

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03955

研究課題名(和文) 60000 rpm, 50 kWの出力を持つ大容量高速ベアリングレスモータの開発

研究課題名(英文) Development of a High Speed and High Power Bearingless Motor with 60000 rpm and 50 kW

研究代表者

竹本 真紹 (Takemoto, Masatsugu)

北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：80313336

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：近年、省エネルギー・省資源対策などから、モータへの高効率化・高出力化の要望が年々高まっている。その解決策として注目されているのがモータの高速化である。特に、大容量モータの高速化への要望は極めて強い。そこで、電動機と磁気軸受の機能を一体化したベアリングレスモータが注目されている。

本研究では、損失密度に基づいたベアリングレスモータの構造最適化を行い、大容量高速ベアリングレスモータを実現するために欠かせない低損失密度を実現できる構造を提案した。そして、大容量高速ベアリングレスモータの試作機を開発し、提案構造の有効性を実験により検証した。

研究成果の概要(英文)： In recent years, from the viewpoint of energy saving, demands for higher efficiency and higher output to electric motors are increasing year by year. The solution to this demand is to speed up the motor. In particular, there is a strong demand of high rotation speed for large output motors. Therefore, bearingless motors (BelMs), which integrates functions of an electric motor and a magnetic bearing, have been proposed and developed.

This research proposed the novel structure realizing low loss density, which is essential for a high speed and high power bearingless motor, by means of optimizing the structure of the bearingless motor based on loss density. In addition, the prototype machine with the proposed structure was developed, and the effectiveness of the proposed structure was verified by experiment and analysis.

研究分野：電気機器

キーワード：省エネルギー 省資源 高速回転 大容量 磁気浮上 ベアリングレスモータ

1. 研究開始当初の背景

近年、省エネルギー・省資源対策などから、モータへの高効率化・高出力化の要望が年々高まっている。その解決策として注目されているのがモータの高速化である。大型の空調や冷凍設備といった大容量のターボ機械では、高速化することによるシステムとしての高効率化・小型化の効果が非常に高いため、大容量モータの高速化への要望は極めて強い。

そこで、電動機と磁気軸受の機能を一体化したベアリングレスモータが研究されている。ベアリングレスモータは、単体でトルクの発生と回転子主軸の非接触磁気支持を同時に実現し、機械ベアリングや磁気軸受などの回転子主軸を支持するための構造を必要としない。従って、高速化、高出力化、メンテナンスフリー化といった磁気軸受の利点に加えて、電動機と磁気軸受を併用した場合よりもコストダウン、小型化、軸長の短縮による危険速度の向上、すなわち、さらなる高速化などが期待される。このように、ベアリングレスモータは、近年高まっているモータへの高速化・高出力化の要求を、磁気軸受を用いた場合よりも低コストで実現できる非常に付加価値の高いモータである。

ベアリングレスモータは、このような優れた利点を備えているため、ダルムシュタット工科大学、スイス工科大学 (ETH)、シェフィールド大学、韓国国立研究所、東京工業大学、茨城大学、静岡大学、立命館大学などの研究グループ、さらには、Robert Bosch GmbH (ボッシュ) 社、Sulzer 社、(株) 荏原製作所などの企業に所属する国内外の研究者によって、盛んに研究・開発されている。

一方、大容量の高速モータは、一般的に出力密度が高くなるため、それに伴い、損失密度も高くなり、モータの発熱が大きな問題となっている。そして、ベアリングレスモータは、通常のコモータに比べて高速化が容易であるため、出力密度は非常に高くなることから、発熱はより大きな問題となる。したがって、大容量高速ベアリングレスモータを実現するには、この発熱の問題を解決できる、すなわち、低損失密度化を実現できるモータ構造が必要となる。しかし、大容量高速ベアリングレスモータに対応できる適切なモータ構造は提案されていない。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、損失密度に基づいたベアリングレスモータの構造最適化を行い、大容量高速ベアリングレスモータを実現するために欠かせない低損失密度を実現できる構造を提案する。その際、提案モータの設計手法の確立も行う。そして、実際に、大容量高速ベアリングレスモータの試作機を開発し、提案構造の有効性を実験により検証する。

3. 研究の方法

以下の項目について、設計・解析・実験・検討及び考察を実施して行った。

- (1) 大容量に対応できる損失密度に基づいたモータ構造の最適化とその設計手法の確立
- (2) 確立した設計手法を用いた、50 kW 大容量高速ベアリングレスモータの設計と試作機の製作
- (3) 50 kW の大容量高速ベアリングレスモータを運転するためのドライブシステムの製作
- (4) 50 kW 大容量高速ベアリングレスモータの試作機の実験による提案モータの構造や設計手法の有効性の検証

4. 研究成果

4.1 提案構造

表 1 は、上記項目 (1) の検討を行うにあたり設定した要求仕様を示す。要求出力は 50 kW という大容量とし、その出力密度は 15 kW/L という非常に高い値を設定した。そして、回転速度は 60000 rpm という高速回転とした。

Table I. Target performance of the BelM

Target performance	
Rotational speed	60000 r/min
Output power (2 units)	Above 50 kW
Output power density	Above 15 kW/L
Suspension force per one unit	Above 70 N
Loss density	Less than 600 W/L
Rated motor current density	6 A/mm ²
Rated suspension current density	8 A/mm ²

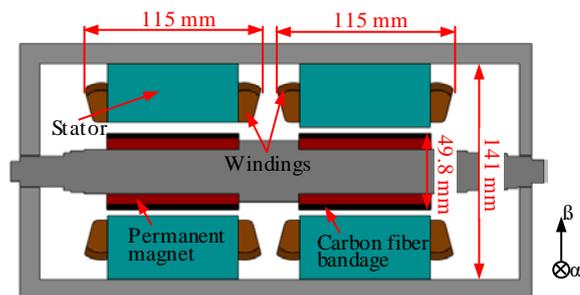


Fig. 1. Cross-section view of a BelM with rated power density of 15 kW/L at 60,000 r/min.

Table II. Specification of the BelM per one unit

Stator outer diameter	141.0 mm
Rotor outer diameter	49.8 mm
PM thickness	7.4 mm
CF-bandage thickness	3.0 mm
Shaft length per unit	115.0 mm

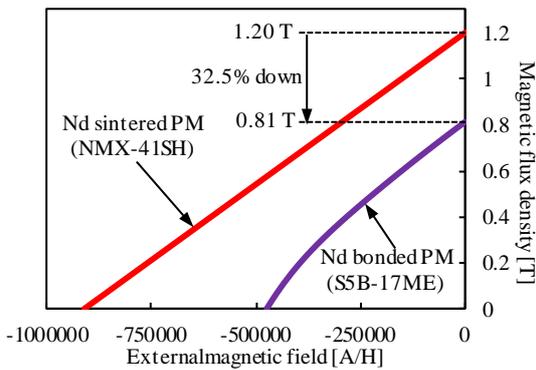


Fig. 2. B - H curves of Nd sintered (NMX-41SH) and Bonded (S5B-17ME) PM.

完全非接触による磁気浮上運転を実現するために、図 1 に示すように、2 つのベアリングレスモータユニットをタンデムに接続する構成とした。

したがって、60000 rpm という高速回転を実現するには、回転子シャフトの 1 次曲げ周波数が、1 kHz を十分な安全率を持って上回らないといけな。したがって、コイルエンドを含む 1 ユニットあたりのベアリングレスモータの全長は 115 mm 以下に制限される。115 mm に全長が制限される中で分布巻き固定子を採用することは、出力の低減を招くため、提案構造では、集中巻き固定子を採用することとした。

また、高速回転における損失密度を抑制するために、0.1 mm 厚の電磁鋼板であるスーパーコア 10JNEX900 を固定子コアに採用した。表 2 に 1 ユニットあたりの提案モータの諸元を示す。

さらに、提案モータでは、大容量高速モータで一般的に採用されるネオジム焼結磁石の代わりに、磁石内に発生する渦電流損を抑制できるネオジムボンド磁石を採用することにした。図 2 は、磁石温度 80°C におけるネオジム焼結磁石 (NMX-41SH, Hitachi Metal, Ltd.) とネオジムボンド磁石 (S5B-17ME, Aichi Steel Co., Ltd) の B - H 曲線を示す。

ネオジムボンド磁石の残留磁束密度は、ネオジム焼結磁石に比べて 32.5% 低い。したがって、ネオジムボンド磁石を採用することによって発生するトルクと軸支持力の低下を抑制するために、提案モータでは磁気ギャップ長を短くする。ネオジム焼結磁石を用いる一般的な大容量高速モータでは、磁石内に発生する渦電流損を抑制するために、磁気ギャップ長は長くする必要がある。一方、ネオジムボンド磁石は、低い電気伝導率を備えているため、磁石内に発生する渦電流損を強く抑制できるため、磁気ギャップ長を短くしても渦電流損はほとんど発生しない。

4.2 提案構造の有効性の検討

提案構造の有効性を検討するために、分布

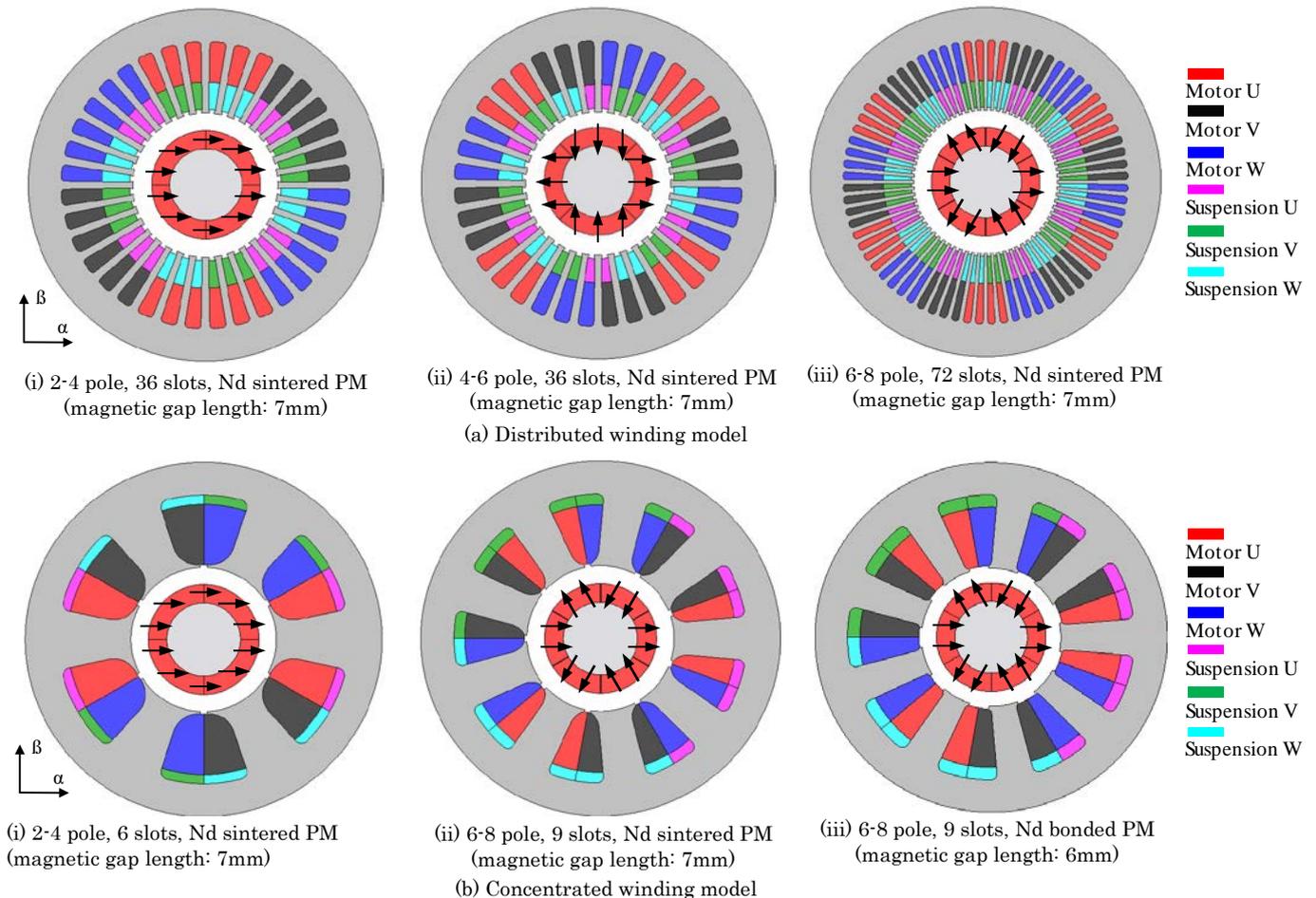


Fig. 3. Cross-section view from the axial direction of comparative analysis models of bearingless motors.

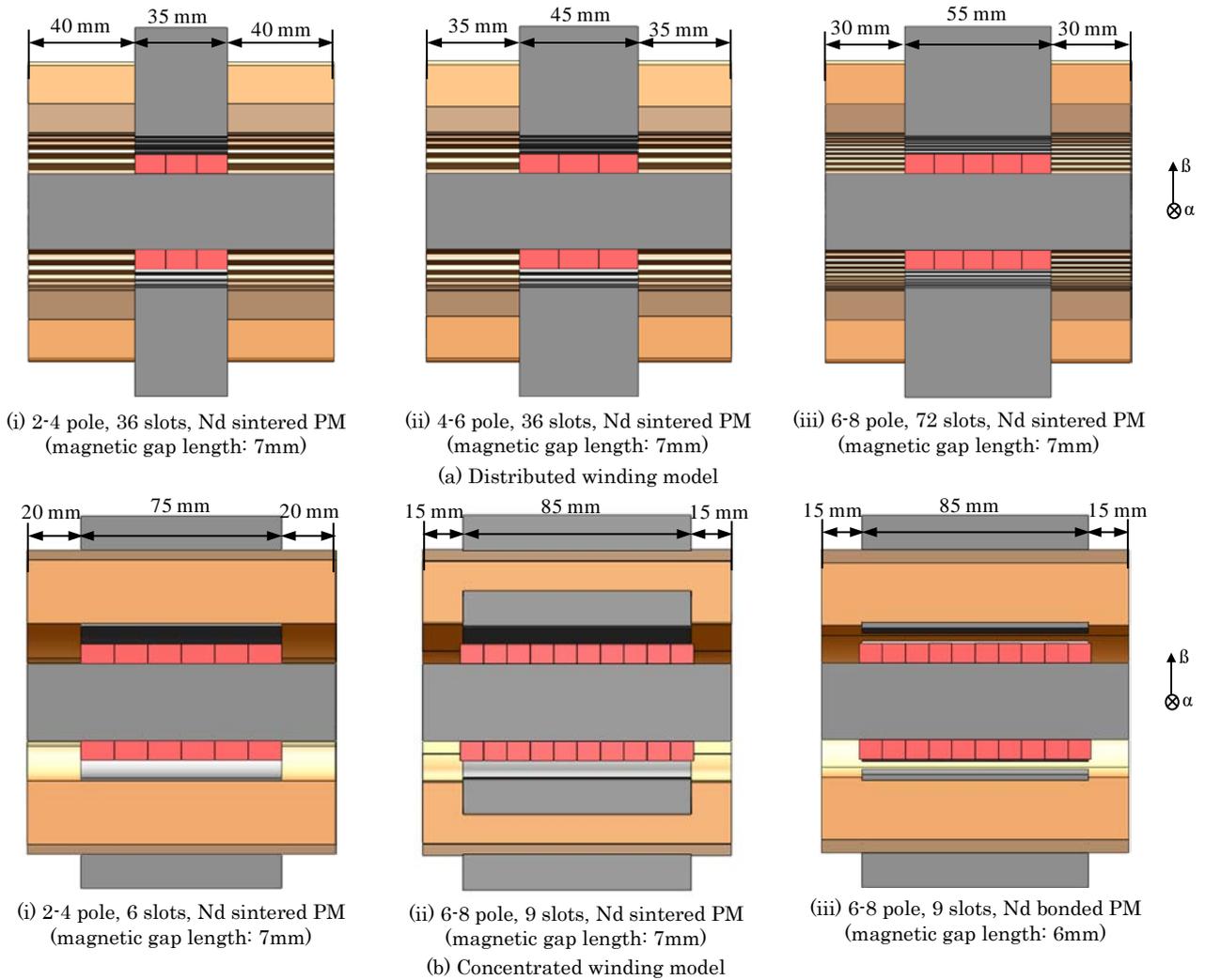


Fig. 4. Cross-section view from the radial direction of comparative analysis models of bearingless motors.

巻き固定子，集中巻き固定子，ネオジム焼結磁石，ネオジムボンド磁石の4つの要素を変更した6個のモデルについて解析を実施した。これらの6個のモデルの解析は，表2に示す諸元と表1に示す電流密度で実施した。

図3と図4は，それぞれ6つの解析モデルの構造を示す。4.1節で説明したように，提案構造は，ネオジムボンド磁石を備えた6極電動機・8極軸支持構造であり，9スロット

集中巻固定子を持つ。そして，6mmという短ギャップ長である。

図5は，6個の解析モデルのトルクと軸支持力の解析結果を示す。軸支持力は約70Nで等しい値となっている。そして，集中巻固定子のモデルは，コイルエンドが短いためコアの積層厚を大きくすることができることから，分布巻固定子のモデルより大きなトルクを発生できる。すべてのモデルの中で，ネオジム焼結磁石を備えた6極電動機・8極軸支持構造の9スロット集中巻固定子のモデルが5.50Nmで最大のトルクとなっている。そして，ネオジムボンド磁石を備えた6極電動機・8極軸支持構造の9スロット集中巻固定子の提案モデルが4.43Nmで二番目に大きなトルクになっている。ネオジムボンド磁石を用いているにもかかわらず，提案モータは磁気ギャップ長を短くすることで，二番目に大きなトルクである。

図6は，6個の解析モデルの各損失の解析結果を示す。電動機の極数が増加するにつれて駆動周波数が増加するため，固定子の鉄損が大きくなっていることが確認できる。また，風損は，全体の構成の中でベアリングレスモータ部分が支配的であるため，積層厚が長くなる集中巻固定子において大きくなって

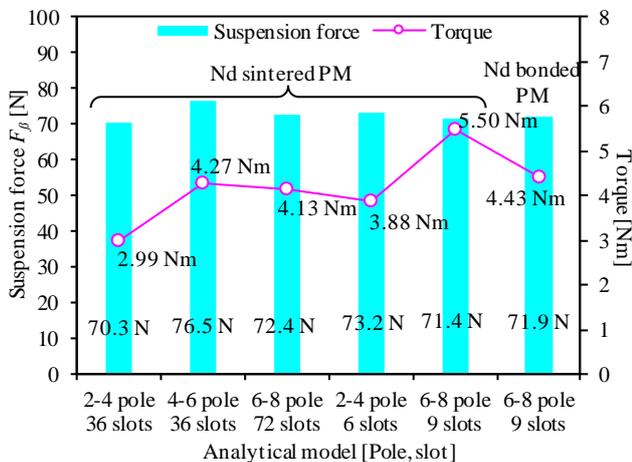


Fig. 5. Analysis results of suspension force and torque at rated speed of 60,000 r/min.

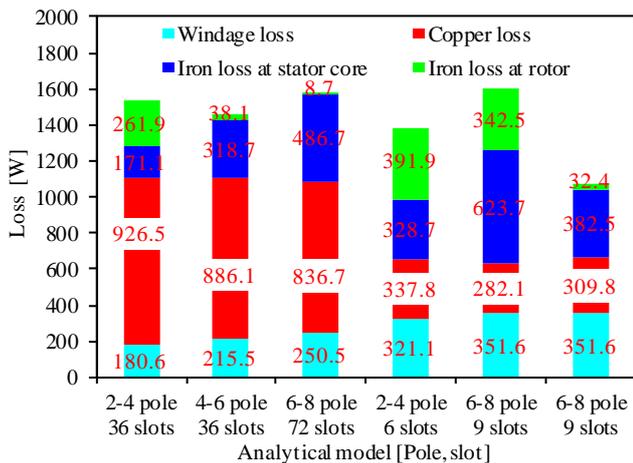


Fig. 6. Analysis results of losses at rated rotation speed of 60,000

いる。一方、銅損は、コイルエンドが短い
ため、分布巻き固定子より集中巻き固定子
において小さくなっている。そして、ネオジ
ム焼結磁石を用いる二つの集中巻き固定
子のモデルでは、渦電流損が非常に大き
いため、回転子の鉄損が特に大きい。し
たがって、提案モータのモデルは、6個
の解析モデルの中で全損失が最小となっ
ている。

図7は、6個の解析モデルの回転子損失
密度、モータ全体の損失密度、出力密度
をそれぞれ示す。分布巻き固定子のモデ
ルは、銅損が大きいためどのモデルもモ
ータ全体の損失密度が高い。また、ネオ
ジム焼結磁石を用いた集中巻き固定子の
モデルは、回転子損失密度が3 kW/L以
上と極端に高い。提案構造を含む3つ
のモデルにおいて、表1に示す15 kW/L
以上の出力密度を達成している。しかし
、提案構造以外の2つのモデルでは、表
1に示す大容量高速運転を連続して実
現することはできない。なぜなら、モ
ータ全体の損失密度が800 W/L以上
となっており、冷却できないからであ
る。したがって、提案構造のみが、モ
ータ全体の損失密度が600 W/L以下
となっており、そして、回転子損失密
度が252.8 W/Lと低い値になってい
るため、大容量高速運転を連続して実
現可能である。

図8は、6個の解析モデルの1ユニット
あたりの出力と総合効率をそれぞれ示す
。4個の解析モデルが目標値を上回る1
ユニットあたり25 kW以上の高出力とな
っている。ネオジム焼結磁石を備えた
6極電動機・8極軸支持構造の9スロ
ット集中巻固定子のモデルが1ユニ
ットあたりの出力が34.6 kWとなり
最大である。しかし、上述したように
、提案構造のみが、1ユニットあたり
25 kW以上の高出力を実現しながら
、モータ全体の損失密度が600 W/L
以下となっており大容量高速運転を
連続して実現可能である。したがって
、提案構造の効率は96.3%となり、
6個のモデルの中で最も高効率となっ
ている。これは、回転子の鉄損が小さ
く、各損失のバランスが良いからであ
る。

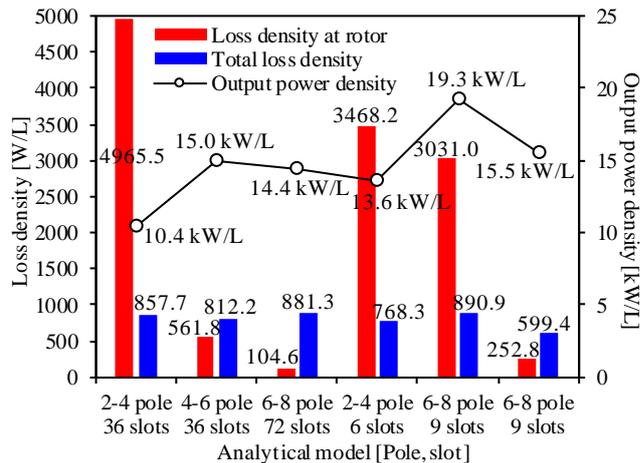


Fig. 7. Analysis results of loss density and output power density at rated rotation speed of 60,000 r/min.

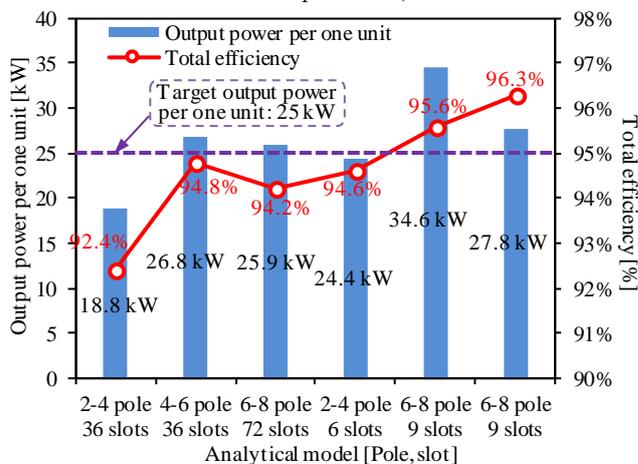


Fig. 8. Analysis results of output power and total efficiency at rated rotation speed of 60,000 r/min.

4.3 提案構造を用いた試作機の製作および実験による有効性の実証

前節で示した構造最適化に基づいて導出
した「ネオジムボンド磁石を備えた6極
電動機・8極軸支持構造の9スロット集
中巻固定子の提案構造」の有効性を検
証するために、試作機を製作した。そ
の際、モータ各部の詳細設計について
、パラメータ最適化を実施し、提案
構造の設計手法を確立した。

次に、提案する大容量高速ベアリング
レスモータの駆動周波数は、60000
rpmの回転速度において3 kHzと高周
波になる。そのため、高周波スイッチ
ングが可能な次世代半導体デバイス
であるSiC-MOSFETを用いた高性能
ドライブシステムを製作した。その際
、コントローラとして、高速演算が可
能なTI社製のTMS320C6657 (1.25
GHz)という高性能DSPも採用した。
高性能DSPとSiC-MOSFETの採用
により、3 kHzという高周波におい
ても高精度な電流制御が可能となっ
ている。

製作した試作機および高性能ドライ
ブシステムを用いて実機試験を実施し
た。前述したように、試作機は2ユニ
ットをタンドムに接続した構造となっ
ているため、1ユニットをモータ動作
させ、残りの1ユニットを発電動作
させることで、通常実施することが難
しい、高速回転下での実負荷試験を
試作機単独

で実施することが可能な構造となっている。この特長を活用することで、高速回転下における試作機の運転性能と冷却装置によるモータ内の各所の冷却性能の測定を実施した。さらに、測定結果と解析結果について、比較・検証を行い、提案構造と設計手法の有効性を明らかにした。

加えて、試作機は、高速回転を実現するために、低インダクタンスとなっていることから、インバータのスイッチングによるリップル電流が通常の回転速度で回転させる一般的なモータに比べて、原理的に大きくなる。この結果、電流リップルの増加によりスイッチング成分の鉄損が増大し、その分、高速回転機で大きな問題となる発熱が大きくなる。そこで、SiC-MOSFETを用いた高性能ドライブシステムにより試験を実施し、スイッチング周波数を向上することで、電流リップルに起因するスイッチング成分の鉄損が抑制可能であり、モータの発熱を低減できることも明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- (1) T. Matsuzaki, M. Takemoto, S. Ogasawara, S. Ota, K. Oi, and D. Matsuhashi, "Operational Characteristics of an IPM-type Bearingless Motor with 2-pole Motor Windings and 4-pole Suspension Windings", in IEEE Transaction on Industry Applications, 査読有, Vol. 53, No. 6, pp. 5383-8392, Nov./Dec. 2017.

[学会発表] (計 4 件)

- (1) Y. Fu, M. Takemoto, S. Ogasawara, and K. Orikawa, "Investigation of a High Speed and High Power Density Bearingless Motor with Neodymium Bonded Magnet," in Proceedings of the 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC2017), Miami, USA, May 2017, 8 Pages.
- (2) 竹本真紹: 「10 万 rpm において高効率を実現する超高速ベアリングレスモータ」, 第 37 回モータ技術シンポジウム (招待講演), 2017.
- (3) 付裕, 竹本真紹, 折川幸司, 小笠原悟司, 千葉明: 「SiC-MOSFET による高スイッチング周波数化による超高速ベアリングレスモータの効率向上に関する検討」, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会講演論文集 vol. 3, No. 3-41, pp. 245-248, 2016.
- (4) T. Matsuzaki, M. Takemoto, S. Ogasawara, S. Ota, K. Oi, and D. Matsuhashi, "Operational Characteristics of an IPM-type Bearingless Motor with 2-pole Motor Windings and 4-pole Suspension Windings", in Proceedings of the 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition

(ECCE 2015), Montreal, Canada, Sept. 2015, pp. 3886-3894.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹本 真紹 (TAKEMOTO MASATSUGU)
北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号: 80313336

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし