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_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

博士の専攻分野の名称　　博士（工学）　　氏名　松﨑 達也

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、家電・工業製品等に対して省資源化すなわち小型化・低コスト化の要望が年々高まっている。このような傾向の中で、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使用される、大容量コンプレッサのシステムなどにも小型化・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の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。これは、コンプレッサの出力が、回転速度の 3 乗に比例するためである。したがって、同一出力において高速回転化することで、コンプレッサなどのシステムの大幅な小型化、そして、小型化による低コスト化を期待できる。ここで、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機械軸受によって軸支持することは困難である。そこで、電磁力により完全非接触で回転子を軸支持することが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り、国内外で盛んに研究・開発が行われている。

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、回転子全体が熱伝達率の低い空気に覆われており、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非常に難しい。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用いられている。しかし、パラレル着磁されたリング磁石や FRP の製造は非常に高コストである。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が難しい。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・検討する。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う。さらに、ワイドギャップ長又は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する。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 を検討する。

まず、第 2 章において、大容量・高速回転のシステムに適用可能な磁気軸受及び BelM を用いたシステム構成を示す。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する。

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 RMB を提案する。まず、従来の RMB としてヘテロポーラ型 RMB とこれまで低損失とされてきたホモポーラ型 RMB を示す。そして、3D-FEA により、提案構造と従来の RMB と比較することで、従来の 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 RMB とされてきた従来のホモポーラ型 RMB よりも優れた低損失特性を備えていることを示す。

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する 3 軸能動制御型磁気軸受のタイプ A (R+TMB Type A) を提案する。一般的に、軸方向を軸支持するためのスラスト磁気軸受 (TMB) には、大径のディスク形回転子が用いられるが、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とすることで、この問題を解決する。また、これまでに我々の研究グループで提案している円筒形回転子を備えた TMB では、ワイドギャップ長において、高スラスト負荷に対応することが難しい。そこで、提案構造は、ワイドギャップ長においても大きなスラスト力を発生できると同時に、受動的な TMB も活用することで、高スラスト負荷への対応を図る。そして、RMB の機能も一体化する構造となっている。この提案構造の有効性を実験的に検証するために、提案する R+TMB Type A を備えた試作機を製作した。試作機は、実験室で実験を行うために、ダウンサイズした小容量のモータポンプとし、その試作機による検証試験により、提案する R+TMB Type A の有効性を検証した。

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 R+TMB Type 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 (R+TMB Type B) を提案する。まず、提案する R+TMB Type B の原理検証を行うために、提案する R+TMB Type B を備えた試作機を製作し、提案構造の有効性を検証した。さらに、提案する R+TMB Type B の性能の向上を図るために、固定子の組付性の向上及び回転子鉄損を低減する改良構造の検討を行った。そして、3D-FEA により、改良した R+TMB Type B が優れた低鉄損特性を備えていることを示す。

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 の検討を行う。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 の構造を示す。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する。そして、提案する回転子構造の有効性を 3D-FEA により検証する。さらに、実験室で実験するために、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 10 kW の出力を持つ IPM 型 BelM の試作機を製作し、実験により回転子構造の有効性を示す。さらに、提案する IPM 型 BelM の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・損失などの諸特性を明らかにする。

本論文で提案する低損失化のために 4 つの C 形コアを統合したホモポーラ型 RMB、R+TMB Type A、R+TMB Type B、そして、IPM 型 BelM を大容量回転機システムに適用することで、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大容量・高速回転機を実現することが可能である。