アウトロータ型 5 軸制御セルフベアリングモータに関する研究

Study on Outer Rotor Type 5-DOF Self-Bearing Motor

松田 健一^{*1}(正員), 平根 龍也^{*2}, 近藤 良^{*1}, 増澤 徹^{*1}(正員)

Ken-ichi MATSUDA (Mem.), Tatsuya HIRANE, Ryou KONDO, Toru MASUZAWA (Mem.)

A 5-DOF self-bearing motor has been proposed for achieving a compact active magnetic bearing (AMB) system. The 5-DOF self-bearing motor possesses the functions of a motor, two radial AMBs, and an axial AMB. Therefore, it is possible to downsize the AMB system while maintaining its high performance. In this paper, a downsized outer rotor type 5-DOF self-bearing motor is proposed for the application to an artificial heart pump. An experimental setup was fabricated based on the analytical results obtained by a three-dimensional finite element analysis and was then tested. The proposed outer rotor type 5-DOF self-bearing motor proves to have a sufficiently applicable performance for use as an artificial heart pump.

Keywords: active magnetic bearing, 5-DOF self-bearing motor, outer rotor.

1 はじめに

回転体を非接触で支持可能な磁気軸受は、塵埃の発生がなくメンテナンスフリーであるため、低温、真空、クリーンルームなどの特殊環境下において使用されている。通常用いられる磁気軸受システムは、2 つのラジアル磁気軸受ユニット間に駆動用モータを組み込むため、軸長が長くなり小型化や高速回転への対応に問題が残っている。この問題の解決を図るために、1 ユニットで磁気軸受とモータの機能を合わせ持つ 2 軸制御セルフベアリングモータが提案されている[1]。しかし単一ユニットでの運転は、残りの 3 自由度を受動安定に依存する必要があるため、安定性が重要なシステムでは追加のユニットが必要なため小型化に限界があった。

そこで著者らは、単一ステータコアの 5 軸全てを能動的に制御し、従来の磁気軸受システムと同等の安定性を保ちながら、大幅な小型化を実現可能な 5 軸制御セルフベアリングモータを提案し、安定な浮上回転が実現できることを確認した[2][3]。さらに、小型化と高い信頼性が同時に要求される人工心臓ポンプに目し、より小型化を目指したアウトロータ型 5 軸制御セルフベアリングモータの基本構成を提案している[4]。

5 軸制御セルフベアリングモータの特長を生かすことのできる有力な適用対象の一つである、磁気浮上

Fig. 1 Schematic of proposed outer rotor type 5-DOF self-bearing motor.

式人工心臓ポンプの十分な小型化が実現すれば、受動安定性を利用する必要がなくなり、高い信頼性を持つ人工心臓ポンプの実用化が可能である。

人工心臓用ポンプの基本性能として、揚程 100mm Hg, 流量 5L/min が定常的に要求される。ポンプを回転数 3000rpm, ポンプ効率 30% で運転すると仮定すると、必要な回転トルクはおよそ 0.012 Nm となる。解析で得られるトルクは静止トルクであるため、余裕を持たせ、約 3 倍にあたる 0.03Nm, 制御力は、最大 5G の加速度に耐えられる制御力を目標値に設定する。

本研究では、この要求性能を満たす 5 軸制御セルフベアリングモータを実際に試作し、モータ特性や浮上回転特性の実験を行なった結果、人工心臓ポンプに要求される基本性能を十分に達成する、小型のアウトロータ型 5 軸制御セルフベアリングモータの開発が可能であることを確認したので報告する。

連絡先： 松田健一 〒316-8511, 茨城県日立市中成沢町 4-12-1, 茨城大学工学部,

e-mail: kmatsuda@mx.ibaraki.ac.jp

^{*1} 茨城大学 ^{*2} 茨城大学大学院

Fig. 2 Principle of axial and tilt control.

2 アウターロータ型5軸制御セルフベアリングモータの構造と制御原理

2.1 セルフベアリングモータの構造

Fig. 1 に、本研究で提案するアウターロータ型5軸制御セルフベアリングモータの概要を示す。モータを小型化する場合、できるだけロータ径を小型にする必要があるが、インナーロータの大幅な小型化を行うと、回転トルクや傾きトルク不足が問題となってくる。アウターロータは、ロータがステータの外側にあるため、回転トルクや傾きトルクを構造的に確保し易いという点で有利である。

本研究のロータは、表面永久磁石 (SPM) 型であり、ロータ内面と同極の永久磁石をロータ両側面にも張り付けた4極アウターロータで、ステータは、楕形の12突極構造になっている。従来の2軸制御セルフベアリングモータは、ロータのラジアル方向2軸のみを制御するが、5軸制御はロータの回転軸以外の5自由度を全て能動的に制御する。したがって、Fig. 1 に示されるように、径方向2軸を制御するための径方向制御巻線に加えて、ロータの外側突極に配置されたz軸方向制御巻線、さらにx, y軸回りの傾き制御巻線を有し5軸能動制御が可能となる。さらに回転巻線は、中央突極ばかりでなく両側突極も利用できるため、一つの突極部全体に対して巻線を取り付け回転トルクを発生させる。

2.2 セルフベアリングモータの制御原理

5軸制御セルフベアリングモータの回転トルクおよび径方向制御力は、従来の2軸制御セルフベアリングモータと同様に、回転巻線および径方向巻線により発生させる[1]。ここでは、軸方向力および傾きトルクの制御原理を示す。

Fig. 3 Axial and tilt control of 4-pole PM rotor with rotation.

Fig. 2 は、アウターロータとステータの上部断面を示しており、ロータ側面に貼り付けられた永久磁石により、実線のようにバイアス磁束が流れている。この時、軸方向制御巻線あるいは傾き制御巻線により破線のような制御磁束を発生させると、ロータ側面の左右のエアギャップに磁束の不均衡が生じ、この図においては左側が弱めあい右側が強めあうため、結果としてz軸方向の制御力が発生する。ロータの下部断面で、上部と同方向に制御力を発生させると、ロータに対してz軸方向の制御力が発生し、逆方向に発生させるとx軸回りの傾き制御トルクが発生する。

回転しているロータを制御する場合、任意の回転角位置で前述したような軸方向力やトルクを発生させる必要がある。Fig. 3(a) は、軸方向に制御力を発生させる場合の例で、ロータの内側に表記した磁極は、軸方向制御巻線に電流を流した時に生じるオーバーハング部の回転磁界である。4極ロータが回転するとき、ロータと同じ4極回転磁界を、紙面手前側の面で強め合い、奥側の面で弱め合うように発生させることで、紙面手前側への軸方向力が生じる。一方傾き制御は、モータ極数±2極の回転磁界を用いて制御トルクを発生させる。Fig. 3(b) は、回転に同期した6極の回転磁界を、紙面手前側のロータ上部で吸引力が強め合い、ロータ下部で弱め合うように発生させる。奥側の面では、ロータ上部で吸引力が弱め合い、ロータ下部で強め合うことで、任意の回転角に対しx軸回りの傾きトルクが得られる。y軸回りでも同様の傾きトルクが得られ、結果として回転するロータの傾きを制御することができる。

Fig. 4 Dimension of analysis model.

Fig. 5 Configuration of permanent magnets.

3 解析モデルの設定と解析結果

従来の2軸制御セルフベアリングモータは、単一ユニットによる運転において受動安定性を利用するため、ロータ幅をできるだけ薄くする設計が必要であった。しかし、幅の狭いロータの磁気飽和を避けるためバックヨーク部を厚くする必要があり、ロータ外径が増加するため軽量化が難しい。5軸制御セルフベアリングモータの場合、ラジアル方向の2軸に加え、軸方向や傾きの5自由度全てを能動的に制御するため、ロータ幅の増加は問題にならない。本解析では、磁気飽和を生じさせない範囲でロータ幅を広げ、薄肉化することで外径の小型化と軽量化を図る。

Fig. 4 に解析モデルの形状を示す。ステータ、ロータともに鉄心部は、積層珪素鋼板 (35A300) を用いる。アウターロータ型はインナーロータ型と比べて各突極先端部の間隔が広く離れている。本研究では、オーバーハング突極部先端に、Fig. 4 に示すように側面永久磁石の径方向幅 2mm に合わせ、磁石に対向するように幅 2mm、角度 20deg で傘を設ける。この傘を付加しても、永久磁石との対向部の磁束密度の低下はほとんど見られず対向面積が増加するため、軸方向制御力、傾き制御トルクを増加させることができる。このオーバーハング突極は別部品で、図中の破線の○印の部分に示すように、中央の溝の付いたステータコアに差し込んで組み立てる。またロータは、厚さ 3mm と薄型化し、軸方向に幅 15mm とすることで、磁気飽和を抑え外径 $\phi 50\text{mm}$ という小型化を実現した。

Table 1 Parameters for numerical analysis.

Stator diameter	48 [mm]	Stator width	29 [mm]
Rotor diameter	50 [mm]	Rotor width	15 [mm]
Rotor mass	50 [g]	Airgap	1 [mm]
Permanent magnets			
Inner width	6 [mm]	Side width	2 [mm]
Thickness	1 [mm]		
Number of coil turns			
Motor coils	25 [t]	Radial coils	38 [t]
Axial coils	25 [t]	Tilt coils	25 [t]
Target values			
Static torque	0.03 [Nm]	Control force	2.5 [N]

Fig. 6 Numerical results of control forces and torques.

Fig. 5 に永久磁石の形状を示す。磁石はすべてネオジム磁石 N-38H (保磁力 899kA/m) を用い、ロータ内面の永久磁石は幅 6mm、側面の永久磁石は径方向に幅 2mm、厚さはいずれも 1mm である。これらの磁石は、よりスムーズな磁束密度分布となるように、磁極間の先端を細くする形状を採用している。

この解析モデルに対し、各制御巻線に流す電流を、発熱等を考慮し最大 3A 以内とし、設定した要求性能を達成できるかどうか、またその時ステータやロータに磁気飽和が発生していないかを確認するために解析を行う。解析条件としては、ロータ・ステータは電磁鋼板、永久磁石は前述の N-38H、エアギャップは全て

Fig. 7 Contour plot of the magnetic flux when the all windings are driven at 2A simultaneously.

Fig. 8 Photo of rotor and stator.

Fig.9 Experimental setup for motor performance tests.

1mm で、電磁鋼板の B-H 特性を踏まえた非線形解析とする。解析のパラメータを Table 1 に示す。解析は、汎用解析ソフト ANSYS を用いた 3 次元磁場解析で、解析結果を Fig.6 示す。電流を 0.5A ごとに变化させ、トルクおよび制御力を求めた。その結果、上の図で(Motor)は回転数ゼロにおける静止トルクであり 25 巻の回転巻線に約 2.3A の電流を流したとき、傾きトルク(Tilt)は 25 巻の巻線に約 1.2A の電流を流したとき、目標値である 0.03Nm を達成した。また下の図で、径方向制御力(Radial)は、38 巻の制御巻線に約 2.8A の電流を流したとき、軸方向

Fig.10 Experimental results of voltage vs. torque.

Fig.11 Experimental results of current vs. torque.

Fig.12 Experimental results of power consumption vs. torque.

Fig.13 Experimental results of motor efficiency vs. torque.

制御力(Axial)は 25 巻の巻線に 0.8A の電流を流したとき目標制御力 2.5N を達成した。

Fig. 7 に、全ての巻線に同時に 2A を流した時の磁束密度分布を示す。各巻線には、回転トルクが $\pm \theta_z$ 、傾

Fig.14 Photo of experimental setup for levitation and rotation performance tests.

きトルクが $+\theta x$, 径方向力が $+y$, 軸方向力が $+z$ 方向に発生するように励磁電流を流しているため, 磁束密度分布は軸対称とはならず, オーバーハング突極の一部や, ロータの磁極の切り替わる部分で磁気飽和に近い状態になっている。しかし, 実際の制御ではこのような制御電流が流れることはないため問題ないと考えられる。また各巻線に単独で 2A の電流を流した時は, 磁気飽和に至っていないことも確認した。

4 アウターロータ型 5 軸制御セルフベアリングモータの性能試験

3 次元磁場解析の結果をもとに設計, 製作したアウターロータ型 5 軸制御セルフベアリングモータを用いて, モータ特性や浮上特性などの性能試験を行った。

4.1 モータ特性試験

Fig. 8 に, 製作した 5 軸制御セルフベアリングモータの写真を示す。(a) は 4 極アウターロータで, ロータ内面と側面に同じ極性の永久磁石を貼り付け, 軸出力を取り出すための接続用ホルダーを取り付けた写真である。(b) は, 回転巻線と浮上巻線を配置したステータの写真で, 今回使用する巻線はできるだけ省スペース化を図るため, 最大 4A の電流を流せる平角線 ($0.25 \times 0.95\text{mm}$) を採用した。

Fig.9 は, モータ特性を測定するための実験装置の概要図である。ステータをホルダーで固定し, 円筒状のコネクタにロータを接続し, これをベアリングで支持したシャフトに取り付けモータ出力を測定する。

モータ特性としては, PI 制御により速度一定でモータを回転させ, 600rpm から 4200rpm までの各回転数に

Fig.15 Configuration of control system.

Table 2 PID Controller Gains.

Gains	Setting value
Proportional gain	150 [V/mm]
Integral gain	5.0 [V/(s·mm)]
Derivative gain	0.3 [V·s/mm]

おける負荷特性を計測した。Fig. 10 から Fig.13 に, 人工心臓の目標性能である 0.03Nm まで負荷トルクを与えた時の電圧, 電流, 消費電力, そしてモータ効率を示す。今回の実験の最高回転数である 4200rpm において, 0.03Nm の負荷トルクを 1.8A の電流で達成し, この時の消費電力は 10W であった。モータ効率は, 回転数 4200rpm, トルク 0.02Nm のとき最大で 46.1%であった。小型モータであることから, 鉄損や銅損に加えシャフト支持部の機械損などが効率に大きく影響していると考えられる。

4.2 2 軸制御による浮上回転実験

実験は, シャフトの片側を玉軸受で支持し, ロータの自由度をラジアル方向 2 軸のみとして浮上回転特性を計測した。Fig. 14 に, 実験装置の写真を示す。装置は重力の影響を避けるため縦置きに設置し, 渦電流センサによりロータの径方向変位を検出する。

Fig.15 に, 浮上回転実験の制御系の概要を示す。変位センサからの信号は, DSP (dSPACE DS-1104) に取り込まれ, PID コントローラからの制御信号をパワーアンプに出力し, 2 相 6 極の制御巻線を駆動することで軸方向制御力を発生させる。

浮上実験を行うために, まず静的な制御力特性を測定した。制御電流を 0A から 3A まで流した時の解析値と実験値を Fig.16 に示す。実験で得られた制御力は解析結果を少し下回っているが, ほぼ類似した特性が得られることが分かった。次に, ロータを浮上制御し,

Fig.16 Radial control forces of analysis and experimental results.

Fig.17 Experimental results of step response when the displacement reference is 0.05mm.

Fig.18 Experimental results of frequency response when the sinusoidal displacement disturbance is 0.006mm.

Fig.19 Orbital trajectories of the rotor.

Fig.20 Experimental results of power consumption vs. rotating speed.

ステップ応答と周波数応答実験を行った。用いた PID コントローラの各ゲインを Table 2 に示す。Fig.17 は、0.05mm のステップ入力に加わった時の応答で、微小入力のためノイズ成分が大きくなっているが、オーバーシュートもほとんどなく、ステップ入力から最初のピークまでの行き過ぎ時間が約 0.004s であり良好な結果が得られた。Fig.18 は、振幅 0.006mm の正弦波状の微小外乱を変位信号に加えた時のロータの y 方向変位の周波数応答で、115Hz の共振ピークで 3dB と、こちらも良好な特性を示している。

Fig.19, Fig.20 に、浮上回転しているロータの軸心軌跡と消費電力を示す。Fig.14 に示すように、ロータに付属部品を取り付け、バランスも未調整にかかわらず、目標回転数である 3000rpm において、最大振幅が約 0.03mm 以内という安定した浮上回転特性を示した。

またこの時の消費電力は 8.78W で、エネルギー消費を十分低く抑えられること確認した。

5 まとめ

本研究では、人工心臓ポンプに適用可能な、ロータ径 $\phi 50$ mm、ステータ幅 29mm という非常に小型のアウトロータ型 5 軸制御セルフベアリングモータの開発を行った。その結果、人工心臓ポンプの要求性能である 0.03Nm のトルクを 600rpm から 4200rpm の範囲で達成できることを確認するとともに、目標回転数 3000rpm において、最大振幅は 0.03mm 以内であり、消費電力 8.78W という良好な結果が得られた。これらの結果より、提案するアウトロータ型 5 軸制御セルフベアリングモータは、人工心臓ポンプの要求性能を十分に達成しており、高い信頼性と十分な小型化が同時に実現可能であることを確認した。

(2013 年 10 月 25 日受付, 2014 年 5 月 10 日再受付,
2014 年 5 月 23 日再々受付)

参考文献

- [1] Okada, Y., Dejima, K., and Ohishi, T., “Analysis and Comparison of Synchronous Motor and Induction Motor Type Magnetic Bearing”, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.31, No.5, pp.1047-1053, 1995.
- [2] 松田健一, 石川達也, 増澤徹, 近藤良, “5 軸能動制御型セルフベアリングモータの開発”, 日本 AEM 学会誌, Vol.16, No2, pp.101-107, 2008.
- [3] Ishikawa, T., Matsuda, K., Kondo, R., Masuzawa, T., “5-DOF Controlled Self- Bearing Motor”, JSME Journal of System Design and Dynamics, Vol.3, No.4, pp.483-493, 2009.
- [4] 松田健一, 寺山, 増澤徹, 近藤良, “アウトロータ型 5 軸制御セルフベアリングモータの開発”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.777, pp.1949- 1959, 2011