HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	磁気浮上技術を用いた大容量・高速回転機に関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	松﨑, 達也
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12201号
Issue Date	2016-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/61859
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Tatsuya_Matsuzaki_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

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　松﨑 達也

審査担当者　主　査　准教授　竹本 真紹
副　査　教　授　五十嵐 一
副　査　教　授　小笠原 悟司

学位論文題名

磁気浮上技術を用いた大容量・高速回転機に関する研究
（Study of Electric Machine System Applying Magnetic Levitation Technology for High Output and High Rotational Speed ）

近年, ビル一棟の集中冷暖房に使用する大型エアコンや倉庫一棟を冷却するための大型冷凍機などに用いられる大容量コンプレッサのシステムなどに対して, 小型化・低コスト化が強く求められている。そこで, 大容量コンプレッサのシステムなどに用いられる大容量モータを高速回転化することが有効な手段として関心を集めている。回転速度を高速化した際に重要になるのが, モータの回転子を軸支持するための軸受システムの選定である。

一般的に, 回転子の軸受として機械軸受が用いられている。しかし, 機械軸受は, 機械的な接触が存在するため, 摩擦・摩耗が発生する。したがって,10,000 rpm 以上の高速回転において, 大容量モータの回転子を大径の機械軸受によって軸支持することは難しい。そこで, 電磁力により完全非接触で回転子を軸支持できる磁気軸受が注目されている。磁気軸受は, 回転速度の高速化・メンテナンスフリー・機械的損失の低減といった利点が得られ, 盛んに研究・開発が行われており, 近年では, 磁気軸受を用いた数百 kW 以上の大容量モータが実用化されている。さらに, 電動機と磁気軸受を 1 つの固定子に一体化したベアリングレスモータ (BelM) は, 磁気軸受の利点に加えて, 小型化といった利点も得られる。このような利点を持つ BelM も, モータの高速回転化のために非常に有用である。

一方, モータに磁気軸受を用いた回転機システムの場合, 完全非接触により軸支持されているため, 回転子と固定子の間に機械的な接触が存在しない。そのため, 磁気軸受の回転子に生じる鉄損による発熱を冷却することは難しい。よって, 磁気軸受における回転子鉄損が大きな問題となる。加えて, 磁気軸受を用いた場合, システムを構成するためのユニット数が増えることから軸長が長くなり, 危険速度が低下してしまう。従って, 低損失化とシステムの小型化が可能な磁気軸受を新たに開発することが求められている。

また, これまでに開発された大容量・高速回転向けの BelM では, 安定な磁気浮上運転を実現するために, パラレル着磁されたリング磁石を用いた表面貼付 (SPM) 型の回転子構造が採用されている。そして, 高速回転において, このリング磁石が飛散するのを防止するために, カーボンファイバ (FRP) がリング磁石の保護材として使用されている。しかし, パラレル着磁されたリング磁石や FRP の製造は高コストである。さらに, リング磁石及び FRP により大きな磁気抵抗が生じるため, 大容量化した際に重量が大きく増す回転子を安定に軸支持するための十分な軸支持力を発生することは難しい。従って, 大容量・高速回転に対応可能かつ低コストな BelM を開発することが求められている。

そこで, 本論文では, 以上の課題を解決するための磁気軸受及び BelM を提案・検討している。まず, 磁気軸受は, 高速回転・大容量・低損失化をキーワードに低損失磁気軸受の検討を行っている。さらに, 組立性の向上, ワイドギャップ長に対応可能な高軸支持力の発生, そして, システムの小型

化をキーワードに,2 種類の 3 軸能動制御型磁気軸受を検討している。最後に, 高速回転・大容量・低コストをキーワードに, 実用に耐えうる BelM についても検討している。

まず, 第 2 章において, 磁気軸受及び BelM を用いた大容量・高速回転機のシステム構成について詳細に説明している。そして, 小型化・低コスト化するために, どのようなシステム構成が良いか議論している。

第 3 章では, 大容量に対応可能かつ低損失化のために,4 つの C 形コアを統合したホモポーラ型ラジアル磁気軸受 (RMB) を提案している。そして,3D-FEA により, 提案構造と従来構造の RMB を比較することで, 従来構造の RMB と同等の軸支持力が発生可能であり, かつ, これまで低損失とされてきた従来構造のホモポーラ型 RMB よりも優れた低損失特性を備えていながら, 低コスト化できることを示している。

第 4 章では, ワイドギャップ長が要求されるシステムにおいて, 回転子を完全な円筒形状とすることで組立性を向上できる 3 軸能動制御型磁気軸受のタイプ A を提案している。これまで, 軸方向を軸支持するためのスラスト磁気軸受 (TMB) には, 一般的に大径のディスク形回転子が用いられているが, このディスク形回転子によってシステムの組立性が大きく悪化することが問題となっている。そこで, 提案する構造では, ディスク形回転子の代わりに円筒形回転子を採用することで, この問題を解決している。そして, ワイドギャップ長においても大きな軸支持力を発生するために, 提案構造では,RMB 機能と TMB 機能を軸方向に一体化して,3 軸能動制御を 1 ユニットで実現している。さらに, システム全体として受動的な TMB 機能も活用することで, 高スラスト負荷への対応を図っている。この提案構造とシステムの有効性を実験的に検証するため, 提案構造を備えた試作機を製作し, 実験によりその有効性を検証している。

第 5 章では, 大容量・高速回転に対応可能かつ第 4 章で示したタイプ A よりもシステムを小型化できる円筒形回転子を備えた 3 軸能動制御型磁気軸受のタイプ B を提案している。提案する構造は, 小型化するために,RMB 機能と TMB 機能を半径方向に一体化することで,3 軸能動制御を 1 ユニットで実現している。まず, 提案構造の原理検証を行うために, 試作機を製作し, 実験により提案構造の有効性を検証している。さらに, 提案構造の性能向上を図るために, 固定子製作の簡単化と回転子鉄損を低減する改良構造の検討を行っている。そして,3D-FEA により, 改良した構造が優れた低鉄損特性を備えていることを示している。

そして, 第 6 章では, これまでに開発された SPM 型 BelM の問題点を改善できる, 大容量・高速回転に対応可能な埋込永久磁石 (IPM) 型 BelM の検討を行っている。まず, 大容量・高速回転に対応可能な 2 極電動機・4 極軸支持構造を持つ IPM 型 BelM の構造を示している。しかし, この構造の場合, 回転子が回転した時に軸支持力が脈動する問題が発生する。そこで, その軸支持力脈動を抑制できる回転子構造を提案している。そして, 提案する回転子構造の有効性を 3D-FEA により検証している。さらに, 提案する軸支持力脈動抑制のための回転子構造を備えた試作機を製作し, 実験により回転子構造の有効性を証明している。さらに, 高速回転における実負荷試験を行うことにより, 非接触軸支持特性や効率・損失などの諸特性も明らかにしている。

これを要するに, 本論文は, 大容量コンプレッサを用いるシステムの小型化・低コスト化に欠かせない, 大容量回転機の高速化を実現することを目的に, 従来の磁気浮上技術を用いた場合よりも, 低損失化, 小型化, そして, 低コスト化といった優れた特性を備えた新たな磁気浮上技術を提案し, さらにそれを実証して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。