

整流コイルを用いたベアリングレスモータの浮上と回転制御

Levitation and Rotation Control of Bearingless Motor with Rectified Circuit Coil

立花 邦彦^{*1}(学生員), 岡 宏一^{*1} (正員)

Kunihiko TACHIBANA (Stu. Mem.), Koichi OKA (Mem.)

This paper represents the research finding of levitation and rotation control on bearingless motor with rectified circuit coil. Rectified circuit coils are functioned as transmitting and receiving coil of wireless electric power transmission, and supply direct current to rotor coils. Rotor coils are used as rotor magnets not using permanent magnets. Even if horizontal force of magnet is strong, unless vertical force of magnet exists, a rotor does not levitate. So as to generate vertical force, the tip form of rotor and stator is made to incline and levitation force (vertical force) is acquired using this inclination.

Keywords: bearingless motor, rectified circuit coil, wireless power transmission, tip form, inclination of tooth, levitation force

1 緒言

これまでに多くのベアリングレスモータが提案されているが、固定子または回転子に永久磁石を使用しているものがほとんどである[1-5]。このため、キュリー点以上の高温環境下での使用は不可能であり、永久磁石には経年変化や外部からの磁界によって減磁が生じる。近年、100℃を超える温度まで使用可能な永久磁石が入手可能[6-8]となったものの、その他の問題は未だ解決されていない。

著者らは永久磁石を使用しない半波整流式の整流コイルを用いたベアリングレスモータを提案してきた[9-12]。これまでの提案では回転制御に主眼を置いた研究を行っていたが、今回、整流コイルでの電力伝送、固定子および回転子の歯の形状に関する提案を行う。

回転子に発生する磁力は整流コイルに供給される電力により決まってしまうため、安定した浮上や回転を行うためには、多くの電力を供給する必要がある。また、永久磁石を使用しないため、回転子の磁力は永久磁石を使用する場合と比較して小さくなるが、小さな磁力で回転子を浮上させるためには、効率的に磁気支持力（Z軸方向の浮上力）を得る必要がある。このためには、歯の端部Z軸にタオレ（傾き）が存在することが有効であると考えられる。レーザ切断の場合、

タオレが必然的に存在するが、このことを積極的に利用することにより、要求する歯の端部形状が得られる。

本論文では全波整流式の整流コイルを用いたベアリングレスモータの浮上と回転に必要な電力伝送方法、歯の端部のタオレによる浮上力の発生、さらに回転と浮上の制御手法に関して、基本原理と実施したシミュレーションおよび実験結果について述べる。

2 整流コイルの原理

整流コイルは電磁誘導によって得られる起電力を、ダイオードを使用し直流化することで、コイルに発生する磁極を固定するものである。提案する電力伝送コイルを用いた全波整流式を Fig.1 に示す。交流電流を電力伝送コイル一次側に印加することで、二次側には交流の誘起起電力が発生するが、ブリッジダイオードにより回転子コイルには一方向の電流が流れるため、

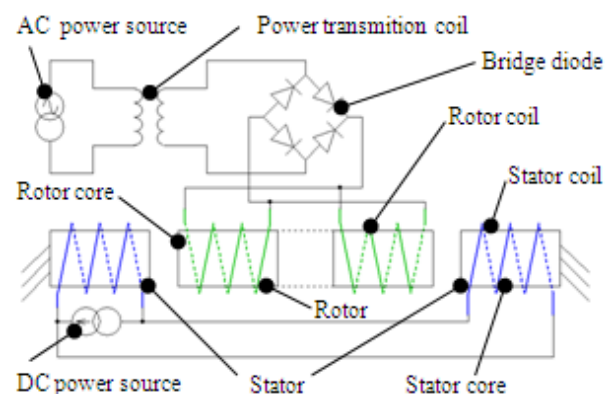


Fig. 1 Schematic of full wave rectification type.

連絡先： 立花 邦彦, 〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185, 高知工科大学 大学院 基盤工学専攻,
e-mail: 156006p@gs.kochi-tech.ac.jp

^{*1} 高知工科大学

回転子コイル両端には固定された磁極が現れる。したがって、回転子に永久磁石を取り付けた場合と同様に扱うことができるようになる。

3 整流コイルを用いたベアリングレスモータ

3.1 構造

ベアリングレスモータの構造を Fig.2 に示す。ベアリングレスモータは能動的に制御する軸数により 1 ～ 5 軸制御型に分類されるが、2 軸制御型とすることで構造および制御を簡素化できると考えた。また、永久磁石を使用しないことから、回転子の大きな磁力を得るために、歯の数を増やすことで対応することとした。さらに、回転子により多くの電力を供給可能とするため、全波整流式とすることとした。

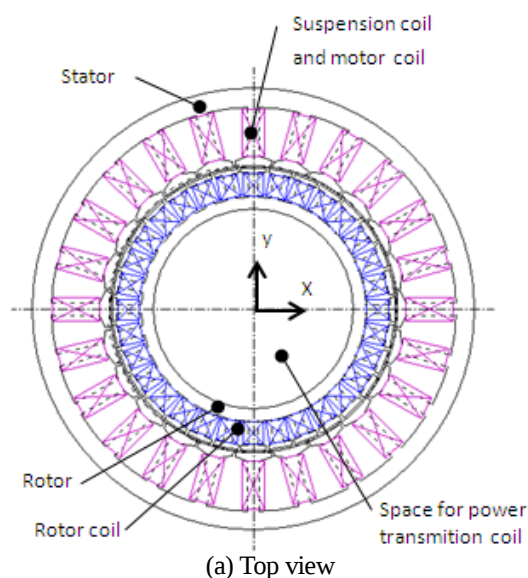


Fig. 2 Schematic of bearingless motor.

固定子鉄心、回転子鉄心は扁平形状であり、軸方向には Fig.2(b)に示すように短く二層構造である。一層当たり、固定子の歯は 24 個、回転子の歯は 32 個である。固定子には支持コイルと回転コイルが、回転子には回転子コイルが巻かれる。また、回転子鉄心の内側に電力伝送コイルを配置する。

3.2 磁気支持力発生原理

固定子と対向する回転子の磁極は、一層では全て N 極または S 極となるモノポーラ型となるように回転子コイルを接続する。上側層において、回転子の歯を N 極とすれば、固定子の支持コイルには S 極となるように電流を流す。電力伝送コイルに励磁電流を流すことで回転子コイルに磁極が発生し、固定子コイルに支持電流を流すことで、回転子、固定子間に吸引力が発生し、これが支持力となる。励磁電流を一定とし、固定子支持コイル全てに同じ値の電流を流したとき、回転子が固定子から受ける X 軸方向および Y 軸方向の力のベクトルを全周にわたって積分すると 0 となるため、回転子軸は固定子軸の中心に位置することになる。

Fig.3 に示すように固定子支持コイルを、u 軸、v 軸、w 軸の 3 軸となるように配置すると、XY 座標での位置を u v w 座標に置き換えることができる。回転子の X 軸、Y 軸方向の変位を検出し、これをもとに 2 相 3 相変換を行い、固定子の u、v、w 軸の磁気支持力（供給する電流値）を調整することで、それぞれの軸方向の力の大きさを変えることができ、力のベクトル和により任意の半径方向に力を発生できる。この力の不均衡により回転子の半径方向の位置制御が可能となる。

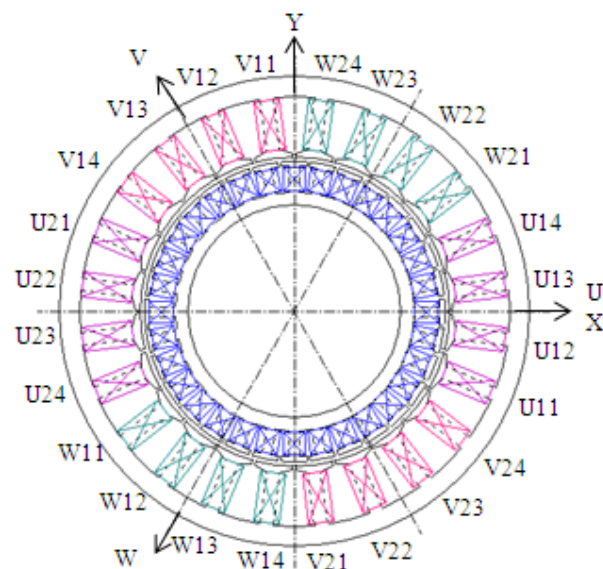


Fig. 3 Principle of radial suspension force generation.

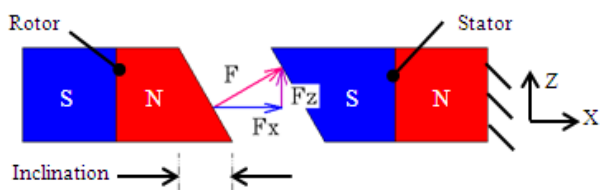


Fig. 4 Principle of axial suspension force generation.

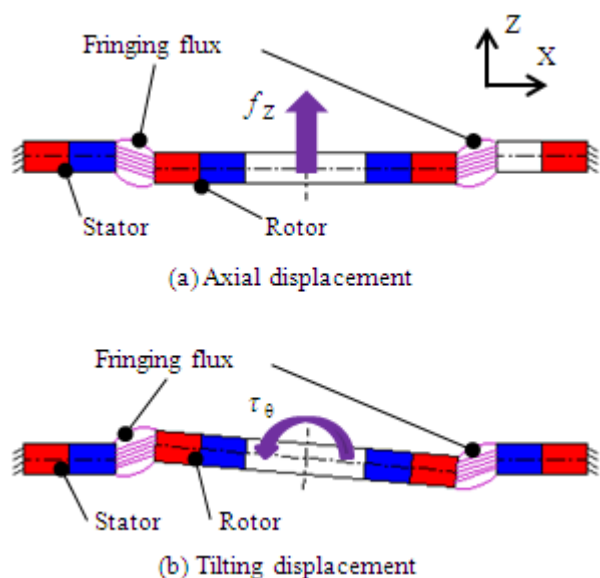


Fig. 5 Principle of axial and tilting restitutive force generation.

Z 軸について磁気支持力の発生原理を Fig.4 に示す。一般的に回転子や固定子の歯の端部は回転軸に対して平行とするが、この方法では軸方向に短く磁気力が小さな電磁石の場合、十分な支持力を得ることが難しい。そこで、Z 軸に対してタオレを有する形状の歯の端部とし、Z 軸の支持力を得ることとした。空隙部の磁束線の向きは着磁方向の端面に垂直であるため、Fig.4 に示すように右斜め上向きの力 F が発生する。この力は X 軸方向と Z 軸方向の力のベクトル合成であり、回転子および固定子の位置が Z 軸上で同じであっても、Z 軸方向の力が発生することになる。

Fig.5 に軸方向および傾き方向に変位が生じた場合について復元力の発生原理を示す。回転子が平衡位置から変位すると、回転子および固定子の固定された磁極の吸引力により、軸方向の復元力 f_z 、傾き方向の復元力 τ_θ が発生する。このとき歯端部のフリンジング磁束が主な復元力を発生し、回転子は受動的に安定することになる。回転子は薄くて大きな直径なものが復元方向の剛性が高くなるが、回転子の質量と磁力のバランスを考慮する必要がある。

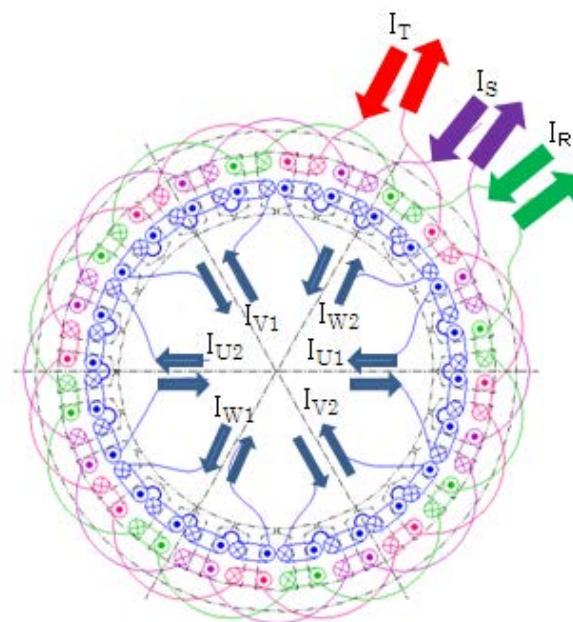


Fig. 6 Schematic of levitation and motor coil.

3.3 固定子コイル

固定子には磁気支持力を発生させるための支持コイルと、回転のために必要な磁力を発生させるための回転コイルが必要となる。1つのコイルに両方の機能を持たせるとすると、使用線材径を大きくしなければならず、コイル径が大きくなってしまふ。そこで、使用線材径を小さくし、2つのコイルを平行巻きとすることで、巻き厚みが極力小さくなるようにする。

固定子コイルの配置を Fig.6 に示す。Fig.6 で半径方向内側が支持コイル、外側が回転コイルである。説明上、固定子に巻くコイルは、1つの歯に集中巻きコイルを2つ並べたように示しているが、実際には平行巻であるため、1つのコイルのようになる。支持コイルには直流電流、回転コイルには矩形波電流を供給する。回転制御は3相で行う計画であり、一層での1相当りの固定子のコイル数は8となる。

4 ベアリングレスモータの設計

4.1 回転子、固定子の材料と加工

モータでは回転子や固定子での鉄損を低減するため、鉄心の材料として薄板電磁鋼板が一般的に用いられるが、機械的強度が問題になることがある。一方、直流電磁石では鋳鉄、軟鉄板等の鉄塊が用いられ、機械的強度や加工性に優れている。今回、回転子コイルおよび固定子の支持コイルには直流電流が供給されるため、鉄心の材料として軟鉄板を使用することとした。

加工方法として、レーザ加工、ワイヤ放電加工、NC加工等が考えられる。この中で2次元レーザ加工では切断面にタオレが生じることに着目した。使用する板材厚みや加工機、加工時の設定等により違いがあるものの、5mm厚みの軟鉄板であれば、Fig.7に示すように0.5mm~0.8mm程度（近年の加工機では0.1mm~0.2mm程度）のタオレが生じる。このタオレはZ軸方向の力を発生させるために大変有効であり、レーザ加工を用いることとした。

4.2 浮上力

回転子を浮上させるために、どの程度のタオレが必要であるのか検討する。回転子の質量は計画している寸法で約0.8kgであるため、7.84N以上の浮上力が必要となる。計画している回転子の歯の数は、一層当たり32歯であり、二層あるので合計64歯であるから、回転子の歯1個当たり約0.123NのZ軸方向の力が必要である。固定子コイルの支持電流、電力伝送コイルの励磁電流を計画値の75%とし、タオレ角度による発生する力の違いを計算した結果をFig.8に示す。

浮上に必要な力を発生できるのは、歯のタオレが7.5degよりも大きな場合である。歯のタオレ7.5degは鉄心厚みを4.5mmとすると0.6mmに相当する。歯のタオレ量が大きくなるにしたがい、Z軸変位が0mmの

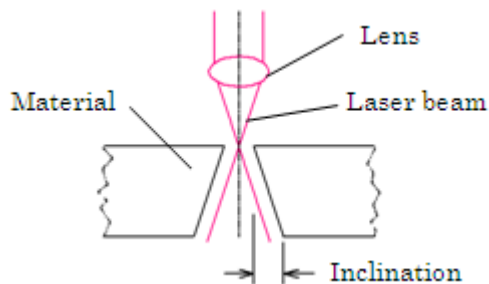


Fig. 7 Inclination by laser beam cutting.

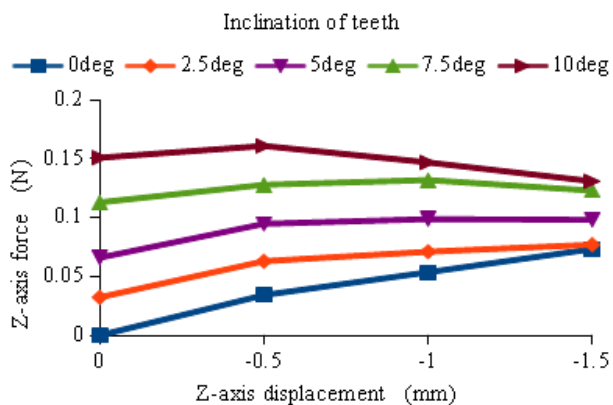


Fig. 8 Compare of force by teeth inclination

時の力は大きくなるが、Z軸変位が-0.5mmを越えると、ほとんど増加しないか、または小さくなる。これはフリンジング磁束による力の減少と考える。したがって、回転子と固定子とが平行となる位置を初期浮上位置となるように制御することとした。

4.3 回転子の磁極

磁気支持力を得るのに、吸引力と反発力とが考えられるが、反発力を使用する場合、反発力と垂直な方向に不安定であることから、吸引力を使用することとした。既に説明したように、回転子の磁極はN極またはS極として固定できるが、固定子を含めての磁束の流れを考慮し、Fig.9に示すように吸引力が得られる磁極が発生するように各コイルを巻き、電力伝送コイルからの電流を供給することとした。

4.4 歯の形状

回転子の回転角による磁力（支持力）の変動を小さくする目的で、歯端部のテーパを考える。Fig.10に示すモデルを使い、テーパ寸法を変えて、2つの固定子中心間を1度ごとに回転子を回転させ、磁力の計算を行った。回転子、固定子ともに、深さ0.5mm、長さ1mmの場合に力の変動が一番少なかった。この場合とテーパ無しの場合について、力の比較をFig.11に示す。コイルの電流が大きい程、磁力の変動が小さくなっており、磁束の増加による磁力の変動が小さくなるように、テーパが有効に機能していることがわかる。

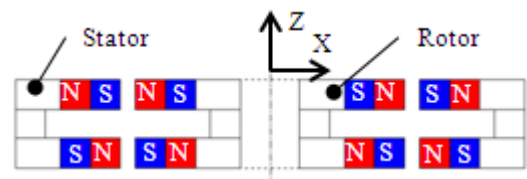


Fig. 9 Magnetization direction.

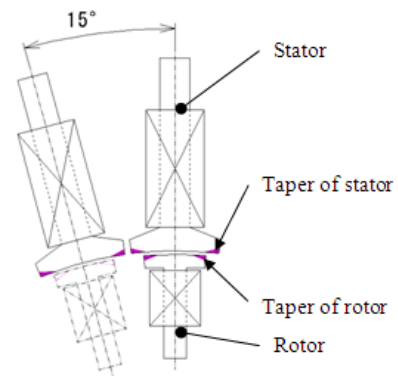


Fig. 10 Simulation model of teeth taper.

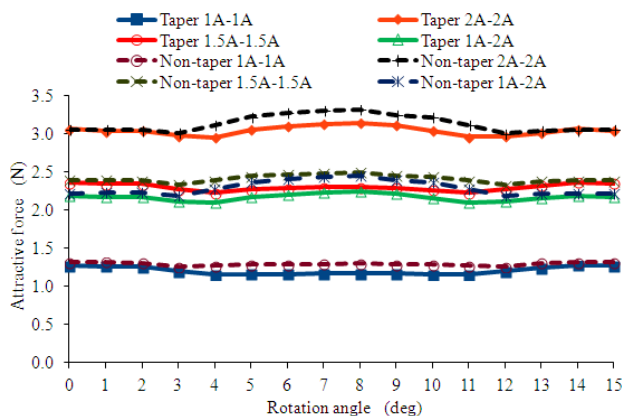


Fig. 11 Compare of attractive force with teeth taper.

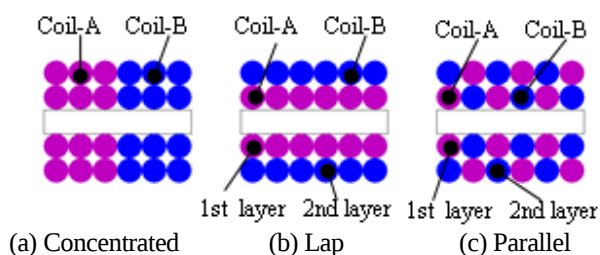


Fig.12 Coil winding method

4.5 固定子コイルの巻き方

固定子に支持コイルと回転コイルを巻くことは既に述べた。回転コイルには矩形波電流を流すことから、コイルのインダクタンスが小さな値であれば、電源容量が小さくて済む。コイルを巻く方法として Fig.12 に示す3つの方法が考えられる。Fig.12(c)に示す2つのコイル線を平行に巻く方法が、一番インダクタンスが小さいことから、平行巻きとすることとした。また、巻き長さが長くなると磁化力(AT/m)が小さくなるため、巻き長さを極力短くすることとした。

4.6 回転子への電力伝送

回転子を電磁石として機能させるため、非接触で電力を供給する必要がある。半波整流式では鉄心に支持磁束、励磁磁束、および回転磁束が重畳された磁束が流れるため、これらの磁束が多いと鉄心では磁気飽和が生じる。鉄心の断面積を大きくすれば、磁束密度が低下するため、磁気飽和が生じなくなるが、モータが大型化し質量も増加するという問題が生じる。

この問題を解決するため、回転子コイルを直接励磁する方法ではなく、間接的に回転子コイルに電力を伝送する方法として、Fig.13 に示す電力伝送用コイルを回転子中央に付加することとした。このコイルによる

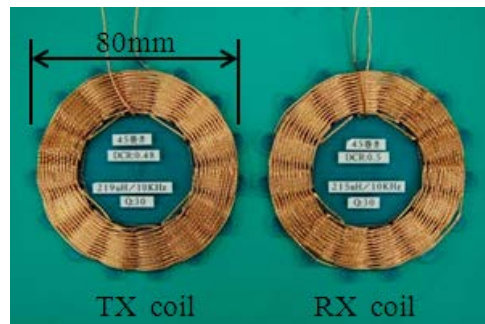


Fig. 13 Wireless power transmitting coil.

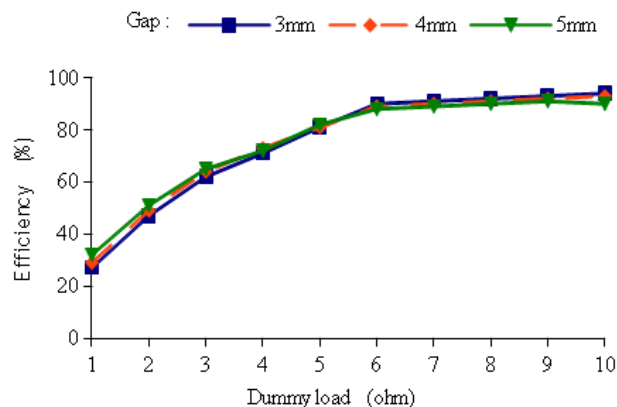


Fig.14 Power transmitting efficiency

質量増加は 40g 程度であり、既に説明した浮上力を計算する過程においても質量増を考慮している。

電力伝送コイルは伝送効率を上げるため、コイルの巻き方をスパイダー巻きとし、さらに一次側にはコンデンサによる共振を用いる。負荷抵抗（回転子コイルの抵抗）とコイル間隙を変化させた場合の、電力伝送効率を測定した結果を Fig.14 に示す。回転子コイルの抵抗の計算値は約 5.5Ω であり、Fig.14 から 80%以上の伝送効率を得られていることが分かる。全波整流であるから、回転子コイルに流れる電流の平均値は、半波整流式の2倍となる。また、供給可能な電力の最大値は、直接励磁と異なりコイル線材の許容電流値で決まり、直接励磁よりも多くの電力を回転子コイルに供給することが可能となる。

4.7 浮上、XY 位置制御

回転子の Z 軸浮上位置は、大きな変位が生じなければ、受動的に初期位置に復元するため、初期浮上位置を任意に設定可能な制御とすればよい。一方、回転子の XY 軸位置については、変位センサを用いて位置誤差を計測し、その値を使い制御を行う必要がある。Fig. 15 に示すように、変位センサの信号を 2 相 3 相変換し、

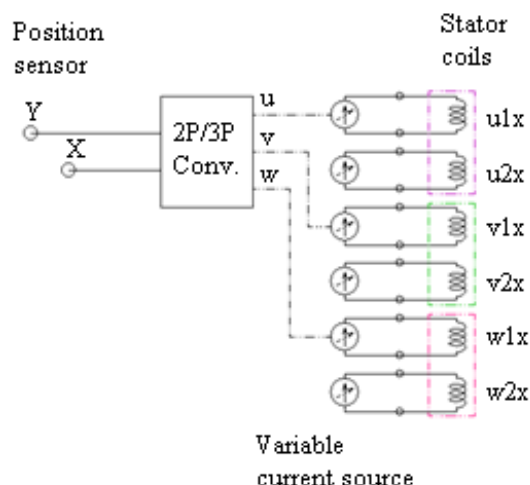


Fig. 15 Control circuit of floatation and XY position.

u, v, wの3軸に該当するコイルの電流を制御する。各軸のコイル配置は Fig.3 で既示したものとし、Fig.15 での u2x, v2x, w2x のコイル電流は初期浮上位置まで浮上させたあとは一定値とする。u1x, v1x, w1x のコイル電流は浮上させたあと、XY 位置誤差により変化させることとした。

4.8 回転制御

一層での固定子の回転子に対向する磁極はN極またはS極のみであるから、固定子の強い磁力を持つS極またはN極の歯を移動させることで、回転子との間に力が働き、回転子が回転する。このことから、回転子に永久磁石を使用したステッピングモータと、同様な方法で回転制御を行うことができる。したがって、何相制御でも可能であるが、汎用3相インバータとの組合せにより回転制御を行うことが可能なように、3相制御を行うこととした。回転制御電流をコイルに供給するため、Fig.16 に示すように、回転用矩形波信号により、R, S, T 各相のスイッチ素子を ON, OFF することで、各相のコイルに供給される電流が制御される。

5 結言

全波整流回路を用いた二層扁平モノポーラ型の、永久磁石を使用しないベアリングレスモータを提案した。電力伝送コイルにより効率良く電力を送ることが可能であること、また、回転子と固定子対向面の歯のタオレを用いることで、効率的に浮上力を得られることを、実験およびシミュレーション結果から示した。これらのことから、提案したベアリングレスモータを実現することが可能であると考えられる。

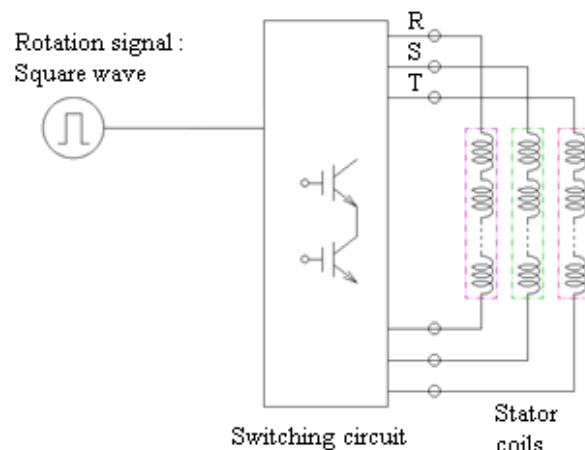


Fig. 16 Control circuit of rotation.

今後は、実験用モータを試作し、提案内容の検証を行うとともに、歯のタオレの最適値や浮上力を簡単に算出する方法などについて研究をさらに進める。

参考文献

- [1] 松田, 喜多, 増澤, 岡田, 人工心臓用磁気浮上モータの研究, 日本機械学会, D&D 2000 CD-ROM 論文集, 2000.
- [2] 金箱, 小西, 岡田, ローレンツ力を利用したラジアルセルフベアリングモータの開発, 日本機械学会, D&D 2000 CD-ROM 論文集, 2000.
- [3] 大井, 松橋, 野村, ワイドギャップ構造ベアリングレスモータの特性測定, 明電時報, 通巻 331 号, pp. 35-40, 2011.
- [4] P. Karutz, T. Nussbaumer, W. Gruber and J.W. Kolar, Novel Magnetically Levitated Tow-Level Motor, *IEEE Transactions on Mechatronics*, Vol. 13, No. 6, pp. 658-668, 2008.
- [5] 杉本, 朝間, 千葉, トロイダル巻を用いた多極シンコクエントポール型ベアリングレスモータの磁気支持特性, 電気学会論文誌D, Vol. 132, No. 12, pp. 1112-1120, 2012.
- [6] <http://www.neomag.jp/>
- [7] <http://www.magfine.co.jp/>
- [8] <http://www.26magnet.co.jp/>
- [9] K. Oka, Bearingless Motor with Rectifier Circuits, *Proc. of the 8th Int. Symposium on Magnetic Bearings*, pp. 271-276, 2002.
- [10] 荒谷, 岡, 陳, 整流回路を用いたベアリングレスモータの開発—回転機構に関する考察—, 日本 AEM 学会, 第 17 回「電磁力関係のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp.493-496, 2005.
- [11] 佐伯, 岡, 楠川, 整流コイルを用いたベアリングレスモータのロータ形状の改善, 日本設計工学会四国支部, 平成 21 年度研究発表講演会講演論文集, pp7-10, 2010
- [12] 立花, 岡, 整流コイルを用いたベアリングレスモータのロータ浮上, 日本機械学会, D&D 2012 USB 論文集, 2012