厚の電磁鋼板を使用し、非磁性材料部には強化プラスチックを使用する。このような構成により固定子を分割構造とすることができるので、既設の柱に容易に施工することが可能である。同様に回転子も分割構造とするが、1 台のインバータで駆動するためには固定子側から見て回転子全周にわたり同じ構造にする必要がある。したがって、回転子は継鉄全周に電磁鋼板を使用し、永久磁石も全周にわたって均等に配置する。映像装置としてコギングトルクに起因する画像のブレが懸念されるが、これは大直径のアウターロータとすることで、そのフライホイール効果による速度脈動の低減でほとんど問題とならない。

3. FEM 電磁界解析に基づくモータ設計

前述した構成のアウターロータ形 PM モータの電気的パラメータを決定するために、FEM 電磁界解析に基づいて設計を行う。

まず、モータ効率とパワー密度の観点からパーミアンス係数の最適化を行い、最も重要な永久磁石の動作点を決定する。次に、同様の観点から固定子鉄心および回転子鉄心の詳細形状を決定する。更に、磁石極数が異なる 4 種類のモータについて以上の検討を再度行い、モータ効率を比較評価して最終的な各部寸法を確定する。

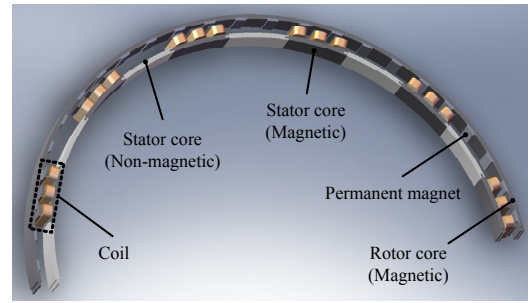


図 3 アウターロータ形 PM モータの概観
Fig. 3. Overview of investigated outer-rotor PM motor.

表 2 3 種類のパーミアンス係数をもつモータ
Table 2. Motors with three permeance coefficients.

Motor type	#1	#2	#3
Permanent magnet thickness (mm)	4	5	6
Air-gap length (mm)	6	5	4
Permeance coefficient	0.557	0.818	1.19

〈3・1〉 永久磁石パーミアンス係数の最適化 PM モータの設計において、最も重要なパラメータは永久磁石のパーミアンス係数である。これは永久磁石の B-H 曲線上で動作点を決定する数値であり、 l_m を磁束（半径）方向の磁石厚み、 l_g をギャップ長、 a_m を磁石平均断面積、 a_g をギャップ平均断面積、 K_c をカータ係数とすると、一般にパーミアンス係数 p_u は次式で与えられる⁽³⁾。

$$p_u = \frac{l_m \cdot a_g}{a_m \cdot K_c l_g} \quad (2)$$

基本的に p_u と誘起電圧はほぼ比例関係にあり、 p_u を大きくすると巻線に鎖交する有効磁束が増えるため、アンペアターンを小さくして銅損を低減することができる。しかし、鉄心内の磁束変化が大きくなるので、鉄損は逆に増加する。このようなトレードオフを考慮して、パーミアンス係数を最適値に決定することが必要である。そこで、表 2 に示したように p_u が異なる 3 種類のモータを想定し、FEM 電磁界解析に基づいて l_m と l_g の最適値を検討する。

出力 200 W、回転速度 200 r/min 一定としたときのパーミアンス係数に対する損失とモータ効率の解析結果を図 4 に示す。いずれの場合も、解析対象としたモータは磁石極数 48 極のモデルである。一般に効率が最大となるのは、銅損と鉄損が拮抗する #2 形状の場合である。しかし、パワー密度を考慮すると、#2 ではなく #3 形状の方が良いと考えられる。なぜならば、#2 形状ではスロット面積が大きいため巻線抵抗を小さくして銅損を低減することが可能であるが、結果的に固定子寸法が大きくなるためパワー密度が大幅に低下するからである。そこで、パーミアンス係数を効率最大点より若干大きくすることで、銅損は僅かに増加するが固定子寸法を小さくしてパワー密度を向上させることを優先する。このように、モータ効率とパワー密度の双方を両立した設計を行う。以降の議論では、#3 のパーミアンス係数をもつモータを前提として、固定子および回転子鉄心の詳細形状について検討する。

〈3・2〉 固定子および回転子形状の最適化 図 5 に示すモータ各部の形状を FEM 電磁界解析に基づいて決定する。

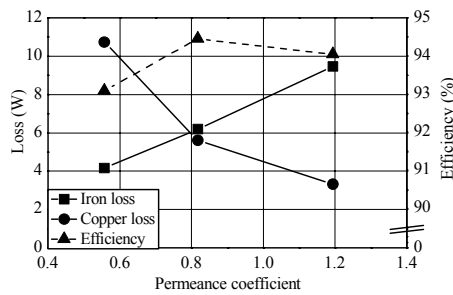


図 4 48 極モデルのパーミアンス係数に対する損失とモータ効率
Fig. 4. Loss and motor efficiency with respect to permeance coefficient of 48-pole model.

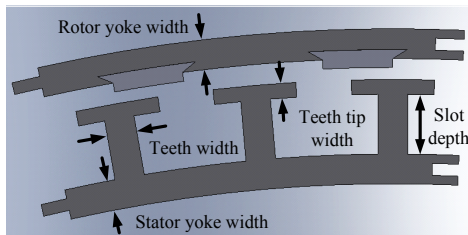


図 5 固定子および回転子の断面図
Fig. 5. Cross-section diagram of stator and rotor.

形状を決める設計指針として以下の 3 点を掲げる。

- (1) 所望の出力が得られること
- (2) 効率が最大となること
- (3) ただし、鉄心幅 10 mm の増加に対して、モータ効率が 1 ポイント未満の改善である場合は、パワー密度の高い形状を最適形状と判断すること

また、最適化の手順は以下の通りとした。

- Step 1. 固定子継鉄幅の最適化
- Step 2. ティース幅の最適化
- Step 3. ティース先端幅の最適化
- Step 4. スロット深さの最適化
- Step 5. 回転子継鉄幅の最適化

図 6 に固定子内径および外径を一定として、固定子継鉄幅を変化させたときの定格出力におけるパワー密度と損失計算結果を示す。固定子継鉄幅が十分に大きい場合、スロット面積が小さくなるため銅損は増加するが、固定子継鉄における磁路長が短くなり鉄損は減少する。一方、固定子継鉄幅が 10 mm より小さい場合、固定子継鉄で磁気飽和が生じ、所望の出力が得られないのでパワー密度も低下している。固定子継鉄幅 20 mm のときに効率が最も高いが、固定子継鉄幅 10 mm のときと比べて 0.4 ポイントしか上昇していない。したがって、パワー密度の高い固定子継鉄幅 10 mm が最適形状であると判断した。

図 7 に固定子継鉄幅を 10 mm として、ティース幅を変化させたときの定格出力におけるパワー密度と損失計算結果を示す。固定子継鉄幅と同様にティース幅に対しても銅損と鉄損のトレードオフ関係がある。ティース幅 2 mm の場合、磁気飽和により所望の出力が得られずパワー密度が低下している。また、ティース幅 10 mm と 20 mm のときの効率を比較すると 0.6 ポイントしか差がないので、ティース幅 10 mm が最適形状であると判断した。

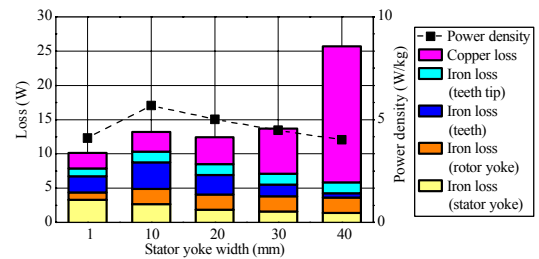


図 6 48 極モデルの固定子継鉄幅に対するパワー密度と損失
Fig. 6. Power density and loss with respect to stator yoke width of 48-pole model.

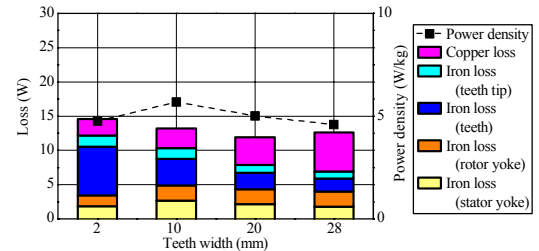


図 7 48 極モデルのティース幅に対するパワー密度と損失
Fig. 7. Power density and loss with respect to teeth width of 48-pole model.

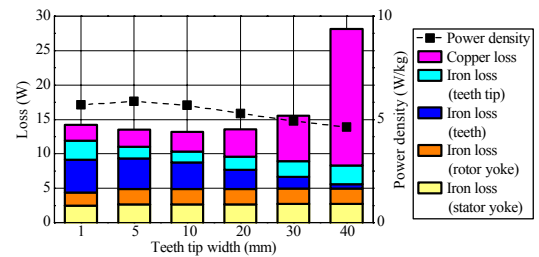


図 8 48 極モデルのティース先端幅に対するパワー密度と損失
Fig. 8. Power density and loss with respect to teeth tip width of 48-pole model.

図 8 に固定子継鉄幅 10 mm、ティース幅 10 mm、固定子内径および外径を一定として、ティース先端幅を変化させたときの定格出力におけるパワー密度と損失計算結果を示す。ティース先端幅を変化させても、銅損と鉄損のトレードオフ関係がある。ティース先端幅 5 mm と 10 mm のときの効率はほとんど差がないので、前述の設計指針に基づきティース先端幅を 5 mm と決定した。

図 9 に固定子継鉄幅 10 mm、ティース幅 10 mm、ティース先端幅 5 mm、固定子内径を一定として、固定子外径によりスロット深さを変化させたときの定格出力におけるパワー密度と損失計算結果を示す。スロット深さはスロット面積とティースの磁路長に影響を及ぼし、銅損と鉄損のトレードオフ関係を大きく左右する。スロット深さ 10 mm と 20 mm のときの効率を比べると 1.3 ポイントの差があるが、20 mm と 30 mm を比べると 0.2 ポイントしか差がない。したがって、スロット深さ 20 mm が最適形状であると判断した。

図 10 に固定子を以上の形状に確定した上で、回転子継鉄幅だけを変化させたときの定格出力におけるパワー密度と損失計算結果を示す。回転子継鉄幅はスロット面積に影響を及ぼさないため、銅損は一定で鉄損とのトレードオフ関係はないと考えられる。ただし、回転子継鉄幅は磁束密度

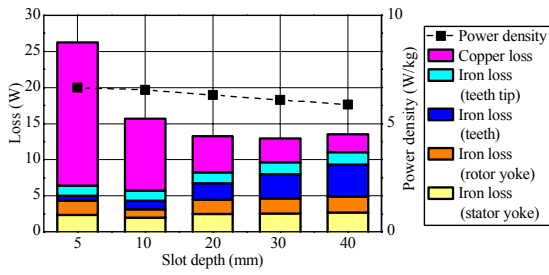


図 9 48 極モデルのスロット深さに対するパワー密度と損失
Fig. 9. Power density and loss with respect to slot depth of 48-pole model.

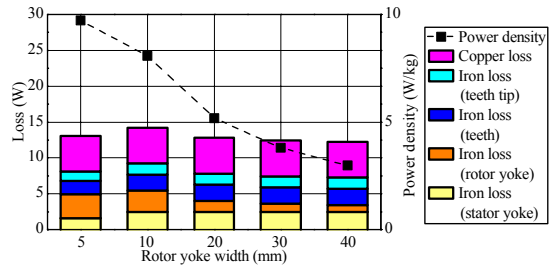


図 10 48 極モデルの回転子継鉄幅に対するパワー密度と損失
Fig. 10. Power density and loss with respect to rotor yoke width of 48-pole model.

に影響を及ぼすので、回転子鉄損が増減する。回転子継鉄幅が 5 mm では磁気飽和が起きるため、所望の出力が得られない。一方、回転子継鉄幅が 10 mm と 20 mm のときの効率を比べると 0.6 ポイントしか差がないことから、回転子継鉄幅 10 mm が最適形状であると判断した。

〈3・3〉 磁石極数の最適化 本来ならば、磁石極数はモータの用途などからあらかじめ決定されるパラメータである。しかし、本モータでは磁石極数に自由度があるため、磁石極数が 24 極、40 極、48 極、60 極のモータについて、パーミアンス係数、固定子および回転子鉄心の詳細形状を前述の手順によって再度最適化した。最適化された 4 種類の磁石極数をもつモータの効率を比較し、極数を決定する。

図 11 に磁石極数とモータ効率の関係を示す。これより、磁石極数と効率は強い相関をもっていることがわかる。しかし、48 極以上になると効率の改善も頭打ちとなる。極数を増やすとそれに伴って、スロット数も増加しトルク発生箇所が増える。このことはアンペアターンを小さくできるため銅損低減に有効であることを意味するが、銅損の絶対量も小さくなるのでその低減量も小さくなる。したがって、効率曲線も飽和すると考えられ、その帰結として、磁石極数 48 極が最適であると判断した。

以上の手順により、パーミアンス係数、固定子および回転子鉄心の詳細形状、磁石極数を最適化した。表 3 に設計したモータの電気的・機械的パラメータをまとめた。固定子内径と回転子外径の差が 104 mm であり、モータ単体の半径方向の厚みはわずか 52 mm (全直径の約 5%) である。また、表 2 の #2 形状でモータ効率のみに着目して設計した場合と比較すると、モータ効率では 2.1 ポイント下回るが、パワー密度については 74.1% も向上する。定格運転時の銅損は 4.97 W、鉄損は 9.24 W であり、機械損を除いた純電氣的

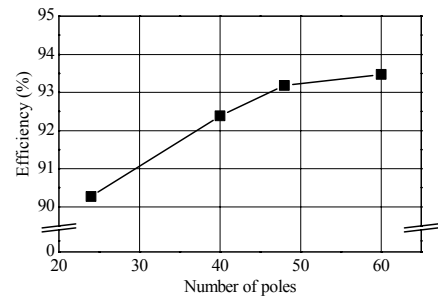


図 11 磁石極数とモータ効率の関係
Fig. 11. Relationship between magnet pole number and efficiency.

表 3 設計したモータの電気的・機械的パラメータ
Table 3. Electrical and mechanical parameters of designed motor.

Rated current (A)	1
Phase number	3
Pole number	48
Stator winding configuration	Concentrated winding
Winding turns (turns/phase)	70
Winding resistance (mΩ)	138
Stator slot number	36
Stator inner diameter (mm)	1000
Stator outer diameter (mm)	1070
Rotor inner diameter (mm)	1084
Rotor outer diameter (mm)	1104
Stator teeth width (mm)	10
Stator and rotor stack length (mm)	50
Electromagnetic steel sheets	0.35-mm thickness, $B_{max} = 1.65$ (T)
Permanent magnet	Barium ferrite

効率は 93.2%，パワー密度は 8.08 W/kg を実現することができる。

4. まとめ

本稿では、FEM 電磁界解析に基づいて円筒型映像装置用 200 r/min, 200 W のアウトロータ形 PM モータの最適設計について述べた。

PM モータの設計において重要なパラメータである、パーミアンス係数をモータ効率最大点よりも約 45% 大きくすることで、固定子の小型化とパワー密度の向上に有効であることを示した。また、固定子および回転子鉄心の詳細形状についても、モータ効率およびパワー密度の観点から最適化を図った。その結果、磁石極数 48 極のモータにおいて、純電氣的最大効率 93.2%，パワー密度 8.08 W/kg を達成できる見通しを得た。今後はこの FEM 電磁界解析結果の妥当性について実機検証を進める所存である。

文 献

- (1) 回転機の電磁界解析高精度モデリング技術調査専門委員会:「回転機の電磁界解析高精度モデリング技術」, 電学技報, 第 1044 号(2006)
- (2) 回転機の高速度高精度電磁界解析技術調査専門委員会:「回転機の高速度高精度電磁界解析技術」, 電学技報, 第 1094 号(2007)
- (3) Mitsukichi Okawa: "Design manual of Magnetic circuit and PM motor", Sogo Research (1989) (in Japanese)
大川光吉:「永久磁石磁気回路・磁石回転機設計マニュアル」, 総合リサーチ (1989)
- (4) P. Karutz, T. Nussbaumer, W. Gruber and J.W. Kolar: "The Bearingless 2-Level Motor", The Seventh International Conference on Power Electronics and Drive Systems, CD-ROM, p.p. 365-371 (2007)