

学位論文題名

ベアリングレスモータを用いた超高速モータドライブ
システムに関する研究

学位論文内容の要旨

現在、モータを高速で駆動する用途では、工作機械における加工精度や生産性、タービンやポンプの出力向上のために、高速・高出力のモータドライブが要求されている。しかし、高速用途に従来の機械軸受のモータを用いた場合、軸受で生じる損失の割合が増加してしまうとともに、軸受の許容回転数から最高回転数が制限されてしまう可能性がある。また、軸受で発生する振動・騒音や、潤滑油による汚染、摩耗に対するメンテナンスが問題となる。

こうした状況から、高速モータへの磁気軸受をはじめとした非接触軸受の適用が進められてきた。しかし、特に産業用の電動機に対して適用される磁気軸受は、取り付けのために回転軸を軸方向に大きく延長する必要があると同時に、軸方向の変位を制御するスラスト磁気軸受の増設が必要となる。したがって、装置全体が大型化し、また、軸長の延長による危険速度の低下、すなわち最高回転数の低下など、高速化に対して不利な一面を併せ持っている。

本研究の研究対象であるベアリングレスモータは、電動機と半径方向の磁気軸受を機能的に統合し、単体でトルクの発生と回転軸の非接触浮上を実現する電磁機械である。従来の電動機における回転子が半径方向の磁気軸受の役割を果たすことで、装置の大型化を抑えることが可能であり、磁気軸受と比較して、より高速・高出力のモータドライブを構築できる。また、非接触で回転軸の支持が可能であるため、磁気軸受等と同様に摩耗による様々な問題を解決することができ、メンテナンスフリー、無潤滑、無発塵などの非常に優れた特長を有する。これらの特長を生かし、超高速モータドライブの分野だけでなく、潤滑油による汚染や不純物の混入を嫌う、医療・化学・半導体製造などの分野でのポンプとしての応用や、メンテナンスが困難であったり長時間の連続運転が前提となる、宇宙などの分野での応用が期待されている。

本研究の目的は、このベアリングレスモータを用いて、産業分野において要求されているモータドライブの高速・高出力化に対する、ひとつの解決策を提案することにある。しかしながら、現状では、ベアリングレスモータの産業応用は、一部の限られた分野や範囲に留まっている。その原因として以下の二点が挙げられる。(1) スラスト方向の制御に用いるスラスト磁気軸受が一般に大径の円盤型であり、制作や組立てが困難であるとともに、高速回転時の動的釣合いを調整するのが非常に困難である。(2) 産業界で一般的に用いられている汎用の三角波比較方式のPWM(Pulse Width Modulation)インバータを軸支持ドライブシステムに用いた場合には、高周波領域における電流追従性の不足により安定な浮上運転が可能な回転速度が制限されてしまう。ベアリングレスモータの実用化を考えた場合に、これらの問題はコストや適用範囲の面で非常に大きな障害となる。そこで、本研究では、これらの問題を解決する手法について検討を行った。

まず、実験システムを構築する上で、(1)のスラスト磁気軸受における課題に対しての検討を行った。ベアリングレスモータによって回転子の半径方向の軸支持を行うことができるが、完全非接触運転を実現するためには、軸方向の軸支持制御を行う必要がある。従来の磁気浮上系において、軸方向の軸支持制御には、大径のディスクを用いたスラスト磁気軸受を用いるのが一般的であった。

しかし、このディスク型のスラスト磁気軸受は、回転子主軸の動的釣り合いを取るのが困難という致命的な欠点がある。これは、高速回転機においては、振動・騒音などの重大な問題を引き起こしてしまう。このことも、磁気軸受やベアリングレスモータの普及の障害になると考えられる。そこで、本研究では、新たな構造のスラスト磁気軸受を提案した。提案するスラスト磁気軸受は、従来、大径のディスクであった回転子部分を小径の円筒とすることで、動的釣り合いを取ることを容易にするとともに、装置の組み立て・分解を大幅に簡略化することを可能とする。三次元有限要素法解析を用いて試作機的设计・製作を行い、性能を確認する試験を行った。その結果、試作機において高速回転時においても十分なスラスト方向力を発生することが確認され、実用の条件下でも問題なく完全非接触運転が可能であるということを実証した。

次に、上述の試験機を用いて、(2)の軸支持制御系のインバータドライブに対する課題の検討を行った。

高速電動機に対してベアリングレスモータを適用するためには、高速回転時に生じる高周波の軸支持電流の制御が可能なインバータドライブが必須である。したがって、これまでの先行研究では、スイッチング周波数やサンプリング周波数の高い高性能なインバータドライブの使用が主流であった。しかし、インバータドライブの安易な高性能化は高コスト化に直結し、このことは産業応用における大きなデメリットになり得る。そのため、本研究では、軸支持電流の制御法を工夫することで、ベアリングレスモータの軸支持制御に一般的な性能の三角波比較方式のPWMインバータを適用する方法を提案した。

三角波比較方式のPWMインバータは、産業界で広く用いられており汎用性が高く、ノイズ除去が容易であるといった特長を有するが、反面、高速モータの駆動に必要な高周波領域における電流追従性が不足している。したがって、軸支持の電流が回転速度に比例した周波数の交流電流となるベアリングレスモータの軸支持ドライブシステムに対し、三角波比較方式PWMインバータの適用を行うためには、高周波領域の電流追従性を改善する制御法の確立が必要不可欠である。本研究では、ベアリングレスモータの軸支持電流が回転子の回転角度に同期していることに着目して、電動機磁束に同期した軸支持電流用の回転座標系を新たに考案した。さらに、この仮想の座標系を用いて軸支持電流を直流化して制御を行う電流制御法を新たに提案した。これにより、モータの回転速度によらず軸支持電流を直流量として扱うことを可能とした。また、提案する仮想の回転座標を用いた制御法において、制御電流の干渉が生じていることを解析的に示し、その補償法を提案した。制御法の有効性を確認する実験では、従来の交流の軸支持電流をそのまま制御する制御法に比べて、新たに提案する電流制御法・補償法を用いた場合は、3倍以上の速度(30000rpm)での安定な回転浮上が行えることを実証した。

本研究における成果は、以下に挙げる3点である。(1)従来、構造的な課題であるとされていたスラスト方向の磁気軸受について新規にその構造を検討することで、より高速回転に適したスラスト磁気軸受を開発した。(2)より高速での駆動に適した磁気浮上を利用したモータドライブであるベアリングレスモータの高速化の手法を提案・実証した。(3)ベアリングレスモータの高速化に対して、比較的安価な汎用インバータの使用を想定し、安易にインバータの性能を上げる方法には頼らず、制御の工夫によって高速での駆動を実現した。

これらにより、モータドライブ全体として高速・高出力化が可能で、かつ比較的低コストのシステムを提案した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小笠原 悟 司
副 査 教 授 北 裕 幸
副 査 准教授 竹 本 真 紹

学 位 論 文 題 名

ベアリングレスモータを用いた超高速モータドライブ システムに関する研究

現在, モータを高速で駆動する用途では, 工作機械における加工精度や生産性の向上, タービンやポンプの出力向上のために, さらなる高回転・高出力のドライブが要求されており, モータドライブの高速化が進められている。モータの軸出力は回転角速度とトルクの積であるため, モータドライブの高速化はそのまま小型・高出力化につながる。

そこで, 一つの固定子に電動機用と軸支持用の二つの巻線を巻くことで, 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提案されている。ベアリングレスモータでは, 回転子が固定子から磁気的に浮上し, 非接触で回転を行う。そのため, 摩擦係数が小さく高速回転に適しており, 低騒音・低振動であることや, 長寿命でメンテナンスフリーであること, 潤滑油や磨耗粉による周辺への汚染がないこと, 潤滑油の制限により機械軸受が使用できない温度環境での使用が可能であることなどの特長を持つ。また, 電動機と磁気軸受を別に設けた場合に比べて軸長を短くすることができる。そのため, 装置の大型化を抑えることが可能であり, 磁気軸受と比較しても, 危険速度の観点から, より高速・高出力のモータドライブを構築できる可能性がある。

しかし, ベアリングレスモータは, 軸支持に必要な軸支持電流が回転速度に比例した周波数を持つ交流電流になる。したがって, 高速回転時には軸支持電流の周波数上昇により, 電流制御が十分に精度良く行うことができなくなり, 安定な軸支持制御が困難になる。このことから, これまでのベアリングレスモータの研究においては, 電流追従性に優れる瞬時値比較方式の PWM インバータが主に用いられてきた。しかし, この方式はあまり一般的ではなく, この方式の使用はコストの上昇を招いてしまう。また, 瞬時値比較方式では, スイッチング周波数が運転状態によって大きく変動するため, ノイズの除去が困難であるなどの問題もあり, 周囲の機器へ悪影響を及ぼす危険性もある。

また, 軸方向の変位制御に用いるスラスト磁気軸受が高速化に不向きであることも, ベアリングレスモータの高速化の問題点となっている。ベアリングレスモータによって半径方向の軸支持を行うことができるが, 完全非接触運転を実現するためには, 軸方向の軸支持制御を行う必要がある。従来, 磁気浮上系において, 軸方向の軸支持制御には, 大径のディスクを用いたスラスト磁気軸受を用いるのが一般的である。しかし, このディスク型のスラスト磁気軸受は, 回転子主軸の動的釣り合いを取るのが困難という致命的な欠点がある。これは, 高速回転機においては, 振動・騒音などの重大な問題を引き起こしてしまう。

そこで, 本論文では, ベアリングレスモータを用いた超高速モータドライブシステムを実現するために, 以下の研究を行っている。

まず, 第 3 章で, 従来, 構造的な課題であるとされていたスラスト方向の磁気軸受について, 新た

な構造として小径円筒形のスラスト磁気軸受を提案している。まず、従来の大径のディスクを用いたスラスト磁気軸受について説明し、さらに、高速化におけるその問題点について解説している。そして、それらの問題を解決する新しい構造のスラスト磁気軸受として、小径円筒形のスラスト磁気軸受について詳細に説明している。提案するスラスト磁気軸受は、大径のディスクであった回転子部分を小径の円筒とすることで、動的釣り合いを取ることを容易にするとともに、装置の組み立て・分解を大幅に簡略化することを可能としている。また、有限要素法解析および試作機による実験によって、その有効性を評価している。

第4章では、ベアリングレスドライブシステムの高速化について述べている。高速回転時に軸支持電流が高周波電流になるという問題に対し、高速回転向けの軸支持電流制御法として、仮想の回転座標を用いた電流制御法を提案している。仮想の回転座標上で軸支持電流を制御することで、回転角度によらない直流量として扱うことが可能になるため、高速回転時の軸支持電流の制御が容易になる。また、仮想の回転座標への変換を通して新たに発生する軸支持電流の干渉について検討するとともに、その非干渉化法を提案している。提案する電流制御法によって、一般的な性能の三角波比較方式のPWMインバータを用いることが可能となる。そして、試験機による実験によって、提案する軸支持電流の直流化および非干渉化の効果を確認した。

これを要するに、著者の研究は、ベアリングレスモータを用いた超高速モータドライブシステムを実現するために欠かせない内容であり、独創的でかつ実用的な優れた研究であると言える。そして、新たな知見を得ると同時に、電気工学ならびに電気機器学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、北海道大学の博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。