



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	高速ベアリングレスモータの効率と出力密度の向上に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	付, 裕
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14285号
Issue Date	2020-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/79601
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yu_Fu_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(工学) 氏名 付 裕

審査担当者 主 査 教 授 小笠原 悟司
副 査 教 授 五十嵐 一
副 査 教 授 北 裕幸
副 査 教 授 竹本 真紹 (岡山大学・大学院自然科学研究科)

学位論文題名

高速ベアリングレスモータの効率と出力密度の向上に関する研究

(A Study on Enhancing Efficiency and Power Density of High-Speed Bearingless Motor)

現在, 高速モータは, ターボ機器や研削スピンドル等に広く用いられている。しかし, 高速回転で機械ベアリングを用いた場合, ベアリング摩擦による損失が大きく, 効率低下や短寿命化, さらには振動による騒音の発生といった問題を引き起こす。そこで, 電磁力によって回転子を完全非接触で浮上回転することが可能なベアリングレスモータ (BelM) の適用が検討されている。しかし, BelM を高速回転させたという報告はあるものの, 温度上昇が激しいという理由から, 負荷状態で連続運転した際の運転特性は未だ明らかになっていないのが現状である。そこで, BelM を高速回転させた時の温度上昇を抑制するには, 低損失化による高効率化が必要不可欠である。さらに, BelM の付加価値を高めるためには, 高速回転時に高効率化に加えて高出力密度化も同時に達成する必要がある。

本論文では, 高効率と高出力密度を同時に達成可能な超高速小容量および高速大容量の 2 種類の BelM に関する研究を実施した。

まず, 第 1 章は序論として高速 BelM に関する研究の社会的背景について述べた。従来の高速 BelM は高速運転領域においてその大きな損失により温度上昇が激しいため, 定格負荷時での実験が行えておらず, 詳細な運転特性が明らかになっていない現状について, 研究事例を挙げて説明した。そして, 本論文の目的として, 高効率と高出力密度を同時に達成可能な超高速小容量および高速大容量の 2 種類の BelM に関する研究を実施する必要があることとそれぞれの目標仕様について述べた。

第 2 章では, まず BelM の固定子・回転子・巻線構造などの基本構成について述べた。そして, 高速 BelM は高回転速度において非接触浮上回転するため, 負荷試験を行うにあたり, カップリングを介して負荷となる発電機などの他の電気機器に接続するのが困難である。そのため, 一つのケース内に 2 つの同じ構造を持つ BelM を同軸上にタンデムに接続した構成とすることで, 高回転速度においても負荷試験の実施が可能となることを説明した。さらに, 負荷試験の実験方法について述べた。また, BelM は従来のモータと異なり, トルクの発生と同時に, 非接触浮上回転に必要な軸支持力を発生する。そこで, 軸支持力の発生原理について詳細に説明した。

次に, 本論文の第一部として, 第 3 章と第 4 章では, 超高速小容量 BelM について述べた。

まず, 第 3 章では, 連続運転で 100,000 rpm, 3.4 kW (1 ユニット 1.7 kW) の出力を達成可能な超高速 BelM の提案構造および設計コンセプトについて説明した。前述の通り, 超高速回転において従来の BelM は損失により温度上昇が激しいため, 提案した超高速小容量 BelM は損失抑制のため

に、固定子鉄損を抑制可能な平行着磁のリング磁石を用いた SPM 構造の回転子、渦電流損を抑制可能な CFRP を使用した磁石飛散防止用の保護リング、空間高調波による鉄損を抑制するために磁気ギャップが 2.5 mm のワイドギャップ構造、低鉄損材料であるスーパーコアを使用した固定子コアなどを採用している。また、超高速回転において問題となる危険速度の低下を防ぐには軸長を短くする必要があるため、コイルエンドが短くできる集中巻線構造とした。一般に、超高速回転において駆動周波数は非常に高くなるため、それに伴い固定子コアに大きな鉄損が発生する。したがって、鉄損抑制のために駆動周波数が最も低くなる 2 極電動機巻線とし、2 極駆動に対して軸支持力を発生するために 4 極軸支持巻線を採用した。また、提案した超高速小容量 BelM の特性を検証するため、3D-FEM 解析を行い、解析結果について詳細に述べた。解析結果より、提案構造は、定格回転速度 100,000 rpm において、1 つのユニットの定格出力が 1.72 kW であり、11.1 kW/L の高出力密度と総合効率が 96.2% の高効率を同時に達成可能であることを示した。

第 4 章は、前章で示した超高速小容量 BelM の設計に基づいて試作機を製作し、定格回転速度 100,000 rpm で実施した負荷試験の結果について述べた。まず、実験で使った試作機、インバータ、コントローラー、測定器などの実験装置と実験システムについて説明した。そして、試作機の損失の内訳を明らかにするために、全速度域における風損の測定を行い、その結果について報告した。また、全速度域において、負荷時と無負荷時での回転子の振れ回り量を測定し、全速度域において安定な非接触浮上回転が達成できたことを実証した。また、電動機巻線と軸支持巻線の INV のスイッチング周波数を 40 kHz に設定して負荷試験を行った結果、解析結果に比べて鉄損が大きく増加していることがわかった。そこで、鉄損増加を抑制するために、実測電流を用いて 3D-FEM 解析を実施し、要因分析を行った。その結果、電動機巻線のスイッチングリップル電流が鉄損増加の原因であることが明らかになった。この鉄損増加の問題を解決するために、電動機巻線の INV のスイッチング周波数を 120 kHz に上昇させて再実験を行った。その結果、連続定格運転時において BelM の 1 ユニットで 1.70 kW の軸出力を発生でき、94.3% の非常に高い総合効率を実験で達成した。この時のモータ温度は 51 °C となり、モータの発熱を十分に抑制できていることも実証した。さらに、INV を含めた電動機システム効率も測定した。電動機システム効率は、スイッチング周波数が 80 kHz の時に最も高くなり、91.0% の高効率となった。100,000 rpm という超高速回転を考慮すると、非常に高いシステム効率を達成したと言える。

最後、本論文の第二部として、第 5 章と第 6 章では、高速大容量 BelM について述べた。

第 5 章では、1 つ目の高速大容量 BelM として、損失密度 600 W/L 以下で、定格回転速度 60,000 rpm において 54 kW の出力となり、15 kW/L の高出力密度を達成する構造を提案し、解析結果により提案構造の有効性を明らかにした。設計コンセプトとして、回転子の軸長が 1 次曲げ周波数に制限されるため、コイルエンドを短くできる集中巻線構造を採用した。そして、高出力密度と低損失密度を両立する構造を探索するため、6 つの BelM のモデルを示し、3D-FEM 解析によって性能比較を行った。その結果、6 極電動機・8 極軸支持巻線構造が最も最適であることを明らかにした。加えて、回転子損失を抑制するため、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を提案した。上記の提案構造により、95.7% の高効率で 15 kW/L の高出力密度を達成できることを解析により示した。そして、損失密度も目標仕様の 600 W/L 以下に抑制できおり、連続運転下においても十分に温度上昇が抑制できると考えられる。

高速大容量 BelM の実用化を推し進めるには、第 5 章で提案した構造より一層のコストダウンを

図る必要がある。そこで、第 6 章では、コストの高い磁石飛散防止用の CFRP を用いずに、低コスト化が可能な回転子表面近傍に磁石を埋め込む回転子 (BPM) 構造について検討を行い、定格回転速度 45,000 rpm において 70 kW の出力となり、22 kW/L の高出力密度を達成する構造について研究を行った。まず、BPM 構造では、磁石を分割し回転子コアに埋め込む構造となっているため、ギャップ磁束密度分布が正弦波形状とならず、方形波形状となる。したがって、集中巻線構造では、トルクリプルや軸支持力リプルが大きくなり、回転子の損失密度も増加する。そのため、回転子に埋め込む磁石の分割数について検討を行い、24 分割モデルにおいて回転子損失密度が最も低くなることを示した。しかし、連続運転可能な目標回転子損失密度を上回っていた。そこで、低損失密度と高出力の両立を実現するため、提案した BelM のワイドギャップ長化、および磁石の着磁方向の最適化について検討および提案を行った。その結果、3.0 mm のワイドギャップ長、および 1 極を構成する 4 個の埋込磁石の内、両側の磁石の着磁方向を半径方向から磁極中央に向けて 52.5 度傾けることが最適であることを明らかにした。その結果、定格回転速度 45,000 rpm において、70.2 kW の高出力を 600 W/L 以下の損失密度で達成できることを示した。この時の出力密度は 22 kW/L であり、総合効率は 97.7% と非常に高い。さらに、力率も 0.9 と高いため、インバータのコストも抑制可能である。以上より、低コストな高速大容量 BelM の構造を示すことができた。

これを要するに、本論文は、高速モータで問題となる機械ベアリングの問題を解決するために注目を浴びている、電磁力によって回転子を完全非接触で浮上回転可能なベアリングレスモータ (BelM) において、高効率と高出力密度を同時に達成可能な超高速小容量および高速大容量の 2 種類の BelM について、それぞれ新たな構造を提案している。従来の BelM は、高速回転させることで高出力密度化はできるものの、損失密度も上昇するため温度上昇が激しく連続運転することができなかった。そのため、低損失化による高効率化と高出力密度化を同時に達成できる新たな BelM の構造が強く求められており、損失密度に基づいて設計された提案構造は、高効率化と高出力密度化を同時に達成できる。加えて、提案構造について、解析的および実験的に検証することで、BelM の高性能化についての新しい知見を得たものであり、電気工学ならびに電気機器分野に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。