IPM 型 5 軸制御セルフベアリングモータの永久磁石配置に関する研究*

松田 健一^{*1}, 佐藤 心平^{*2}, 近藤 良^{*1}, 増澤 徹^{*1}

Study on Permanent Magnet Arrangement for IPM Type 5-DOF Self-Bearing Motor

Kenichi MATSUDA ^{*1}, Sinpei SATO, Ryou KONDO and Toru MASUZAWA

^{*1} Ibaraki Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Nkanarusawa4-12-1, Hitachi, Ibaraki, 316-8511 Japan

The 5-DOF self-bearing motor possesses the functions of a motor, two radial AMBs, and an axial AMB. Therefore, it is possible to miniaturize the AMB system with maintaining high performance. In this paper, an interior permanent magnet (IPM) type 5-DOF self-bearing motor is proposed. The IPM rotor generates bias fluxes to not only the radial direction but also the overhanging stator direction without side surface permanent magnets. Optimum configuration of the permanent magnets is analyzed using 3 dimensional finite element method. The results show the feasibility of the more compact and highly-reliable 5-DOF self-bearing motor.

Key Words : Active Magnetic Bearing, 5-DOF Self-Bearing Motor, Interior Permanent Magnet Motor

1. はじめに

磁気軸受システムは、軸長が長く小型化や高速回転への対応が問題となるため、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⁾。しかしながら、単一ユニットによる運転では、安定性が重要なシステムへの適用には問題があり、大幅な小型化を実現することができなかった。そこで著者らは、単一ロータの 5 軸全てを能動的に制御することで、高性能を維持しながら大幅な小型化が実現可能な Surface Permanent Magnet (SPM) 型 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示した⁽²⁾⁽³⁾。

本研究では、永久磁石をロータ内部に配置する、Interior Permanent Magnet (IPM) 型 5 軸制御型セルフベアリングモータを提案する。IPM 型は SPM 型と比較し、より堅牢で信頼性が高く高効率化が可能である。まず代表的な 3 タイプの IPM ロータ形状について、人工心臓ポンプの要求性能を目標性能とした比較解析を行う。さらに小型化実現のため、最も良好な特性を示す形状に対し、磁石の厚さや保磁力を変更した最適化解析を行う。これらの結果から、IPM 型 5 軸制御セルフベアリングモータの最適な永久磁石配置について報告する。

2. IPM 型 5 軸制御セルフベアリングモータの構成

本研究で提案する、IPM 型 5 軸制御セルフベアリングモータの概要を図 1 に示す。図は、4 極 IPM ロータと 12 突極ステータで構成した場合で、ステータの中央突極に浮上巻線、中央から両側に突き出した側面突極に径方向と傾き制御巻線、そして突極全体に回転巻線を設置した構成になっている。

図 2(a)に、SPM ロータとステータ上部断面間の磁束の流れを示す。ロータ外周の永久磁石からの出た磁束はステータ中央突極に向かい、ロータ側面の永久磁石から出た磁束は側面突極に向かう磁束の流れを形成する。一方、図 2(b)の IPM ロータの場合、ロータ側面に永久磁石を設置しなくても、ステータ中央突極と側面突極に向かう磁

* 原稿受付 2011 年 10 月 29 日

^{*1} 正員、茨城大学 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

^{*2} 茨城大学大学院理工学研究科

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

Fig. 1 Configuration of IPM type 5-DOF self-bearing motor

Fig. 2 Flux paths of 5-DOF self-bearing motor

束の流れを形成することができる。永久磁石をロータ内部に配置することで、磁石の飛散が無くなり、より小型で信頼性の高いロータ構造が実現できる。さらに IPM 型では、SPM 型のマグネットトルクに加えリラクタンストルクも利用できるため、高トルク・高効率の運転が可能になる。

3. IPM ロータの永久磁石基本形状の選定

IPM 型ロータの永久磁石配置は高い自由度があり、浮上制御のための制御磁束を有効に活用できる磁石配置が要求される。そこで最適な形状設計を進めるにあたり、4 極 IPM ロータと 12 突極ステータで構成した解析モデルについて、有限要素法による汎用解析ソフト ANSYS を用いて比較検討を行う。解析対象としては、本モータの特長を生かすことのできる有力な適用対象である人工心臓ポンプとし、基本性能として、0.03Nm の回転トルクと、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⁽⁴⁾。

まず有力な基本形状を確認するために、永久磁石を半径方向に放射状に配置する Type1、永久磁石をロータ外周付近に円弧上に配置する Type2、永久磁石を直線的に四角形状に配置する Type3 の 3 つの形状についてその比較検討を行った。各形状のロータ外径 $\phi 30\text{mm}$ 幅 10mm、ステータ外径 $\phi 60\text{mm}$ 幅 19mm で同一サイズとし、永久磁石の体積総量もほぼ同一量とし、両側突極部のみ最大値の得られる長さを適用した。図 4 は Type3 の解析モデルと巻線条件で、この形状が総合的に一番少ない巻数で目標値を達成できる有力な永久磁石配置であることが分かった。

Fig. 3 Three types of IPM rotors

Fig. 4 Analysis model of type3 and winding conditions

4. Type3 の永久磁石の最適化

4・1 永久磁石の形状を変更した場合

3つの形状について解析した結果、Type3 が最も少ない巻数で目標値を達成できることから、この Type3 の形状に対し、より小型化が可能な永久磁石構成について検討する。永久磁石は電磁石から見るとエアギャップと同様に磁気抵抗となり、制御磁束を発生させるためにより大きな起磁力が必要となる。そこで、永久磁石全体を厚くするのではなく、磁石の一部を厚くすることで、電磁石から見た磁気抵抗を抑え、かつバイアス磁束を増加させることを試みる。解析条件を表 1 に、追加する磁石を、外側に延長する配置例を図 5 に示す。図 6 は解析結果で、回転トルクや径方向力はほとんど影響を受けず、傾きトルクや軸方向力が僅かに減少するという結果になった。4mm 付近で径方向力が少し落ち込むのは、付加した磁石先端部がロータ表面に近くなり、その周辺で部分的な磁気飽和を生じることが影響していると考えられる。永久磁石を内側に厚くしても特性の改善は見られず、部分的な永久磁石の増加は回転トルクや径方向力にほとんど影響しないことが分かった。

次に、永久磁石全体の厚さを変更した場合について検討する。永久磁石を 1mm から 3mm まで 0.5mm 刻みで増加させた時の解析結果を図 7 に示す。永久磁石の厚みを増加させていくと、トルクおよび制御力全ての増加につながる事が分かる。とくに、1.0mm から 1.5mm に増加させたときに大きな増加が見られ、それ以上では大きな増加は見られない。これは、永久磁石を厚くすると磁気飽和の影響がでてくることや、回路の磁気抵抗が増加することで制御磁束が減少するためと考えられる。

4・2 永久磁石の保磁力を変更した場合

磁石形状は Type3 のままで、永久磁石の保磁力を増加させた場合について比較解析を行う。保磁力は N-38 (9.15×10^5 A/m)、N-42 (9.55×10^5 A/m)、N-48 (9.95×10^5 A/m) の 3 種類について解析を行った。解析結果を図 8 に示す。N-38 から N-42 にすると、トルクおよび制御力のいずれも比較的大きな増加が見られるが、N-42 から N-48 ではあまり増加が見られない。この結果として、保磁力の増加は基本的にトルクおよび制御力の増加につながるが、大きすぎると同一形状では磁気飽和が生じ大きな増加にはつながらないと考えられる。

Table 1 Analytical conditions for IPM type 5-DOF self-bearing motor

Analytical conditions				Base permanent magnets (Conservative force 9.15×10^5 A/m)			
Stator diameter	60 [mm]	Stator width	19 [mm]	Width	10 [mm]	Length	20 [mm]
Rotor diameter	30 [mm]	Rotor width	10 [mm]	Thickness	1 [mm]		
Rotor mass	50 [g]	Stator mass	171 [g]	Added permanent magnets length (Width 4 [mm])			
Air gap	1 [mm]			To outside	1~4.5 [mm]

Fig.5 Partially extended permanent magnets configuration of type3

Fig.6 Analytical results of control torques and forces when PMs are partially extended

Fig.7 Analytical results of control torques and forces when PMs are totally extended

Fig.8 Analytical results of control torques and forces when coercive forces are increased

4・3 IPM 型 5 軸制御セルフベアリングモータの最適化

Type3 の永久磁石変更による解析結果をもとに、磁石厚さ 1.5mm、保持力 9.55×10^5 A/m を採用し、人工心臓ポンプの要求性能を満たす IPM 型 5 軸制御セルフベアリングモータの最適化を行った。解析条件を表 2 に、巻線の占積率を 40% 以下とした時の解析モデルを図 9 に、各巻線に 0A から 2A まで電流を流した時の解析結果を図 10 に示す。その結果、ステータ外径 $\phi 55$ mm において、人工心臓ポンプの要求性能を達成できることを確認した。

Table 2 Analytical conditions for optimization

Analytical conditions				permanent magnets (Conservative force 9.55×10^5 [A/m])			
Stator diameter	55 [mm]	Stator width	20 [mm]	Width	10 [mm]	Length	20 [mm]
Rotor diameter	30 [mm]	Rotor width	10 [mm]	Thickness	1.5 [mm]		
Air gap length	1 [mm]

Fig.9 Analytical model for optimization

Fig.10 Analytical results of optimized IPM type 5-DOF self-bearing motor

5. まとめ

本研究では、IPM 型 5 軸制御セルフベアリングモータを提案し、IPM ロータの永久磁石の基本形状とその最適化について検討した。その結果、永久磁石を四角形状に配置することでより良好な特性が得られることが分かった。さらに、この形状において人工心臓ポンプの要求性能を達成できる最適化設計を行い、ロータ外径 $\phi 30\text{mm}$ 、ステータ外径 $\phi 55\text{mm}$ 、幅 20mm という十分な小型化が実現できることを確認した。

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 (1995), pp.1047-1053.
- (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(2008), pp.101-107.
- (3) Ishikawa, T., Matsuda, K., Kondo, R., and Masuzawa, T., "5-DOF Controlled Self- Bearing Motor", *JSME Journal of System Design and Dynamics*, Vol.3, No.4 (2009), pp.483-493.
- (4) 松田健一, 寺山昌幸, 近藤良, 増澤徹, "アウターロータ型 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(2011), pp.1949- 1959.