# アウターロータ型高速 PM モータの高効率化に関する検討

## Efficiency Improvement of Outer-Rotor-type High-Speed PM Motor

櫻井 将†, 中村 健二

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)

S. Sakurai<sup>†</sup>, K. Nakamura

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

Many servers for communication base stations are being installed in order to develop information technology (IT). The servers require not only high-performance processer but also their cooling system. Among the cooling systems, a cooling fan is the most suitable due to good balance between performance and cost. This paper investigates efficiency improvement of an outer-rotor-type high-speed permanent magnet (PM) motor for the cooling-fan. From the viewpoint of rotor structure, three kinds of the PM motors, which are surface permanent magnet (SPM), interior permanent magnet (IPM), and inset permanent magnet (InPM), are designed and compared in terms of torque, eddy current loss, and efficiency by using three-dimensional finite element method (3D-FEM). The results reveal that the IPM motor with divided magnets in the circumference direction has the highest efficiency.

Key words: Cooling fan, surface permanent magnet (SPM), interior permanent magnet (IPM), inset permanent magnet (InPM)

#### 1. はじめに

近年,スマートフォンやタブレットなどの高度通信機器 の利用増加を背景に,大量の情報を高速に処理する必要性 から,通信基地局サーバの増強が進んでいる.具体的には, サーバ CPU のクロック数増加や複数の CPU による並列 処理などが行われているが,これに伴い,サーバ内では激 しい発熱が生じており,冷却装置の性能向上が喫緊の課題 となっている.さらに最近では,次世代のネットワーク技 術として高速大容量,低遅延,多接続といった特長を有す る第5世代移動通信システム(5G)が注目されているが, 5G の普及により,情報通信量は2010年の1000倍以上に 達することが予測されている.したがって,さらなるサー バの増強や CPU の高性能化が求められると同時に,冷却 装置のさらなる性能向上が必要不可欠である.

種々の冷却装置の中でも冷却ファンは、大量生産による 低コスト化が可能であり、冷却性能も比較的高い.また、 大型の冷却装置が苦手とする局所発熱にも対応できるた め、サーバの冷却装置として適する.今後、冷却ファンの 性能向上のためには、風量と風圧の増大が必須であること から、その駆動用モータには高トルク化、高速回転化が求 められる.また一方で、高速回転化、高トルク化により、 モータ自体の発熱が懸念されることから、損失の低減、す なわち高効率化も不可欠である.しかしながら、従来、冷 却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、高性能・高効率化に関する検討はあまりない<sup>1)-3)</sup>.

そこで本稿では、サーバ冷却用ファンモータとして一般 的なアウターロータ型の永久磁石 (PM) モータを考察対 象とし,高効率化に関して,回転子構造の観点から種々検 討を行ったので報告する.

#### 2. 開発目標について

Table1 に、従来機の仕様と開発目標を示す.従来機の定 格回転数は 9000 rpm,定格トルクは 57 mNm,定格時 の効率は 80%であるのに対して、開発目標は冷却ファン の風量・風圧の増大の観点から、定格回転数は 12600 rpm, 定格トルクは 200 mNm とした.よって、機械出力は約 5 倍の向上になる.一方,損失も単純に 5 倍に増えること を許容すると、モータ自体の発熱が問題となるため、20 W 未満に抑えることを目標とした.これは効率で考えると 93%以上に相当する.

また,従来の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 されるケースが多いが,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.

Table1 Comparison of specifications of a present cooling fan motor and target values.

	Present	Target values
Motor diameter	54  mm	$54~\mathrm{mm}~\mathrm{or}~\mathrm{less}$
Rated torque	$57 \text{ mN} \cdot \text{m}$	200 mN m
Rated speed	$9000 \mathrm{rpm}$	$12600 \mathrm{~rpm}$
Mechanical output	$54~\mathrm{W}$	$264~\mathrm{W}$
Efficiency	80 %	93 %

磁石材料については、サーバ冷却用ファンモータの場合、 アウターロータ型であるため、回転子は表面磁石構造が採 用される.そのため、磁石渦電流損を抑制する観点からボ ンド磁石が用いられるが、本稿では高トルク化のためには、 ネオジム焼結磁石の利用が望ましいと考えた.しかし、 10000 rpm を超える高速回転になると、磁石渦電流損が 増大し、これによる効率の低下が懸念される.

そこで次章以降では,磁石渦電流損の低減を目的として, 回転子構造に着目した検討を行う.

### 3. 回転子構造の異なる PM モータの特性比較

## 3.1 比較検討に用いた PM モータ

本章では、回転子構造が異なる3種類のPMモータに ついて、汎用の3次元FEM(3D-FEM)プログラム(JSOL 製JMAG Designer Ver. 17.1)を用いて比較検討を行う.

Fig. 1に,表面磁石(Surface permanent magnet: SPM) 構造の回転子を有するアウターロータ型 PM モータの基 本構成を示す. Table 2 は諸元である. 3 相 6 スロット 4 極の集中巻モータであり,同図に示すように回転子磁石は 径方向に着磁されている.磁石材料は,従来機ではボンド 磁石が用いられていたが,本稿ではこれを単純にネオジム 焼結磁石に置き換えたものを比較の基準として用いる.

Fig. 2(a)は, Fig. 1 の SPM モータの回転子磁石を鉄心 内部に浅く埋め込んだ,埋込磁石(Interior permanent magnet: IPM)構造のアウターロータ型 PM モータであ る.これによりギャップ高調波磁束の影響を直接受けるこ とがなくなるため,磁石渦電流損の低減が期待できる.な お,一般に IPM モータは回転子に磁気的突極性を与える ことで,磁石由来のマグネットトルクに加えて,リラクタ ンストルクの併用を可能にし,トルクの増大を狙うが,ア ウターロータ型の場合,回転子鉄心の肉厚が薄いため,磁 気的突極性を大きくすることは容易ではない.そのため本 稿では,同図に示すように,SPM と同一の磁石配置のま ま,鉄心に浅く埋め込んだ構造を採用することで,磁石渦 電流損の低減だけに狙いを絞った.

Fig. 2(b)は、各磁極を周方向に5分割し、回転子鉄心表 面の溝にはめ込んだ、インセット磁石(Inset permanent magnet: InPM) 構造のアウターロータ型 PM モータで



**Fig. 1** Schematic diagram of an SPM motor and the magnetization direction of the magnet.

ある. 同図に示すように,分割された個々の磁石はギャ ップに面するため,ギャップ高調波磁束の影響を受けるが, 周方向に分割することで,渦電流の流路が短く分断され, 磁石渦電流損の低減が期待できる. なお,磁石間の鉄心の 幅は 0.5 mm とした.上述の 3 種類の PM モータについ て, 3D-FEM を用いて諸特性の比較検討を行った.なお, 各モータの固定子鉄心の形状・寸法,および巻線仕様は同 ーとすることで,回転子構造が諸特性に与える影響のみに 着目した.

## 3.2 諸特性の算定結果の比較

Fig. 3 に, 前節で述べた 3 種類の PM モータの諸特性の 算定結果を示す. 同図(a)のトルク特性を見ると, InPM モ ータと SPM モータはほぼ同一であるが, IPM モータはや や劣っていることがわかる. これは回転子表面の鉄心によ って磁石磁束の一部が短絡され, トルクに寄与する有効磁 束が減ったためである.

Table 2 Specifications of the SPM motor.

Dimensions	54  mm
Stack length	Stator : 11.9 mm
	Rotor : 19.5 mm
Rotor speed	12600 rpm
Number of turns/pole	28 turns/pole
Magnet pole pairs	2
Gap length	0.5  mm
Magnet length	2.0 mm
Material of iron core	35A300



(a) IPM motor



Fig. 2 Schematic diagram of the IPM and InPM motors.

同図(b)に銅損特性を示す. 銅損は巻線抵抗 R と巻線電流 iから Ri<sup>2</sup> で求めた. 銅損はトルク特性の影響を強く受けるため, IPM モータの銅損が最も大きい. 一方で, 同図(c)の磁石渦電流損を見ると, IPM モータが最も小さいことがわかる. すなわち, ギャップ高調波磁束の影響を抑えることが,磁石渦電流損の低減に最も効果的であることが明らかとなった. また, InPM モータも磁石渦電流損をある程度抑えることができていることから,磁石を周方向に分割することも効果があることがわかる.

同図(d)は鉄損特性である.鉄損は 3D-FEM で得られた 各要素の磁束密度波形から(1)式のスタインメッツの実験 式を用い,計算により求めた.

$$W_{i} = A_{\mu}B_{m}^{2}f + A_{e}B_{m}^{2}f^{2}$$
(1)

この図を見ると,鉄損も IPM モータが最も小さいことが わかるが,これは磁石有効磁束が減ったことに起因する.

一方, InPM モータの鉄損が最も大きくなったのは,回転子鉄心表面の磁石をはめ込むための溝がギャップパー ミアンスの変動を大きくし,高調波磁束が増したことが原 因と考えられる.

同図(e)に総損失を示す.磁石渦電流損と鉄損が低減さ れたことから, IPM モータが最も損失が小さい.

同図(f)は効率特性である.トルク特性は悪化したが,磁 石渦電流損と鉄損の低減効果の方が大きいため, IPM モ ータの効率が最も高い.なお,定格トルクにおける効率は 92.8%であり,目標値には僅かに及ばなかった.

### 4. IPM モータにおける磁石分割の効果

前章の検討結果から、磁石渦電流損の低減には IPM 構 造が最も効果が高いことが明らかとなった.また、周方向 に磁石を分割することも、磁石渦電流損の低減に対して、 ある程度効果があることがわかった.そこで本章では、 IPM モータの磁石を周方向に分割することで、効率のさ らなる向上を狙う.

Fig. 4(a)と(b)に, 磁石を周方向に分割した場合としなか った場合の IPM モータの基本構成を示す. なお, 同図(a) のモータは Fig. 2(a)と同一である.



 $\label{eq:Fig.3} Fig. \ 3 \ \ \ \ Comparison \ of \ calculated \ characteristics \ of \ the \ SPM, \ IPM, \ and \ InPM \ motors.$ 



(b) Divided **Fig. 4** Schematic diagram of the IPM motor with and without magnet division.

Fig.5に、磁石を周方向に分割した場合としなかった場合の IPM モータの諸特性の算定結果を示す. 同図(a)のトルク特性を見ると、分割した方が僅かに劣っている. これは周方向に分割したことで、磁石表面積が減ったことと、磁石磁束を短絡する経路が増えたことで、トルクに寄与する磁石磁束が減ったことに起因する. 同図(b)の銅損特性も分割した方が若干大きい.

一方,同図(c)の磁石渦電流損と同図(d)の鉄損について は,分割した方が小さい.また,同図(e)の総合損失も分 割した方が僅かではあるが小さくなっている.その結果, 同図(f)の効率も若干ではあるが,分割した方が高い.定格 点における効率は93.1%であり,目標値を僅かに上回った. なお,Fig.4(a)の磁石を分割しない IPM モータの場合,回 転子表面の鉄心とバックヨークは物理的に切り離されて しまっているが,同図(b)のように分割することで鉄心が つながり一体となるため,製作性という観点からも同図 (b)の IPM モータは優れていると言える.



Fig. 5 Comparison of characteristics of IPM motor.

Transaction of the Magnetics Society of Japan (Special Issues) Vol.4, No.1, 2020

## 5. まとめ

以上,本稿ではサーバ冷却用ファンモータとして一般的 なアウターロータ型の PM モータに関して,回転子構造の 観点から高効率化の検討を行った.

まず, SPM, IPM, および InPM の3 種類の PM モー タについて, 3D-FEM を用いて諸特性の比較検討を行っ たところ, 磁石渦電流損の低減には IPM 構造が最も効果 的であることが明らかとなった.また, 周方向に磁石を分 割することも, ある程度効果があることがわかった.

次いで、さらなる高効率化を狙って、IPM モータの回 転子磁石を周方向に分割した場合の特性について算定を 行た.その結果、わずかではあるが、磁石渦電流損と鉄損 が低減され、目標である効率 93%以上を達成した.

今後は、本 IPM モータの試作試験を行う予定である.

## References

- J. F. Gieras, D. Chojnowski, and P. Mikulski: Analysis of Steady-State and Transient Performance of Two-Phase PM Motors for Computer Fans, *IEEE IEMDC*, 624, (2015).
- Chun-Lung Chiu, Yie-Tone Chen, You-Len Liang, and Ruey-Hsun Lian: Optimal Driving Efficiency Design for the Single-Phase Brushless DC Fan Motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 46, 1123, (2010).
- A. Lelkes, J. Krotsch, R. W. DeDoncker: Low-noise external rotor BLDC motor for fan applications, *IEEE Industry Applications Conference* (37<sup>th</sup> IAS Annual Meeting), 2036, (2002).

#### 2019年10月10日受理, 2019年12月3日採録