

冷却ファン用高速回転モータの高トルク化・高効率化に関する検討

Torque and Efficiency Improvement of High-Speed Cooling-Fan Motor

川村 恭平[†], 中村 健二, 一ノ倉 理, *後藤 博樹, **郭 海蛟

東北大学 大学院工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11 (〒980-8579)

*宇都宮大学 大学院工学研究科, 宇都宮市陽東 7-1-2 (〒321-8585)

**東北学院大学 工学部, 多賀城市中央 1-13-1 (〒985-8537)

K. Kawamura, K. Nakamura, O. Ichinokura, *H. Goto, **H. J. Guo

Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-11 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

*Utsunomiya University, Graduate School of Engineering, 7-1-2 Yoto, Utsunomiya, Tochigi 321-8585, Japan

**Tohoku Gakuin University, School of Engineering, 1-13-1 Chuo, Tagajo, Miyagi 985-8537, Japan

This paper presents torque and efficiency improvement of high-speed permanent magnet (PM) motors for cooling-fans from the view point of the rotor structure. The first candidate is surface permanent magnet (SPM) motor, which has bonded Nd-Fe-B polar anisotropic magnets in order to obtain large torque and low iron loss. The second one is interior permanent magnet (IPM) motor, which has a two-layer-type rotor in order to obtain large reluctance torque. The both PM motors are compared in terms of torque and efficiency by using three-dimensional finite element method (3D-FEM). The IPM motor, which demonstrates higher efficiency, is prototyped and demonstrates larger torque and higher efficiency in comparison with a previous cooling-fan motor.

Key words: Cooling-fan motor, surface permanent magnet (SPM), interior permanent magnet (IPM)

1. はじめに

近年、産業、運輸、民生など、様々な分野で電動化が推進されており、モータの需要は拡大し続けるとともに、高出力化、高効率化の要求が年々強まっている。これらのモータはいわゆる動力用途であるが、最近では冷却用途としての需要も高まっている。これはスイッチング電源回路やモータ駆動回路など、いわゆるパワーエレクトロニクス回路の高周波化、高出力化に伴い、局所的な損失の増大と、それに伴う発熱の問題が顕在化しているためである。したがって、これらの回路の冷却に用いられるファンには、冷却性能を向上させるために、大型化、並びに高速回転化による風量・風圧の増大が要求されており、これを駆動するモータには高トルク化、高速回転化が求められている。

一方、従来、これらのファンに用いられるモータはコストが最優先であったため、有限要素法 (FEM) 等によるモータの最適設計に関する検討は不十分であり、効率も決して高くはない。そこで本稿では、今後重要視されることが予想される冷却ファン用高速回転モータの高トルク化と高効率化について、永久磁石 (PM) モータの回転子構造に着目し、比較・検討を行ったので報告する。

2. 比較・検討に用いた永久磁石モータ

本稿では、表面磁石型 (SPM) と埋込磁石型 (IPM) の回転子構造の異なる 2 種類の PM モータに関して、比較・検討を行う。なお、考察に用いたモータは、固定子よりも回転子の積み厚の方が大きい、いわゆるオーバーハン

グ構造を有するため、3次元 FEM を用いて算定を行った。設計目標は、従来機の仕様が定格回転数 9000 rpm、定格トルク 57 mN・m、および定格時の効率が 80%であるのに対し、冷却ファンの風量・風圧の増大の観点から定格回転数 12600 rpm、定格トルク 200 mN・m とし、さらにその時の設計上の効率を 93%以上とした。また、SPM、IPM モータともに、3相 6 スロット 4 極のインナーロータ型とし、体格や巻線の仕様もそろえることで、回転子構造に焦点を絞った比較を行えるようにした。

磁石材料については、高トルク化の観点からはネオジム焼結磁石が最適であるが、10000 rpm を超える高速回転になると、磁石渦電流損失による効率の低下が大きくなることが予想されるため、従来機と同様にネオジムボンド磁石を採用した。

また、一般的な冷却ファン用のモータは、コストの観点から、いわゆるオープンループの矩形波駆動が採用される場合が多いが、今後は高トルク化、高効率化の観点から電流ベクトル制御による正弦波駆動が採用されることを想定して、解析を行った。以下、各モータの特徴について述べる。

2.1 SPM モータ

一般的な SPM モータの回転子磁石は、Fig. 1(a)に示すようにラジアル方向に着磁される場合が多いが、本稿で採用したネオジムボンド磁石は、磁石性能という観点から見ると、ネオジム焼結磁石に劣ることから、ラジアル着磁ではなく、極異方着磁を採用する。同図(b)に示すように、

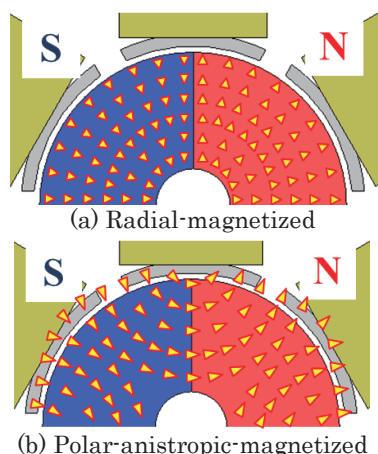


Fig. 1 Radial- and Polar-anisotropic-magnetized rotors of SPM motors.

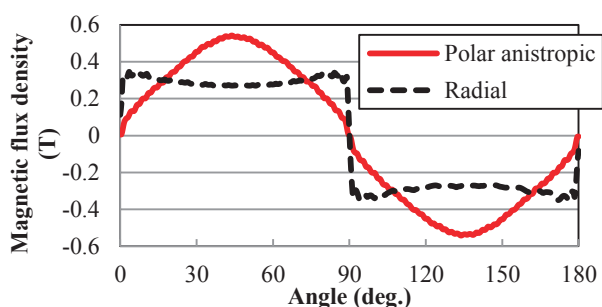


Fig. 2 Comparison of flux density distribution of the rotor surface of the SPM motors.

極異方性着磁は、磁化が磁極中心に集中するように円弧状に着磁され、その結果、空隙磁束分布は正弦波状になり、トルクに寄与する基本波成分の振幅が大きくなる^{1),2)}。

Fig. 2に、同図(a)のラジアル着磁の回転子と同図(b)の極異方性着磁の回転子について、FEMを用いて回転子表面から0.2 mm地点の磁束密度の空間分布を算定した結果を示す。この図を見ると、極異方性着磁にすることで、分布が正弦波状になり、振幅も大きくなっていることがわかる。

2.2 IPM モータ

IPM モータは回転子鉄心に磁石を埋め込むことで、マグネットトルクに加えて、磁氣的突極性に由来するリラクタンストルクを利用することができる。ただし、磁気ブリッジ部で磁石磁束が短絡されるため、磁石からの有効磁束はSPMモータよりも小さくなる。特に、残留磁束密度が焼結磁石よりも小さいボンド磁石では、その影響がより顕著に現れる。

そこで本稿では、Fig. 3に示すように、磁石を2層とし、かつ磁石をより深く埋め込むことで、磁石表面積の拡大を狙った。Fig. 4に、磁石が1層の場合と2層の場合の回転子表面から0.2 mm地点の磁束密度の空間分布の算定結果を示す。この図より、磁石層を2層にすることで、振幅が大きくなっていることがわかる。なお、リラクタンストルクの増大という観点からも2層化は有効である³⁾。

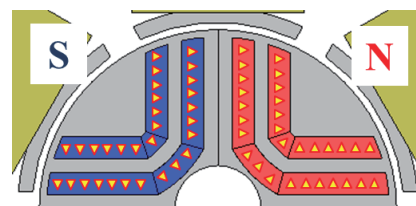


Fig. 3 Two-layer-type rotor of the IPM motor.

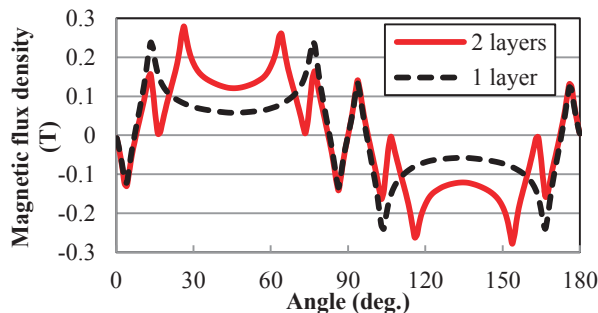


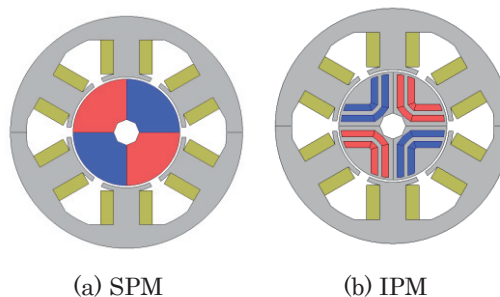
Fig. 4 Comparison of flux density distribution of the rotor surface of the IPM motors.

2.3 FEM 解析結果

前節までで述べた SPM モータおよび IPM モータについて、3次元 FEM を用いて特性の算定および比較・検討を行った。Fig. 5に両モータの諸元を示す。

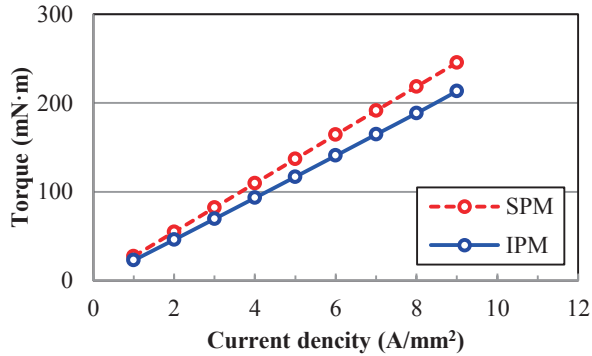
Fig. 6(a)に、電流密度対トルク特性を示す。この図より、SPM モータの方がより低い電流密度で目標の200 mNmに達していることがわかる。これは極異方性着磁を採用したことによるところが大きいと考えられる。

一方、同図(b)には、銅損および鉄損の比較を示す。ここで、銅損は巻線抵抗 r と巻線電流 i を用いて、 ri^2 で算出した。鉄損は、FEM で得られた磁束密度分布からスタインメッツの実験式に基づき後計算で算定した⁴⁾。この図を見ると、銅損についてはトルクの大きい SPM モータの方が小さいことがわかるが、鉄損については逆に IPM モータの方が小さいことがわかる。これは SPM モータの方が、

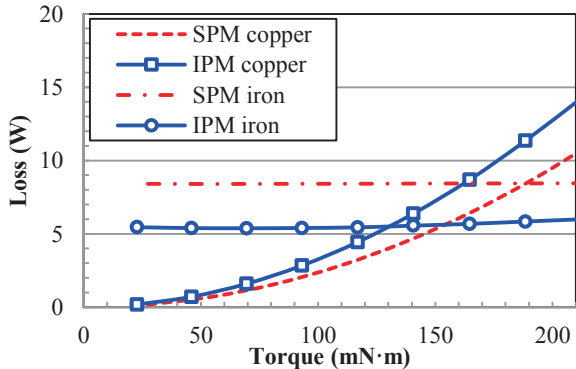


(a) SPM	(b) IPM
Motor diameter	54 mm
Rotor speed	12600 rpm
Number of turns/pole	48 turns/pole
Magnet pole pairs	2
Gap length	0.5 mm
Material of magnet	Bonded Nd-Fe-B
Material of iron core	35A300

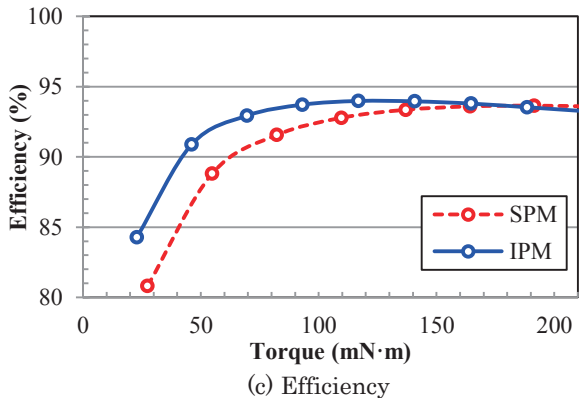
Fig. 5 Specifications of SPM and IPM motors.



(a) Torque characteristics



(b) Copper and iron losses



(c) Efficiency

Fig. 6 Comparison of characteristics of the SPM and IPM motors.

磁石磁束の増加により、動作磁束密度が高くなったためである。すなわち、磁石磁束のみに頼ったトルク向上では、同時に鉄損の増大も招くことがわかる。

同図(c)は効率の比較である。ここで設計上の効率は、機械出力を P_{out} 、銅損を W_c 、鉄損を W_i として次式で求めた。なお、機械損や漂遊損は考慮していない。

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + W_c + W_i} \times 100(\%) \quad (1)$$

この図を見ると、IPM モータの方が SPM モータよりも全般的に効率が高いことがわかる。これは IPM モータの場合、トルクの増大を磁石磁束のみに頼らずに、リラクタンストルクの活用もできることから、動作磁束密度を低く抑えることができ、その結果、鉄損を小さくできたことが理由として挙げられる。

3. 試作試験の結果と考察

3.1 試作試験結果

前章までの検討結果に基づき、IPM モータの試作試験を行った。Fig. 7 に試作した IPM モータの回転子の外観を、Fig. 8 に実験システムの外観を示す。今回の試作において、回転子は、磁石を着磁器によって所望の大きさと方向に着磁した後、回転子鉄心に挿入する形で作製した。

Fig. 9 に、試作機の電流密度対トルク特性を示す。また、比較のため、Fig. 6(a) に示した計算値も併せて示す。この図を見ると、計算値と実測値には誤差があり、特に両直線の傾きに差異があることがわかる。この傾きの差は、回転子磁石からの有効磁束の差が主たる要因であると考えられることから、解析・設計で想定したとおりの着磁分布が得られていない可能性が考えられる。

次いで、Fig. 10 に効率の比較を示す。なお、実測において効率は、入力電力 P_{in} と出力電力 P_{out} から次式で求めた。

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100(\%) \quad (2)$$

この図より、試作機の効率は、従来機の効率 80% に対して大きく改善することはできたが、最高効率は約 88% であり、設計通りにはならなかった。この原因としては、Fig. 9 に示したトルクの低下や、機械損の影響、および漂遊損の影響が考えられる。

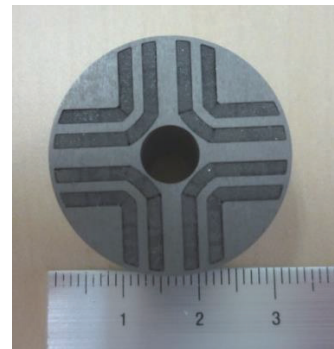


Fig. 7 Rotor core of the prototype IPM motor.

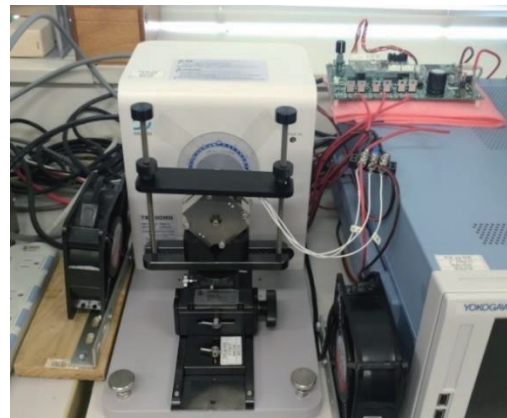


Fig. 8 External view of the experimental setup.

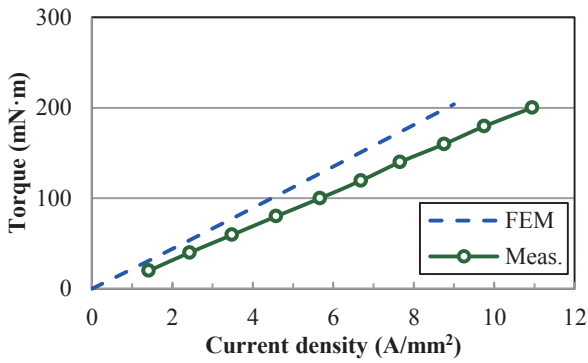


Fig. 9 Comparison of torque characteristics.

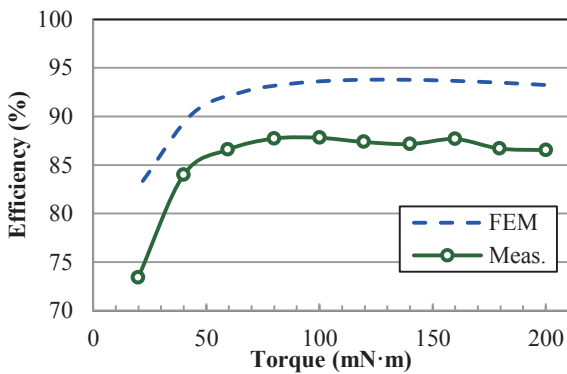


Fig. 10 Comparison of efficiency characteristics.

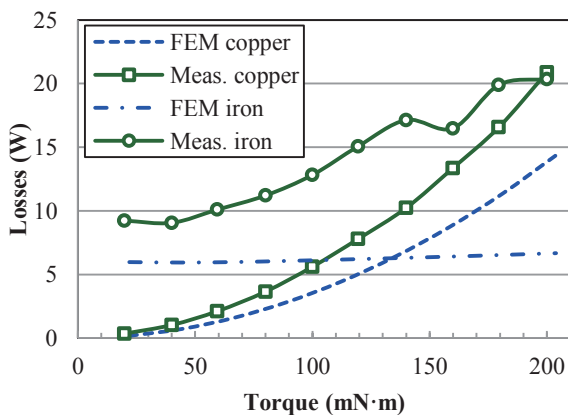


Fig. 11 Comparison of copper and iron losses.

Fig. 11 に、損失の比較を示す。実測において、銅損は巻線抵抗 r と巻線電流 i を用いて、 ri^2 で算出した。一方、鉄損については直接測ることができないため、次式のように入力電力から出力電力と銅損を引く形で求めた。

$$W_i = P_{in} - P_{out} - W_c \quad (3)$$

したがって、実測の鉄損には機械損 W_m や漂遊損 W_s が含まれる。この図を見ると、銅損、鉄損ともに実測値の方が大きいことがわかる。銅損については、トルク特性の低下が原因である。鉄損については、機械損や漂遊損など、FEM では考慮できない損失の影響が主たる要因であると考えられる。次節では、トルクおよび効率低下の要因について、さらに詳しい考察を行う。

3.2 効率低下の要因に関する考察

まず、トルク低下の原因として挙げた回転子磁石の着磁分布について検証を行った。Fig. 12 に、回転子表面の磁束密度分布の計算値と実測値を示す。実測では、回転子表面から約 0.2 mm 地点の磁束の径方向成分をプローブを用いて計測した。FEM では、実測と条件を合わせるため、同様に、回転子表面から 0.2 mm 地点の磁束の径方向成分を計算で求めた。この図より、計算値の方が振幅が大きいことがわかる。また、トルクに寄与する基本波成分を求めると、計算値は 168 mT、実測値は 142 mT となり、約 15% の差異があることがわかった。なお、Fig. 9 に示した計算値と実測値のトルク特性の傾きは計算値が約 23、実測値が約 20 であり、約 13% の差異であることから、試作機におけるトルク低下の主たる要因は、この着磁分布の差であるといえる。

次いで、漂遊損の原因について考察する。一般に、漂遊損の原因をすべて特定することは容易ではないが、ここではケース損に着目した。なぜならば、SPM モータと比べて、IPM モータは軸方向への漏れ磁束が大きいため⁵⁾、これがケースに鎖交し、渦電流損を生じさせる可能性があるためである。Fig. 13 に、モータケース含む解析モデルを示す。Fig. 14 に、ケース損の算定結果を示す。このときの回転数は 12600 rpm である。この図を見ると、ケース損はトルクに対して増加し、定格点で 7 W 程度であることがわかる。ここで Fig. 6(b) と Fig. 11 で示した計算

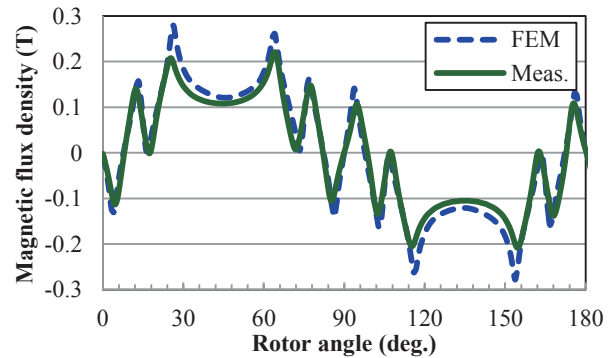


Fig. 12 Comparison of calculated and measured flux density distributions of the rotor surface.

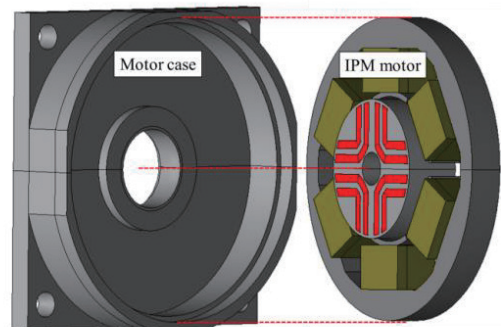


Fig. 13 FEM model for calculating eddy current loss in the motor case.

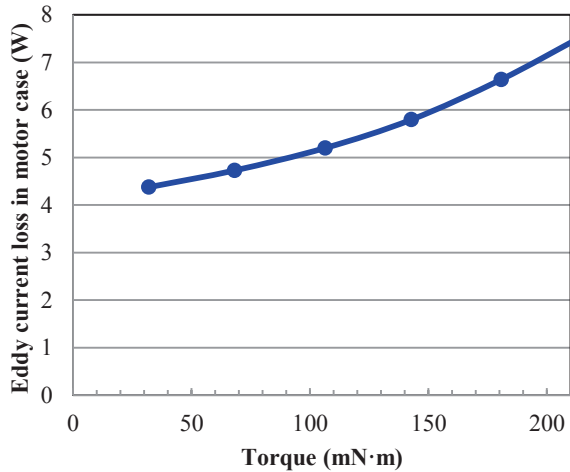


Fig. 14 Calculated eddy current loss in the motor case.

値と実測値の鉄損の誤差は、定格点で約 14 W であるため、ケース損だけではその差はすべて埋まらないが、無視できないほど大きいことが明らかになった。

4. まとめ

以上、冷却ファン用高速回転モータの高トルク化と高効率化について、永久磁石モータの回転子構造に着目し、比較・検討を行った。

まず初めに、極異方性着磁を採用した SPM モータ、および 2 層構造の回転子を採用した IPM モータについて、

3次元 FEM を用いて特性の算定を行ったところ、トルク特性については SPM モータが上回ったが、動作磁束密度の増加によって鉄損も増大し、結果として効率は IPM モータの方が優れるという結果が得られた。

次いで、上述の結果に基づき、IPM モータの試作試験を行ったところ、従来機の効率 80%を大きく上回る約 88%の効率を得ることができた。ただし、設計上の効率である 93%には及ばなかった。この原因としては、設計通りの着磁分布を得られなかったことに由来するトルクの低下、並びに漏れ磁束によるケース損が原因の一つとして考えられることを、FEM の解析に基づき定量的に明らかにした。

今後は、今回明らかになったトルク低下および損失の発生要因に基づき、改良設計したモータの試作試験を行う予定である。

References

- 1) S. Kitamura, Y. Ishihara, T. Todaka, and Y. Inoue, *IEEJ Trans. IA*, **117**, 1001 (1997) (in Japanese).
- 2) M. Fukuoka, K. Nakamura, and O. Ichinokura, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **36**, 123 (2012) (in Japanese).
- 3) Y. Takeda, S. Morimoto, N. Matsui, and Y. Honda, "Umekomi Jishaku Mo-ta no Sekkei to Seigyō", OHM (2001) (in Japanese).
- 4) IEEJ Technical Report No. 855, pp. 10-11 (2001) (in Japanese).
- 5) T. Nonaka, A. Toyota, and M. Motomichi, *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics*, **24**, 43 (2016) (in Japanese).

2018年10月11日受理, 2018年11月28日再受理, 2019年1月7日採録