

平成 21 年 6 月 26 日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760181  
 研究課題名（和文）アキシャル型セルフベアリングモータ/ジェネレータを用いた磁気軸受システムの開発  
 研究課題名（英文）Development of an Axial Self-bearing Motor/Generator

研究代表者  
 上野 哲（UENO SATOSHI）  
 立命館大学・理工学部・准教授  
 研究者番号：40322929

研究成果の概要：アキシャル型セルフベアリングモータを発電機として用いた場合のアキシャル方向力および回転トルクの特性を検討し、発電を行いながら位置制御が可能かどうかをシミュレーションおよび実験により検討した。その結果、ステータ巻線に接続した抵抗などの負荷を変化させることにより、アキシャル方向力を変化させることが可能であること、さらにステータ巻線にスイッチング回路を接続し、スイッチの切り替えによりアキシャル方向力の制御が可能であることが分かった。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	2,200,000	330,000	2,530,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：機械工学・制御，制御工学，計測工学，磁気浮上，モータ，発電機，セルフベアリングモータ

## 1. 研究開始当初の背景

(1)近年、軸受の高速回転、耐久性の向上が要求され、流体軸受や磁気軸受などの機械的な接触の無い軸受が実用化されている。このうち磁気軸受は、磁気力で軸を支持するため、摩擦が無く高速回転が可能、摩擦が無いため高い耐久性を持ち、粉塵などの発生がなく、油などを使用しないためクリーンな環境で使用でき、さらに極低温、高温環境でも使用可能など、優れた特徴を持っている。しかし能動制御が必要なため高価であり、単位面積あたりで発生できる力が小さいため、装置

が大型化してしまうなどの問題があり、広く普及するには至っていない。

(2)上記の問題を解決する方法の一つとして、磁気軸受と交流モータの構造が類似していることに注目し、これらを一体化したセルフベアリングモータ（磁気浮上モータ、ベアリングレスモータとも呼ばれる）が提案されている。このモータは、一つのステータで回転トルクの発生とロータのラジアル方向またはアキシャル方向の位置制御を行うものであり、ラジアル磁気軸受もしくはアキシャル磁気軸受の一つを取り除くことができるため、

装置の小型化や簡単化，低価格化が可能となる。このうちラジアル型のセルフベアリングモータは，モータ用と位置制御用の2種類の巻線をステータに施す必要があるため，ステータ構造が複雑になるが，アキシャル型のセルフベアリングモータは，回転トルクの発生と位置制御を同じ巻線で行うため，ラジアル型セルフベアリングモータと比べて構造が簡単になる利点があり，低価格で完全非接触浮上を実現することができる。アキシャルセルフベアリングモータは，永久磁石型，誘導型，リラクタンstypeモータで実現でき，現在までの研究により，その制御方法が明らかにされている。

(3)また磁気軸受の普及を妨げる要因の一つとして，その危なっかしさが挙げられる。制御型の場合，停電などにより電源が遮断されると，高速回転している軸が落下し，重大な損傷を引き起こす。そのため補助軸受やバックアップ電源などを設ける必要があり，設計の複雑さ，コストの上昇などにつながってしまう問題がある。

## 2. 研究の目的

(1)本研究では，上記の問題を解決するため，アキシャル型セルフベアリングモータを用いたセルフパワード磁気軸受システムを提案する。アキシャル型セルフベアリングモータは，通常のディスクモータと同じ構造のため，外部から回転エネルギーを与え，そのエネルギーを電気エネルギーに変換することができる。この電気エネルギーを利用してアキシャル型セルフベアリングモータのロータの位置制御を行い，故障時においても安定した制御を可能にし，さらに低コスト化と消費エネルギーの削減を目指す。さらに得られたエネルギーを利用してラジアル磁気軸受の制御を行い，システム全体のエネルギーをアキシャル型セルフベアリングモータから得られるエネルギーでまかなうことが可能かどうか検討する。そして最終的には，アキシャル型セルフベアリングモータから得られるエネルギーを用いて外部機器を動かし，発電機として利用することを目的とする。提案するシステムでは，外部からの電力が不要もしくは，小さな容量となり，高価な大容量電源が不要となるためコスト削減が可能となる。さらに自己発電を行うため，軸が回転している状態では安定な位置制御が可能のため，補助軸受や大容量のバックアップ電源が不要となり，停電時においてもロータが停止するまで安定な位置制御が可能となる。

(2)上記の目的を達成するため，まずアキシャル型セルフベアリングモータ・ジェネレータの発電時の制御手法を開発する。モータは永久磁石型を用い，ロータの回転より誘導電圧をステータコイルに発生させ，発生した誘

導電圧によりステータコイルに電流を流し，軸受力を発生させる。軸受力はステータ電流の大きさとロータに対する位相により変動するため，巻線に高周波スイッチを取り付け，そのスイッチの切り替えを制御することにより，必要な軸受力を発生させることが可能かどうか検討を行う。

(3)次に外部にエネルギーを取り出す方法を検討する。アキシャルセルフベアリングモータでは， $d$  軸電流により軸方向力， $q$  軸電流によりトルクが発生する。 $q$  軸電流を取り出すことで軸方向力に関係なく外部にエネルギーを取り出すことができる。この制御手法を開発する。

(4)さらに発電に適したステータ形状を検討し，より高効率で電力を得ることができるアキシャル型セルフベアリングモータ/ジェネレータを作成し，得られた電力を用いてラジアル磁気軸受の制御を試みる。

## 3. 研究の方法

(1)発電時のアキシャル方向力および回転トルクの特性を検討するため，アキシャル型セルフベアリングモータの電圧電流モデルを導出した。図1に解析に用いた座標軸を示す。ステータは三相巻線とし，ロータの永久磁石を一定電流が流れる巻線に置き換えて解析を行った。コイルのインダクタンスがエアギャップの逆数に比例すると仮定し，各コイルの鎖交磁束から電流と電圧の関係を導いた。そして電流からアキシャル方向力と回転トルクを導出した。得られた非線形方程式から Matlab/Simulink を用いて，ステータ巻線に様々な負荷を接続した場合のシミュレーションを行った。

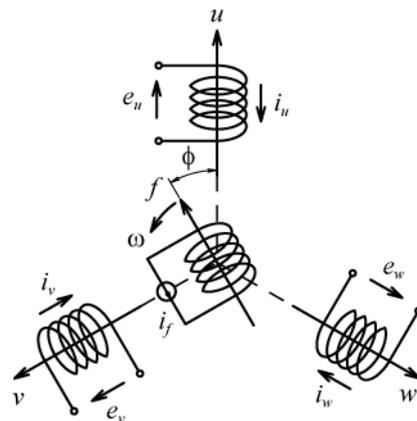


図1 座標軸

(2)シミュレーションで得られた結果を検証するため，図2に示す実験装置を製作し，実験を行った。実験を簡単にするためロータを玉軸受により支持し，ロータのラジアル方向の自由度を制限した。そしてステータをリニアガイド上に取り付け，ステータがアキシャ

ル方向に移動できるようにした。

ステータは6突極の集中巻のものを、ロータは永久磁石型のを製作した。ロータを回転させるためのモータ、ロータの角位置情報を検出するためのエンコーダ、ステータの変位を検出するための変位センサを取り付けている。またステータにロードセルを取り付け、スタータとロータの間に働く吸引力の測定を行った。

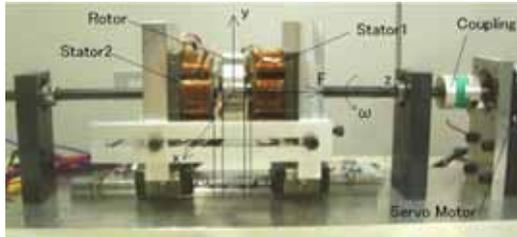


図2 実験装置

#### 4. 研究成果

(1)まず図3に示す三相对称負荷を接続した場合についてシミュレーションを行った。

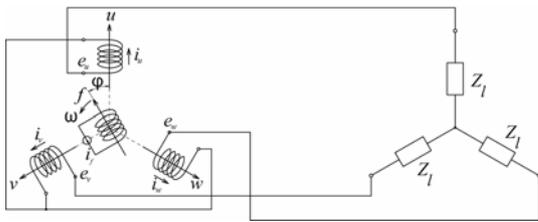


図3 三相对称負荷

図4に抵抗負荷を接続した場合の電流と位相, アキシャル方向力と回転トルクの大きさのシミュレーション結果を示す。グラフの横軸は抵抗値を表し, 回転数を1,000rev/minから4,000rev/minの間で計算を行った結果を示している。この結果より回転数に関わらず, 負荷抵抗を小さくするとアキシャル方向力が小さくなっており, 負荷抵抗値の大きさを変化させることでアキシャル方向力を制御できる可能性があることが分かった。さらに接続する負荷を誘導負荷, 容量負荷に変えた場合でも負荷の値によって, アキシャル方向力が変化することが分かった。

抵抗負荷を接続した場合の実験結果を図5に示す。この図はロータとステータに働く吸引力をフォースゲージで測定したものである。横軸がロータの回転数, 縦軸が吸引力の値を示している。でプロットした結果が抵抗値を無限大,  $\infty$ およびでプロットした結果が抵抗値を1および0としたときの結果である。実線はシミュレーションの結果を示している。回転数が高い領域では, 実験とシミュレーションで差が大きくなっているが, これはステータに生じる渦電流が原因で

ある。回転数が低い領域では実験とシミュレーションはよく一致しており, 解析の妥当性が確認できた。以上の結果より, 接続する負荷の値を変化させることでアキシャル方向力が制御できることが確認できた。

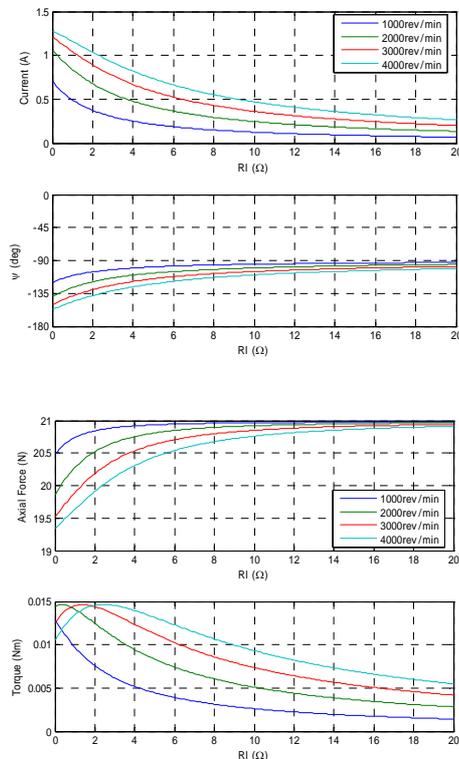


図4 抵抗負荷を接続した場合のシミュレーション結果

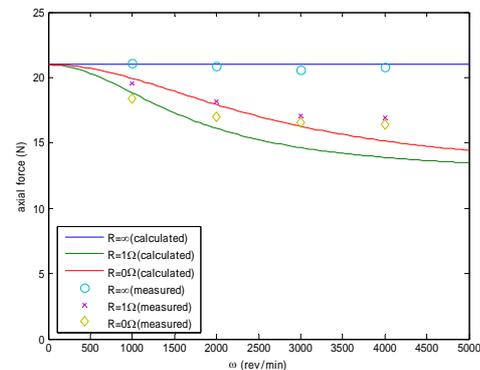


図5 抵抗負荷を接続した場合の実験結果

(2)次に図6に示すスイッチング回路を用いた場合のアキシャル方向力と回転トルクの大きさを検討した。図の各スイッチのオン・オフを切り替えることで, 負荷抵抗に流れる電流を調整し, アキシャル方向力の制御を行う。まずスイッチングパターンを固定した場合のシミュレーション結果を図7に示す。これはスイッチを例えばS1, S4, S6をオンとした場合について計算を行ったものである。

この結果よりロータの回転角度に応じて吸引力とトルクが変化することが分かる。またスイッチパターンの違いによって、吸引力の位相がずれており、スイッチングパターンを切り替えることで、望みの力を得ることが可能であることが分かった。

図8にスイッチングによるアキシャル方向力の制御のシミュレーション結果を示す。これはd軸電流を目標値とするようにスイッチングパターンを切り替えた時のアキシャル方向力とd軸、q軸電流の値を示したものである。この結果よりd軸電流を目標値に制御することが可能であることが確認できた。しかし、q軸電流が変動しアキシャル方向力が変動することが分かった。しかし吸引力の平均値はd軸電流の目標値のよって制御可能であることが確認できた。

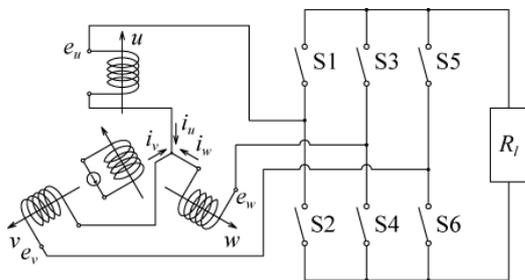


図6 スwitching回路

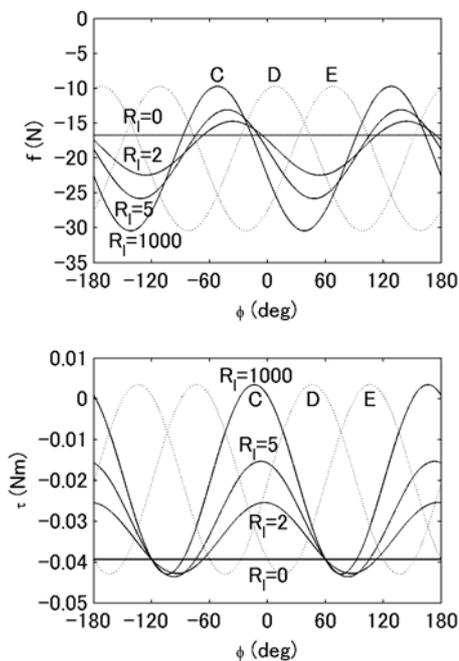


図7 スwitchingパターンを固定した場合の吸引力とトルク

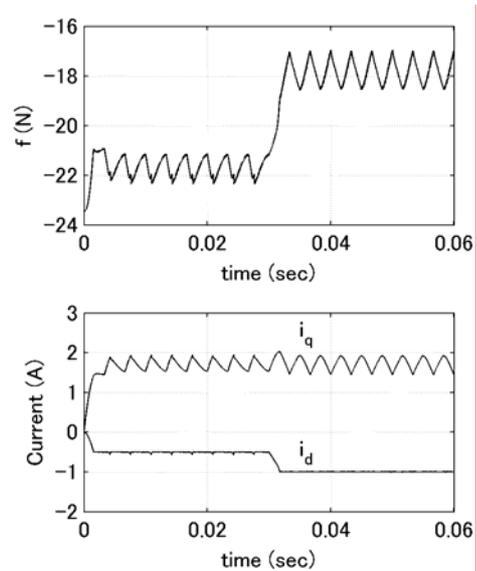


図8 吸引力の制御

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計2件)

上野 哲, 本多 祐司, 「アキシャルセルフベアリングモータ/ジェネレータの発電特性および制御方法の検討」, 第10回運動と振動の制御シンポジウム, 2007年8月9日, 東京都目黒区大岡山

上野 哲, 早川 潔, 「アキシャル型セルフベアリングモータ/ジェネレータの吸引力特性の検討」, 第17回 MAGDA コンファレンス in 日立, 2008年11月21日, 茨城県日立市

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

上野 哲 (UENO SATOSHI)

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号: 40322929