セグメント構造アウターロータ型高速 PM モータに関する検討

Outer-Rotor-type High-Speed PM motor with Segmented-shaped Rotor

櫻井 将[†],内山裕太郎,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[†], Y. Uchiyama, K. Nakamura

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

Cooling fans are widely used in communication base station servers since they have a good balance between performance and cost. Cooling fan motors generally have an outer rotor structure because the fan can be directly mounted on the rotor. However, the outer-rotor-type motor has a low degree of freedom in design since the rotor core is thin. Therefore, most of the cooling fan motors have a surface permanent magnet (SPM) structure, and thus, it has ferrite magnets to prevent eddy current losses in magnets and cannot use a reluctance torque. This paper presents a novel outer-rotor-type high-speed PM motor with a segmented-shaped rotor. It can efficiently use reluctance torque in addition to magnet torque, and reduce eddy current loss in magnets even though the rotor has sintered Nd-Fe-B magnets. The usefulness of the proposed motor is proved by comparing it with an inset PM motor using a three-dimensional finite element method (3D-FEM) and prototype tests.

Key words: Permanent magnet (PM) motor, segmented-shaped rotor, cooling fan

1. はじめに

第5世代移動通信システム(5G)の進展とともに、大量 の情報を高速で処理する必要性から、通信基地局サーバの 増強が進められている.具体的には、CPU 自体の性能向 上、並列処理、高密度実装などが行われているが、性能向 上とともにサーバ内の局所発熱が深刻化しており、冷却装 置の性能向上が喫緊の課題となっている.

種々の冷却装置の中で冷却ファンは、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ため、現在 幅広く利用されている.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、サーバ内の冷却装置とし て適する.冷却ファンの性能向上には風量と風圧の増大が 必要であるが、そのためには駆動用モータの高出力化が欠 かせない.一方で、モータの高速回転化、高トルク化によ り、モータ自体の発熱増大が懸念されることから、損失の 低減、すなわち高効率化も必要不可欠である.しかし、従 来の冷却ファン用モータはコスト低減が最優先事項であ ったことから、高性能・高効率化に関する研究はあまりな い¹⁾⁻³⁾.加えて、冷却ファン用モータはアウターロータ型 が一般的であるため、回転子鉄心が薄く、形状自由度が低 いという設計上の難点もある.

上述の問題に対して、筆者らは、冷却ファン用の永久磁石(PM)モータの高出力化と高効率化を両立するため、 ネオジム焼結磁石を採用し、さらに磁石を周方向に分割して、回転子鉄心内に浅く埋め込むことで、磁石に生じる渦 電流損を低減する構造を考案した.有限要素法(FEM)に よる解析と試作の結果、考案した埋込磁石構造のPMモー タは90%近い効率を達成した⁴⁾⁻⁵⁾.

一方で,いつかの課題も明らかになった.それは,埋込 磁石構造でありながら,表面磁石構造とほぼ同じ回転子構 造のため,リラクタンストルクが活用できないこと,また, 磁石の使用量が多く高コストであることである。

本論文では、上述の新しい課題を解決するため、新たに 周方向に磁石と鉄心を分割して並べた、セグメント構造の アウターロータ型 PM モータを提案する.提案機は磁気的 突極性を有するため、リラクタンストルクの利用が可能で あり、また電機子磁束がほとんど磁石に流入しないため、 磁石渦電流損も極め低い.さらに、磁石使用量も削減でき る.提案機の有用性について、FEM と実証実験の両面から 検討を行ったので報告する.

2. セグメント PM モータの特性算定と比較

2.1 比較検討に用いた PM モータ

Fig.1に、一般的な冷却ファン用 PM モータの基本構成 を示す.3相4極6スロットの集中巻のアウターロータ型 であり、永久磁石は回転子表面に張り付けられている.同 図から明らかなように、アウターロータ型は回転子鉄心が 薄く、形状自由度が低い.そのため、インナーロータ型で は一般的な、埋込磁石構造によるリラクタンストルクの有 効利用は難しい.また、冷却ファン用モータの定格回転数 は10,000 rpm 前後であるため、導電率が比較的高いネオ ジム焼結磁石を用いると、非同期の高調波磁束に起因した 大きな渦電流損が生じる.そのため、コスト優先であれば フェライト磁石が、性能優先であればネオジムボンド磁石 が一般に用いられる.

Fig. 2 に、本論文で提案するセグメント構造のアウター ロータ型 PM (Segment PM) モータの基本構成と諸元を 示す.回転子は、周方向に並んだ磁石と鉄心からなるセグ メント構造であり、磁気的突極性を有することから、マグ ネットトルクに加えてリラクタンストルクも利用できる. また同図に示すように、磁石は周方向に着磁され、同極同 士が向かい合うように配置されるため、d 軸が鉄心中央を

Corresponding author : S. Sakurai (e-mail: sho.sakurai.q2@dc.tohoku.ac.jp).

向き, q 軸は磁石中央を向く. これにより, 電機子磁束は 磁石にほとんど流入しないことから, ネオジム焼結磁石を 用いることができ, マグネットトルクの増大も期待できる. なお, 本モータの定格回転数は 30,000 pm とした. これは 冷却ファン用モータの高出力化を考えた場合, 高速回転化 が必須になるためである.

Fig. 3には、比較に用いたインセット構造のアウターロ ータ型 PM (InPM) モータを示す.固定子は Segment PM モータと同一とし、回転子構造のみが異なる.Fig. 1に示 した一般的な表面磁石構造では無く、回転子鉄心を突極構 造にすることでリラクタンストルクの利用を狙う.一方で、 本モータの d 軸は一般的な PM モータと同様に磁石中央を 向くことから、電機子磁束が磁石に流入し、その高調波成 分に由来する渦電流が生じるため、ネオジム焼結磁石の利 用は不可である.そこで本論文では、代わりにネオジムボ ンド磁石を用いる.

以降では、3次元 FEM を用いて Segment PM モータと InPM モータの諸特性の比較を行う. なお、FEM には (株)JSOL の JMAG Designer Ver 19.1 を用いた.



Fig. 1 Schematic diagram of a conventional cooling fan motor.



Fig. 2 Specifications of a proposed segment PM motor.



Fig. 3 Specifications of an InPM motor used for comparison.



Fig. 4 Flux lines diagram of the segment PM motor generated by only armature current.

Fig. 4 は, Segment PM モータにおいて,磁石を空気に 置き換え,電機子電流由来の磁束のみを示した磁束線図で ある.この図を見ると,電機子磁束の大半は回転子鉄心を 通り,磁石にはほとんど流入していないことがわかる.し たがって,提案の Segment PM モータはネオジム焼結磁 石を用いることができる.

2.2 諸特性の算定結果の比較

Fig. 5 に,前節で述べた 2 種類の PM モータのトルク特 性の算定結果を示す.この図を見ると,定格トルク時の電 流密度は Segment PM モータが約 6 A/mm², InPM モー タが約 7.3 A/mm² であり, Segment PM モータの方がトル クが優れていることがわかる.

Fig. 6(a), (b)には、定格トルク付近における電流位相角 対トルクを示す. この時の電流密度は Segment PM モー タが 6 A/mm²であり, InPM モータが 7.3 A/mm²である. ここで、マグネットトルクに着目すると、両者はほぼ等し いことがわかる. すなわち、Segment PM モータの方が磁 石磁束が大きいことがわかるが、これはより強力なネオジ ム焼結磁石が利用できているためである.

また, Segment PM モータは電流位相角 15 deg で最大 トルクが得られ, このときの総トルクに対するリラクタン ストルクの割合は約 7%であった.一方, InPM モータは 電流位相角がほぼ 0 deg でトルクが最大となるため, 総ト ルクに対するリラクタンストルクの割合はほぼ 0%である. Fig. 3 に示したように, 回転子鉄心を突極構造にすること でリラクタンストルクの利用を狙ったが, 狙い通りには行 かないことが明らかとなった.なお, 両モータの突極比は, Segment PM モータが 2.2, InPM モータは 1.1 であった.

以上,提案の Segment PM モータはネオジム焼結磁石 の利用によるマグネットトルクの増大に加えて,セグメン ト構造に由来するリラクタンストルクの利用によって,ト ルク特性が向上したことが明らかとなった.

次いで,損失特性の比較を行う. Fig. 7(a)に銅損 W_cを示 す. 銅損は以下の式から算出した.

 $W_c = R I_{rms}^2$



Fig. 5 Comparison of calculated torque characteristics.



Fig. 6 Current phase angle vs. torque characteristics.

上式中のRは巻線抵抗,Imsは巻線電流の実効値である. Segment PM モータの方がトルク特性が優れるため,同一 トルクに対する銅損も小さい.

Fig.7 (b)は鉄損 Wiである.鉄損は 3D-FEM で求めた各要素の磁束密度波形から, (2)式に示すスタインメッツの実験 式に基づき鉄損を求め,これら各要素の鉄損の総和をモー タ全体の鉄損として求めた.

$$W_i = A_h B_m^2 f + A_e B_m^2 f^2 \tag{2}$$

上式中の A_h はヒステリシス損係数, A_e は渦電流損係数, B_m は磁東密度, fが周波数である.同図を見ると, Segment PM モータの方の鉄損がわずかに大きいが, ほとんど差は 無いことがわかる.

同図(c)は磁石渦電流損 Wem である. この図を見ると, Segment PM モータはネオジム焼結磁石を用いているに も関わらず,磁石渦電流損が極めて小さい. これは Fig. 4



に示したように、電機子磁束がほとんど磁石に流入しない ためである. なお、InPM モータはネオジムボンド磁石を 用いているため、磁石渦電流損はゼロである.

Fig. 8 に効率特性の比較を示す. ここで 3D-FEM におけ る効率は,次式を用いて計算した.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + W_c + W_i + W_{em}} \times 100 \ (\%) \tag{3}$$

上式の Pout は機械出力であり、回転角速度と平均トルクの 積で与えられる. なお、機械損は無視した. 同図を見ると、 軽負荷領域では両モータの効率はほぼ等しいが、負荷の増 大に伴い、トルクおよび銅損ともに優れる Segment PM モ ータの方が高効率となることがわかる. なお、定格トルク 時の効率の計算値は 96%である.

3. セグメント PM モータの試作試験

前章の検討により,提案の Segment PM モータは良好 なトルク特性と効率特性を有することが明らかとなった ことから,提案機の試作試験を行った.

Fig. 9に、試作した Segment PM モータを示す.本モー タはアウターロータ型であり、モータケースを固定するこ とができないため、同図(a)、(b)に示すように、代わりに モータ固定用の治具を設けている.また、同図(c)に示すよ うに、試作機の磁石は円弧形状では無く、製作性とコスト の観点から四角形状とした.また、内周側には回転子鉄心 にツバを設け、磁石の脱落を防いでいる.なお、同図には 示されていないが、外周側にはケースがあるため、磁石が 遠心力で外れることは無い.

Fig. 10 に、外部動力を用いて本モータの回転子を 30,000 rpm で駆動したときの無負荷誘起電圧波形を示す.



(a) Appearance of the prototype segment PM motor







Fig. 10 Comparison of calculated and measured back EMF waveforms at 30,000 rpm.



Fig. 11 Experimental setup.

この図を見ると、3D-FEM の計算値に対して実測値が小 さいことがわかる.これは磁石特性のバラつきや着磁不良 などが原因として考えられる.そこで以降の 3D-FEM の 計算値は、この結果に基づき磁石の保磁力を 85%に減じて 再計算したものを示す.

Fig. 11 に実験システムの外観を示す. 3 相 PWM インバ ータには直流電源から 48 V を供給し,モータはセンサレ ス電流ベクトル制御で駆動する.モータの回転数は 30,000 rpm 一定に制御し,ヒステリシスブレーキで任意の負荷を 加え,その時の電気入力やモータ電流などをパワーアナラ イザで測定し,各種特性を求めた.

Fig. 12 に、トルク特性を示す. この図を見ると、試作 機のトルク特性はほぼ設計通りであることがわかる. なお、 トルク特性の切片が異なるのは、FEM では機械損などを 無視したためである.

Fig. 13(a)に銅損を示す. この図を見ると, トルク特性 が等しいため, 銅損特性もほぼ等しいことがわかる. 同図 (b)は, 銅損以外の鉄損 W_i, 磁石渦電流損 W_{em}, 機械損 W_m の合計値である. ただし, これらを直接実測することは困 難であるため, 以下の式から求めた.

 W_i + W_{em} + W_m = P_{in} - P_{out} - W_c
 (3)

 ここで P_{in} は電気入力, P_{out} は機械出力である.一方,

 3D-FEM では機械損を無視しているため,計算値は鉄損

 W_iと磁石渦電流損 W_{em}の和である.この図を見ると,実測

 値の方が 13 W 程度大きいことがわかるが,両者の差の主

 たる要因は機械損と推察される.特に,試作機は Fig. 9(b)









Fig. 13 Comparison of loss characteristics.



Fig. 14 Comparison of efficiency.

に示したように、片持ち梁構造になっているため、治具側 のベアリングに大きな荷重がかかり、機械損が通常よりも 増大した可能性が考えられる.

Fig. 14 に効率特性を示す.上述の損失の影響で効率の 実測値は計算値に対して大きく低下したが,定格点 (30,000 rpm, 60 mN·m)の効率は88.5%に達した.

4. まとめ

以上,本論文ではセグメント構造の回転子を有するアウ ターロータ型 PM モータを提案するとともに, 3D-FEM と 実証実験の両面から検討を行った.

まず始めに、3D-FEM を用いてモータ特性を算定した結 果,提案の Segment PM モータはネオジム焼結磁石の利 用によるマグネットトルクの増大に加えて、セグメント構 造に由来するリラクタンストルクの利用も可能であり、優 れたトルク特性を有することが明らかとなった.また、ネ オジム焼結磁石を用いているにも関わらず、電機子磁束が ほとんど磁石に流入しないため、磁石渦電流損が極めて小 さいことが明らかとなった.

次いで,提案の Segment PM モータの試作試験を行っ た結果,提案機はほぼ設計通りのトルク特性を有すること が明らかとなった.一方で効率は機械損などの影響もあり, 設計値を下回った.ただし,本モータは小型であり,回転 数も 30,000 rpm と極めて速いことを勘案すると,実機で 90%近い効率が得られたことは,所期の目標をある程度達 成できたと結論付けることができる.

今後は、本モータのさらなる効率向上を目指して、機械 損の低減などに取り組む予定である.

References

- J. F. Gieras, D. Chojnowski, and P. Mikulski: *IEEE IEMDC*, 624 (2015).
- Chun-Lung Chiu, Yie-Tone Chen, You-Len Liang, and Ruey-Hsun Lian: *IEEE Trans. Magn.*, 46, 1123 (2010).
- A. Lelkes, J. Krotsch, R. W. DeDoncker: *IEEE Industry* Applications Conference (37th IAS Annual Meeting), 2036 (2002).
- S.Sakurai, K.Nakamura: T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues), 4, 72 (2020).
- S. Sakurai, K. Nakamura: J. Magn. Soc. Jpn., 45, 70 (2021).

2021年10月04日受理, 2021年11月11日採録