

共鳴型非接触給電を用いた小型ベアリングレスモータの開発

Development of small bearing-less motor with resonance type contactless power supply

知能機械システム工学コース

機械・航空システム制御研究室 1225050 蒔田 和磨

1. 緒言

モータは電化製品から産業機械まで様々な分野で使用されている。その中で、半導体プロセスで用いられる超純水や薬液を送り出す遠心ポンプや人工心臓用ポンプなどで使用する目的としてベアリングレスモータが期待されている⁽¹⁾。ベアリングレスモータとは、磁気軸受機能とモータの機能を磁気的に一体化したモータと定義されており⁽²⁾、摩擦・摩耗がなく、潤滑油を使用しないので汚損の問題がないなどの特徴を有する。そのため、クリーンな特性が求められている環境や潤滑剤が使えない真空中などのメンテナンスが非常に困難な特殊環境下での使用が考えられている⁽³⁾。しかし、現在までに開発されているベアリングレスモータは、いずれも永久磁石が使用されているものがほとんどである⁽⁴⁾。永久磁石を用いると小型化や効率化を容易に図ることができるが、キュリー温度の制限や外部磁界による減磁などの問題を有している。

この問題に対して、高温環境下などの使用可能な環境を拡大することを目的に電磁石のみを使用するベアリングレスモータを開発してきた。

本論文では電磁界解析ソフトでの解析を元に、小型ベアリングレスモータの設計と動作性・制御性の検討を行った。また、新しく製作した小型の非接触給電機構の周波数特性と給電実験について結果を示し、製作した試作機と制御コントローラについて報告する。

2. 新しい試作機

2.1 試作機の構造

設計した試作機の全体図を図1に、諸元表を表1に示す。非接触な状態である回転子のコイルへ電流を流すために、回転子には磁界共鳴方式を用いた非接触給電機構を搭載することとした。回転子の構造は非接触給電機構を搭載するスペースを確保するために、永久磁石埋込型同期モータを参考に回転子の中央が広く開いた単層構造の回転子设计了。回転子のコイルに電流が流れた際の磁力の方向と磁極を図2に示す。隣り合う歯の発生磁力を反対方向にし、対角線上の歯を同方向に励磁することで磁力の入出量が釣り合うようにした。この形状によって、単層かつ歯の数を減らすことができ、小型で軽い回転子になる。コイルの巻数は軽量化を考慮して50回巻とした。固定子は外径をできるだけ小さくするために回転軸方向にコイルを巻くことで軸方向に厚みを持った構造とした。コイルの巻数は100回とし、3相交流を印加することで浮上と回転の両方を担う。

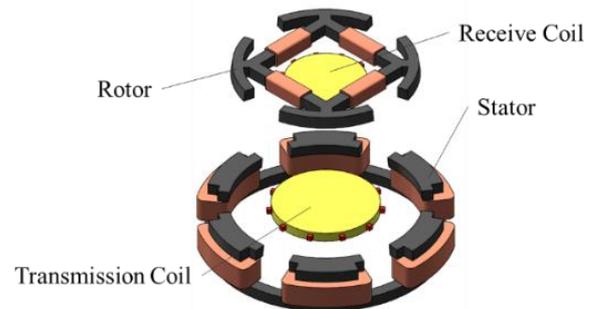


Fig.1 The structure of bearing-less motor

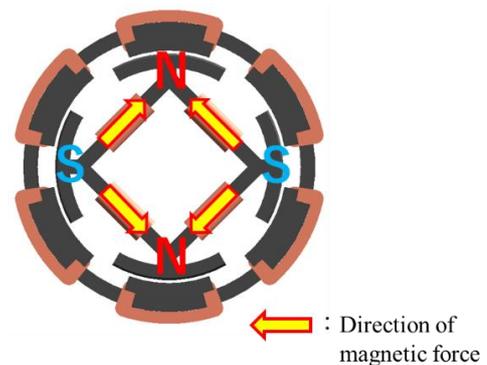


Fig.2 Top view of bearing-less motor showing magnetic poles

Table.1 The specification of bearing-less motor

Parameter	Rotor	Stator
Material	SS400	
Teeth number	4	6
Winding number of coils	50	100
Mass	93 g	-
Outside	Φ78 mm	Φ100 mm
Inside	38 mm	Φ80 mm
Thickness	5 mm	
Air gap	1 mm	
Taper angle of teeth edge	7.5 °	

2.2 必要な浮上力が得られる高さ

コイルに電流を流した際に、回転子はどれだけの浮上力を得られるかを解析した。解析には株式会社 JSOL が提供する電磁界解析ソフト JMAG を用いた。回転子と固定子の上面が水平になる位置を基準として、回転軸方向に-4 mm から 0 mm までの浮上力を 0.5mm ごとに解析した。条件として、図 3 のように固定子を時計回りに U,V,W の順に振り分けた。その後、U 層の歯と回転子の歯を向かい合わせ、互いの歯が異極になるように電流を印加した。この時、回転子には 1 A を、3A の 3 相交流での運用を想定して U 層には 3 A を、V 相と W 相は U 層と逆向きに 1.5 A をそれぞれ印加した。また、3A を 2A にした場合の計算も行った。その結果を下の図 4 に示す。2.1 節の表 1 より必要になる回転子の浮上力は約 0.91 N と計算できることから、2A では必要な浮上力が得られないことがわかった。3A であれば、-1 mm から -3 mm の間で十分に浮上できると考えられる。

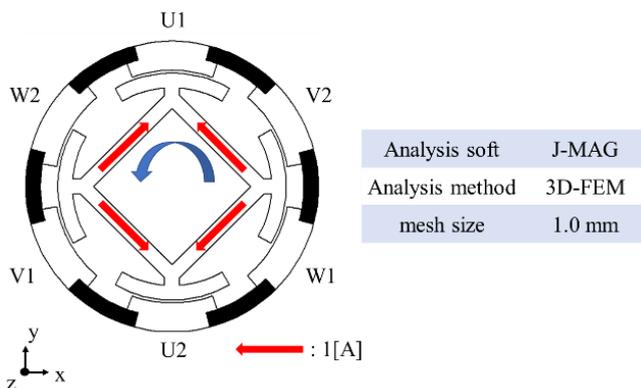


Fig.3 Situation of analysis

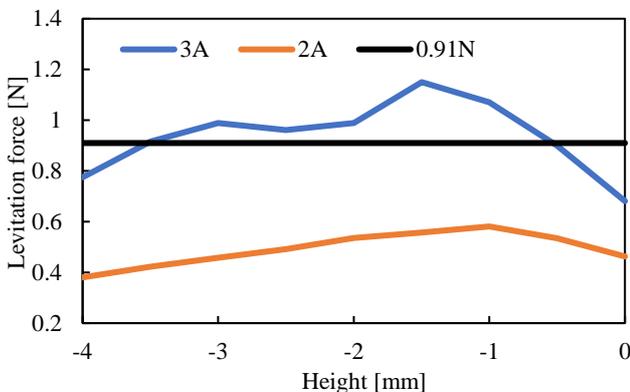


Fig.4 Analysis result of Levitation power

2.3 トルクと浮上力の計算

回転させたときに得られるトルクと浮上力を JMAG で解析した。条件として、高さは必要な浮上力が得られることを考慮して 2.2 節で定めた基準から -1 mm の位置とし、回転子を反時計方向へ 5°ごとに 180°回転させた。電流は回転子のコイルに 1 A、固定子は 3 A を 3 相交流で印加し、10°間隔で計算した。この結果を、トルクを図 5 に、浮上力を図 6 に示す。図 5 では安定点の位置がわかるようにトルクの負の値の部分を消し、黒線で示している。黒線がジャンプしている部分があるが、回転が可能であると考えられる。図 6 では回転子に必要な浮上力が約 0.91 N であることから、この値より小さい部分を消している。また、図 5 の安定点を示す黒線をこの図にも示してある。この結果、黒線は浮上支持力が得られる範囲の中にあるため、浮上、回転可能であると考えられる。

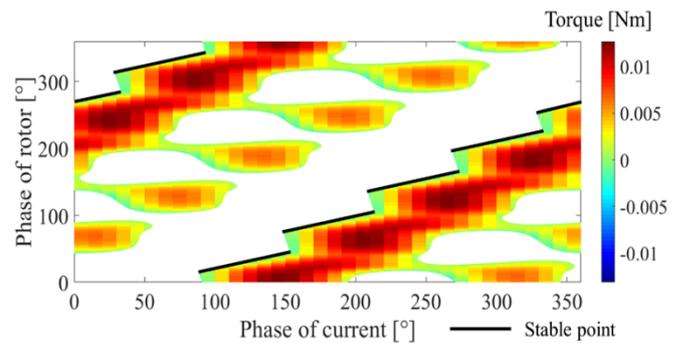


Fig.5 Analysis result of torque at three-phase AC

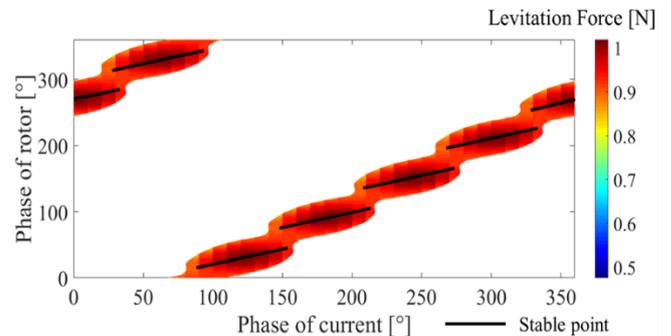


Fig.6 Analysis result of levitation power at three-phase AC

3. 制御性の検討

3.1 高さ方向の制御性

高さ方向の制御性の検討を行った。図 4 より 3A の 3 相交流では -0.5mm の辺りで必要な浮上力である 0.91 N と交わっている。ことから、この位置で安定して浮上し続けることができると考え、高さ方向の制御は受動制御としても問題はないとした。

3.2 水平方向の制御性

2.2 節より動作できる平衡点の位置がわかったので、この位置で制御性の検討を行った。検討は平衡点が 2ヶ所存在する電流の位相(30°, 90°, 150°, 210°, 270°, 330°)で行うことにした。電流の位相は 180°進むと電流の正負が入れ替わり、回転子の歯の磁極も入れ替わる。そのため、電流の位相は 90°, 150°, 210°の 3 つにおいて検討を行うことにした。この電流の位相での平衡点の位置は 90°では回転子の位相が 342.8°と 17.2°, 150°では 42.8°と 77.2°, 210°では 102.8°と 137.2°であった。本論文では電流の位相が 90°で回転子の位相が 16°の時の結果を示す。これらの回転子の位相に回転させた状態で X 軸方向と Y 軸方向に回転中心を基準として -0.9[mm] から 0.9[mm]まで 0.1[mm]ごとに水平移動させたときの各軸方向に発生する力を計算した。固定子に流す電流は、回転子が X 軸方向に移動する際に W2, V1 の電流の絶対値を 0.1A ずつ小さくし、同時に W1, V2 の電流の絶対値を 0.1A ずつ大きくした。Y 軸方向に移動する際は U2 の電流の絶対値を 0.1A ずつ小さくし、同時に U1 の電流の絶対値を 0.1A ずつ大きくした。X 軸方向に水平移動したときの X 軸方向の結果を図 7 に、Y 軸方向の結果を図 8 に示す。また、Y 軸方向に水平移動したときの X 軸方向の結果を図 9 に、Y 軸方向の結果を図 10 に示す。図 7, 図 10 より、移動した軸方向に働く力と力が釣り合う 0 N の軸との交点は電流を変化させると弱めた方に移動している。このことから、この電流と回転子の位相では電流を変化させることで水平方向の制御は可能であることがわかった。しかし、図 8, 図 9 から水平移動させた軸方向とは別の軸方向にも力が出ていることから、制御を行う際には補正が必要であると考えられた。

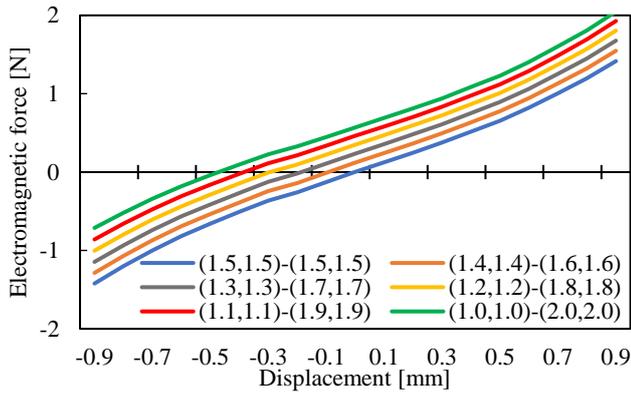


Fig.7 Electromagnetic force in the X-axis direction when moving in the X-axis direction at the rotor phase is 17.2°

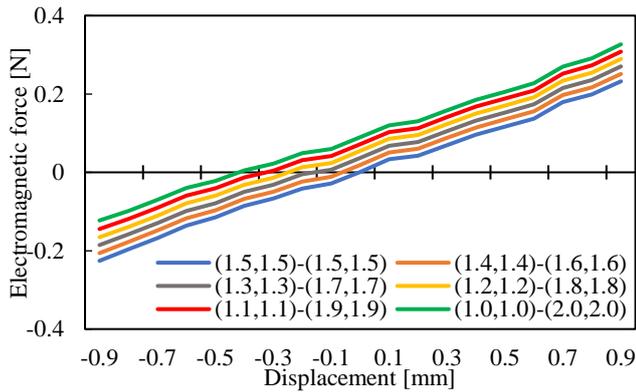


Fig.8 Electromagnetic force in the Y-axis direction when moving in the X-axis direction at the rotor phase is 17.2°

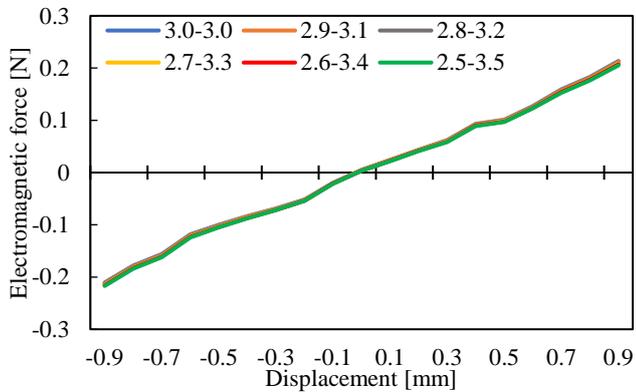


Fig.9 Electromagnetic force in the X-axis direction when moving in the Y-axis direction at the rotor phase is 17.2°

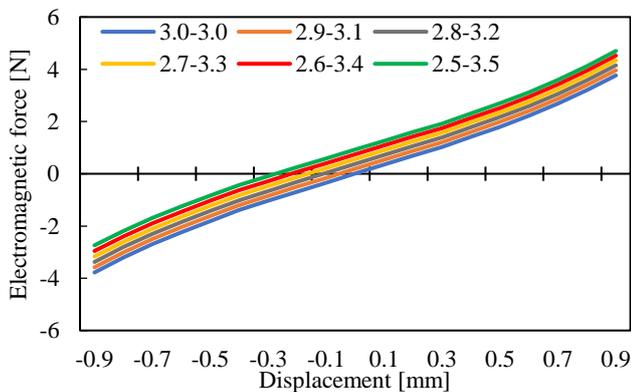


Fig.10 Electromagnetic force in the Y-axis direction when moving in the Y-axis direction at the rotor phase is 17.2°

3.3 傾き方向の制御性

3.2節で使用した電流と回転子の位相で傾き方向の制御性の検討を行った。解析条件は水平状態を基準にして各軸回りに -3° から 3° まで 0.1° ごとに傾けたときの各軸回りに働くトルクを計算した。その結果を図11と図12に示す。どちらの結果も初めは水平状態になるようにトルクが発生した。水平状態となる 0° 付近でトルクが0Nとなり、行き過ぎると戻る方向にトルクが発生することがわかった。この結果から傾き方向において、水平状態への復元力が働くことがわかった。復元力が存在するので、傾き方向は受動制御としても問題はないと判断した。

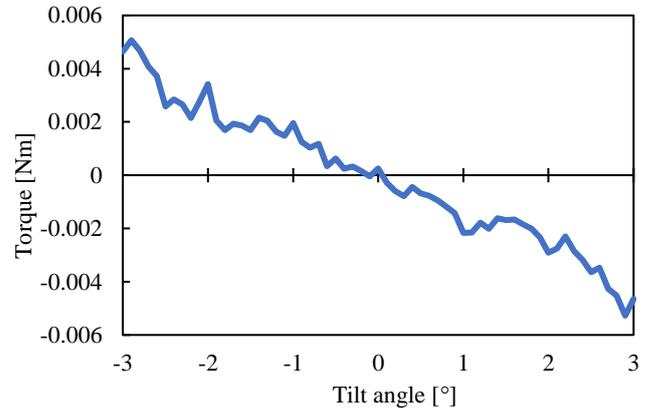


Fig.11 Torque when the rotor phase is 17.2° and tilted around the X axis

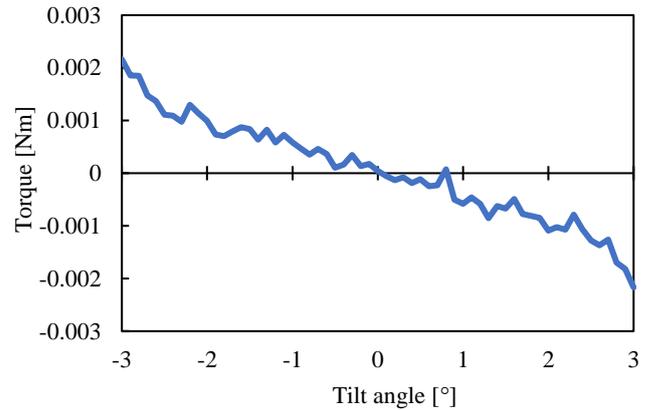


Fig.12 Torque when the rotor phase is 17.2° and tilted around the Y axis

4. 非接触給電機構

4.1 機構の作成

設計した試作機の回転子に搭載する小型の非接触給電装置の作成を行った。製作したコイルを図13に示す。今回、磁界を共鳴させることで、より効率よく給電することができる磁界共鳴方式を採用することにした。コイルには直径 0.3 mm を7本撚ったリッツ線をスパイダー巻で巻いた。巻数は、送電側・受電側でそれぞれ28回巻・18回巻で製作した。送電側の巻数を多くした理由としては、受電側のコイルが横にずれても、必ず送電側のコイルの真上になるようにするためである。この時、各コイルの自己インダクタンスは $19.1\text{ }\mu\text{H}$ ・ $12.8\text{ }\mu\text{H}$ となった。共鳴型非接触給電における共振周波数の関係は $L_1C_1 = L_2C_2 = f^2$ (L : インダクタンス, C : コンデンサ, f : 共振周波数)で求められる⁽⁶⁾。この関係を用いて共振周波数を20 kHzと決め、送電側・受電側のコンデンサの値をそれぞれ $3.32\text{ }\mu\text{F}$ ・ $5\text{ }\mu\text{F}$ とした。



Fig.13 Transmission coil (left) and receiving coil (right)

4.2 この非接触給電機構の共振点

作成した非接触給電機構を用いて、送電側と受電側の共振点を探るためにそれぞれの回路のインピーダンスを計測した。実験では送電側と受電側のコイルを重ねた状態で周りに何も無い場合と、試作機に搭載することを想定して鉄心に囲まれた場合の2通りの場合で計測した。その結果を図14と図15に示す。共に17.5kHzと36kHz周辺でインピーダンスが小さくなっていることから、この周波数域で共振していることがわかった。しかし、4.1節で決めた共振周波数からずれていた。原因として各要素を繋ぐ導線が自己インダクタンスに影響を及ぼしたか、コイルが緩んだ影響で自己インダクタンスが変化したという要因が考えられた。

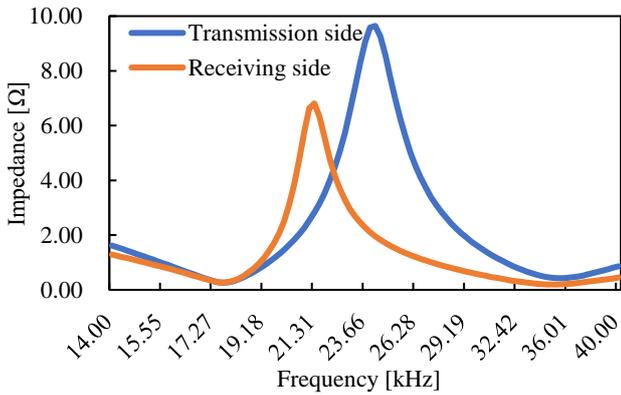


Fig.14 Not surrounded by iron core

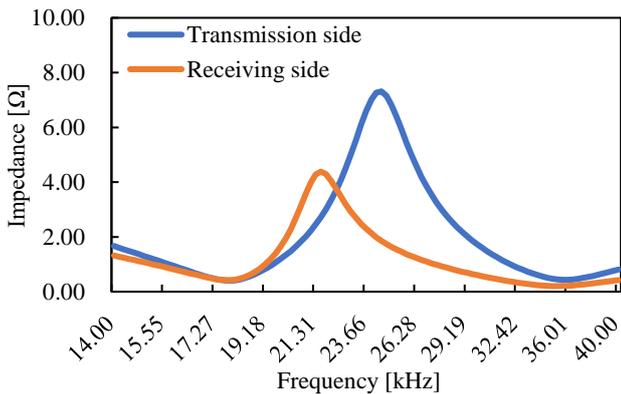


Fig.15 Surrounded by iron core

4.3 送電できる電流の計測

4.1節で製作した機構を用いて図16のような回路を作成し、送電側と受電側のコイルの間隔を変化させて受電側に流れる電流がどのように変化するかを実験した。4.2節の結果から17.5kHz周辺で共振させることとし、入力する交流電圧は10Vとして周波数を14kHzから22kHzまで変化させた。この時、より厳密な共振周波数を求めるために15kHzから20kHzまでは0.1kHzずつ変化させた。抵抗には想定している回転子に巻き付けるコイルの長さから1Ωとした。送電側と受電側のコ

イル間隔は1mmごとに変化させ、4.2節と同様に鉄心がない場合とある場合とでそれぞれ計測した。その結果をそれぞれ図17と図18に示す。横軸に周波数、縦軸に電流の大きさである。この結果より、鉄心に囲まれた場合、共振点がずれたため、間隔が開くごとに送電できる電力が小さくなったと考えられる。しかし、回転子のコイルに流す電流は1Aを想定していることから、動作中に間隔が変化しても必要な電流を回転子に流すことができると考えられた。

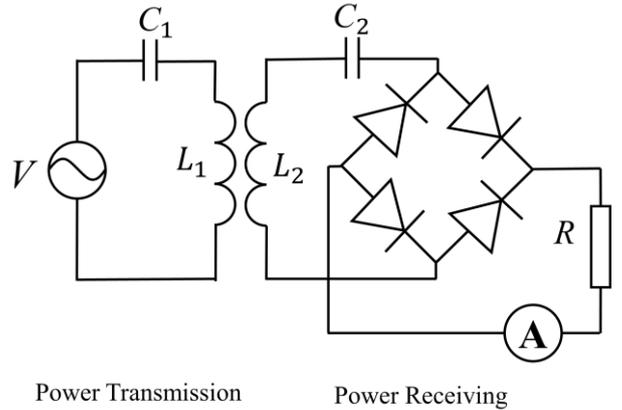


Fig.16 Circuit diagram

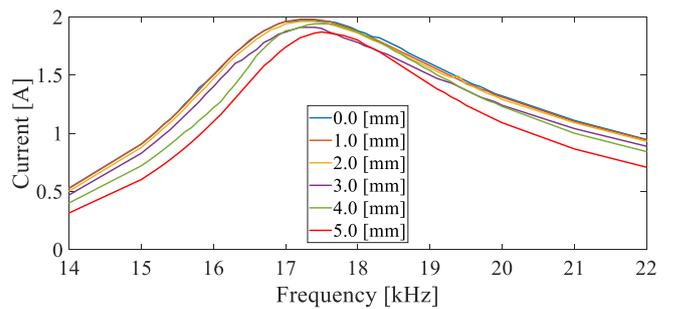


Fig.17 Result of current and resonance frequency without iron

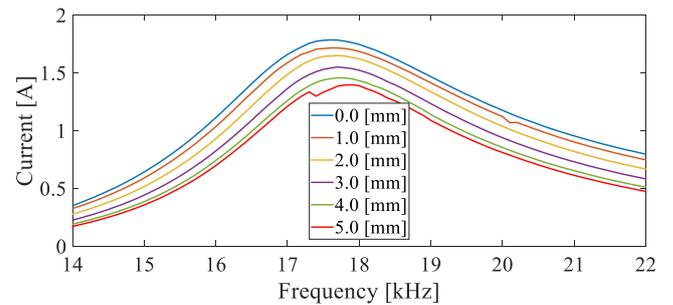


Fig.18 Result of current and resonance frequency with iron

5. 試作機の作成とコントローラの設計

作成した試作機を図19に示す。非接触給電機構は回転子内部に受電用コイルとコンデンサを組み込んだ。その真下に送電用コイルを設置し、コンデンサは固定子の外側に設置した。固定子やレーザーセンサなどは3Dプリンターにて台座を作り、MDFの板にボルトで固定した。センサーターゲットには直径10mm、長さ20mmのステンレスパイプを用いた。回転子の水平方向への読み取りは透過型レーザーセンサを用い、回転子に設置したセンサーターゲットによって変化するレーザーの光量から水平方向の変位を求める。高さ方向と傾き方向に関しては、受動制御とすることに決めているのでこれらを検出するセンサ類は設置していない。

設計したコントローラの概略図を図20に示す。レーザーセンサで読み取った値を用いて回転中心から水平方向の誤差を

計算し、PD 制御を行う。その後、1 から加減算し、固定子のコイルへ印加する 3 相交流に乗算することで各コイルの電流が変化し、回転子の水平位置と回転を制御することとした。

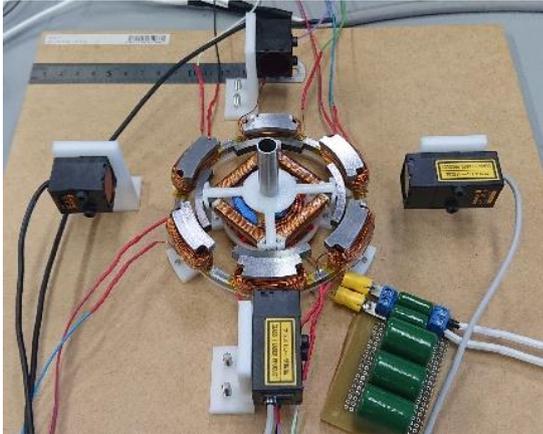


Fig.19 Prototype bearingless motor

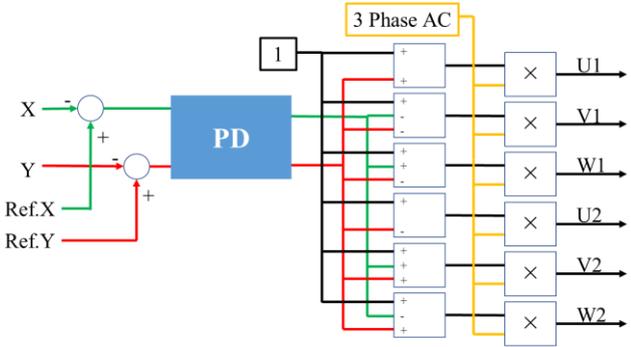


Fig.20 Control program

6. 結言

回転子・固定子が電磁石のみで構成されたベアリングレスモータについて電磁界解析ソフト JMAG による解析を用いた設計を行い、その動作・制御が可能であることがわかった。また、非接触給電機構を作成・実験の結果、新しい試作機に十分な電力を供給できることがわかった。実際に試作機を製作し、コントローラの設計を行った。今後はコントローラの PD 制御において P と D の最適なゲインを実験的に求め、浮上及び回転を成功と性能評価を行う。

参考文献

- (1) 千葉明, 杉本紘也, “磁気軸受からベアリングレスモータへ”, 電気学会誌, Vol.136, No.5, 301-304, (2016)
- (2) 朝間淳一, “ベアリングレスモータの小形化・省電力化”, 日本機械学会誌, Vol.166.No1133, 51, (2013)
- (3) 深尾正, 千葉明, “ベアリングレスモータ”, 電気学会誌解説, Vol.117, No.9, 612-615, (1997)
- (4) 千葉明, 深尾正, “ベアリングレスモータの開発動向”, 電気学会論文誌 D, 産業応用部門誌, Vol.121, No.7, 724-729, (2001)
- (5) 荻原述史, “電磁結合による非接触電力伝送の原理について”, 電気学会論文誌 D, Vol.131, No.5, pp.708-713
- (6) 立花邦彦, “整流コイルを用いたベアリングレスモータの研究”, 高知工科大学博士論文, (2014)
- (7) 森光利至, “共鳴給電によるロータ磁化方式ベアリングレスモータ”, 高知工科大学修士論文, (2015)
- (8) 町田耀平, “非接触給電を用いたベアリングレスモータの開発”, 高知工科大学修士論文, (2017)
- (9) 谷井勲, “非接触給電を用いたベアリングレスモータにおける回転制御方法の検討と試作機による検証”, 高知工科大学修士論文, (2019)
- (10) 蒔田和磨, 岡宏一, 原田明徳, “共鳴型非接触給電を用いた小型ベアリングレスモータの可能性検証”, 第 16 回「運動と振動の制御」シンポジウム, (2019)