超電導磁気軸受の剛性制御による制振手法の検討

Examination of Vibration Damping Method by Controlling the Rigidity of Superconducting Magnetic Bearings

村上 岩範^{*1}(正員), 趙 一鳴^{*1}, 山下 尚人^{*1}(学生員)

Iwanori MURAKAMI (Mem.), Yiming CHO, Naoto YAMASHITA (Stu. Mem.)

In this study, we developed a method to control vibration of a superconducting magnetic bearing flywheel using a repulsive levitation system that combines permanent magnets and coils. Generally, in the repulsive type magnetic levitation system using only permanent magnets, the repulsive force in the levitation direction is strong, but it is unstable in other directions. Therefore, the pinning effect of high-temperature superconductors is used to increase the stability. However, the resonance in the radial direction was large, and countermeasures were required. Thus, we propose a method to suppress the amplitude by changing the radial stiffness. In this method, we change the current applied to the coil inserted between the repulsion magnets. This makes it possible to change the radial stiffness. Vibration is controlled by changing the stiffness at resonance point. The above vibration control method was verified by experiments, and the usefulness of this proposal was clarified.

Keywords: magnetic bearing flywheel, vibration control, superconductor.

(2019 年 10 月 30 日受付, 2021 年 2 月 24 日再受付)

1 緒言

近年, 様々な社会的要請により自然エネルギーによる発電が増加している。しかしながら, このような発電方式は発電時の出力制御が困難なため, 能動的に活用できる電力貯蔵技術が重要な要素となる。従来バッテリー等の化学的手法による蓄電方式が一般化しているが, このような方式は充電に時間が必要とされまた劣化の問題等があり, 入出力頻度の高いシステムには不向きである[5]。これに対し電力貯蔵フライホイール化学的蓄電池に代わる代表的な手法の一つと言える[6]。ここで重要となるのはフライホイールの回転抵抗の低減化であり, これを実現するために電磁力を用いた完全非接触の磁気浮上法磁気軸受が必須と言える。

磁気浮上の一種として永久磁石の吸引反発力を利用するものがある。永久磁石を使用することにより, エネルギー供給することなく大きな浮上力を実現できる点で, 非常に有用な浮上方向と考えられている。しかし, 浮上方向に限った場合, 吸引力を利用した吸引型は, 吸引力が負の復元力となり, 不安定となる。対して反発型の場合, 浮上方向では反発力が正の復元力

として働き, 安定している。しかし, 浮上方向以外では逆に不安定となる。

そこで本研究で使用する磁気軸受では, 常に浮上力を得られる永久磁石を用いた反発型の磁気浮上と, 浮上方向以外を安定させるために第Ⅱ種高温超電導体を併用する。高温超電導バルク体(以降, HTS Bulk あるいは HTS bulk)を用いることでピン止め効果による拘束力を得て, フライホイール回転時に無制御での浮上を可能としている[1-4]。しかし半径方向での振れまわり共振時の振動が大きく, 高回転数への移行時に浮上体が接触・衝突を起こす恐れがある。本研究では安定して高回転数へ移行するために, 半径方向共振時の最大変位を小さくする手法を提案する。これを実際に磁気軸受に適用し, フライホイール駆動時の制振実験を行い, 有用性を検証した。

2 高温超電導磁気軸受の構成

本研究で使用した磁気軸受の構成を Fig. 1 に示す。固定子の中央部に HTS bulk を配置し, ロータ側には HTS bulk の側面と上面の位置に永久磁石と磁気収束用ヨークを配置した。これにより, 側面と上面の永久磁石間に磁気回路を構成し, 通常の高温超電導磁気軸受に比べて大きな侵入磁束密度を得られる。この高い侵入磁束密度から, 強いピン止め力を発生させる構造と

連絡先: 村上 岩範, 〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1, 群馬大学大学院理工学府, 知能機械創製部門,
e-mail: murakami@gunma-u.ac.jp

^{*1} 群馬大学

Fig. 1 Configure of superconducting Magnetic bearing.

Table 1 Specifications of the HTS bulk.

Material composition	Gd - Ba - Cu - O type
Maker	NIPPON STEEL CORPORATION
Outside diameter [m]	47.0×10^{-3}
Inside diameter [m]	20.0×10^{-2}
Height [m]	8.0×10^{-3}

Table 2 Dimensions of Coil.

Dimensions of Outer Coil	
Outside diameter of outer coil [m]	0.098
Inside diameter of outer coil [m]	0.078
Height of outer coil [m]	0.010
Wire diameter of outer coil [m]	7.5×10^{-4}
Resistance of outer coil [Ω]	1.6
Dimensions of Inner Coil	
Outside diameter of inner coil [m]	0.054
Inside diameter of inner coil [m]	0.034
Height of inner coil [m]	0.010
Wire diameter of inner coil [m]	7.5×10^{-4}
Resistance of inner coil [Ω]	1.1
Dimensions of Coil Set	
Resistance of coil set [Ω]	2.8

なっている。本研究で使用した HTS bulk の仕様を Table 1 に示す。

永久磁石により、反発型磁気浮上部の中空に電磁石を固定することで、磁気反発部の磁場を可変できる構造となっている。本研究では2つの空芯コイルを直列に接続し、1つの電磁石として使用した。使用した2つのコイルの諸元を Table 2 に示す。またこれ以降、電流の方向を、ステータ側の永久磁石の磁束を強める時に正、弱める時に負の方向とする。これにより、正の電流を印加した時に反発力が強くなり、負の電流を印加した時に反発力が弱くなる。

3 制振原理

これまで超電導磁気軸受部の剛性を変化させることで振動低減についての報告がなされている[7-8]。また、筆者らの研究において、反発型磁気浮上部の磁場を変動することにより、浮上系全体での半径方向剛性を変更することが可能であることが実験的に明らかとなっている。この結果として磁気反発部の磁束密度の変動と、半径方向の復元力の関係を Fig. 2 に示す。この研究では、磁場の変動の方法として、反発型磁気浮上部の永久磁石間の距離を変更することで、磁場を変更している。この図から、磁束密度を変動することにより半径方向の復元力が変動し、剛性を変動することが確認できた。

そこで本研究では、2種類の剛性の異なる状態を用いる。制振の原理図を Fig. 3 に示す。破線が従来の磁気軸受での回転時の振幅である。本研究で用いる2種類の状態が、一点鎖線である。回転開始時は共振周波数の高い状態にしておき、共振により振幅が大きくなる前に、共振周波数が低い状態にする。これにより、図の太線のような周波数応答にして、共振を抑制する。

Fig. 2 Measurement results of radial restoring force from past experiments.

Fig. 3 Principle diagram for vibration control.

Fig. 4 Simulation of magnetic flux density at 0 A.

Fig. 5 Simulation of magnetic flux density.

4 磁気軸受の磁場解析

本研究で使用する磁気軸受の磁束反発部を電磁界解析ソフトウェア「JMAG-Designer」により静解析を行った。反発型磁気浮上部の磁束密度が、コイルに印加する電流によりどの程度変化するか調べた。0 A での磁気軸受全体の磁束密度のベクトルプロットの結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 より、永久磁石の間に配置した磁気収束用ヨークによって強い磁束が生成され、HTS bulk 内部に侵入していることが分かる。

また、反発型磁気浮上部に用いている、上部永久磁石下面 (Fig. 4 の破線矢印) の位置での、磁束密度の半径方向での変化を Fig. 5 に示す。磁束密度を計測した所、+5 A の時に 309.4 mT, -5 A の時に 292.5 mT となり、16.9 mT の磁束密度の変動が確認できた。

これにより、本研究で使用する電磁石に印加する電流を、+5 A と -5 A を切り替える事により、磁気浮上部の磁束密度が変化することが確認できた。よって電磁石による磁場の変動で、半径方向の剛性が変化することが予想される。前述の通り、二種類の剛性を利用することで新たな周波数応答が得られ、制振が可能である。この二種の剛性は先に述べたように電磁石によりほぼ瞬間的に変更可能なことから、今回提案する制振手法を適用できる可能性が確認できた。

5 実験装置及び駆動方法

本研究で使用した実験装置全体の構成を Fig. 6 に示す。実験装置はそれぞれ、①浮上回転体、②電磁石、③固定側永久磁石、④高温超電導バルク体 (HTS Bulk)、⑤液体窒素用配管、⑥駆動用コイル、⑦レーザー変位計により構成される。

また、浮上回転体の諸元を Table 3 に示す。HTS Bulk は、実験装置下部の配管により供給される液体窒素によって、臨界温度以下となり、超電導状態となる。また浮上状態となった浮上回転体は、組み込まれた 6 極の駆動用永久磁石を、3 相 9 スロットの駆動用コイルにより回転させる。駆動用コイルは、電流アンプにより増幅された信号発生器による交流電流が印加される。ここで、駆動コイルは 3 相であるため、信号発生器による交流信号の 1/3 の周波数で、浮上回転体は回転する。

浮上回転体の半径方向の変位は、レーザー変位計に接続した DSP により AD 変換し、時系列データとして

- ① flywheel floating body
- ② Stator Electromagnet
- ③ Stator repulsive permanent magnet
- ④ HTS bulk
- ⑤ Pipe for liquid nitrogen
- ⑥ Driving coil
- ⑦ LASER displacement meter

Fig. 6 Model of experimental equipment.

Table 3 Dimensions of flywheel floating body.

Diameter [m]	0.220
Height [m]	0.039
Mass [kg]	3.70
Moment of inertia around rotation axis [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]	2.20×10^{-2}

Fig. 7 Frequency of flywheel floating body.

PC に保存する。

信号発生器の生成する交流信号により回転した、浮上回転体の周波数を、Fig. 7 に示す。0 s から 30 s で 6.7 Hz となり、30 s から 90 s で 13.3 Hz となる。共振周波数が 10~13 Hz 付近であったため、制振手法を適用しやすくするために周波数の変化率を変更した。

6 制振実験

6.1 実験方法

共振時の振幅を調べるために、浮上回転体の回転数を徐々に上げた時の半径方向変位の計測を行った。最初に、浮上回転体を固定した状態で超電導体を冷却し、ピン止め効果により、浮上回転体が拘束されたことを確認し、浮上回転体の固定を外して浮上状態とした。磁場に影響を及ぼさないため、冷却開始時から回転開始時まで、電磁石の端子は解放した。浮上回転体が浮上後に、アンプにより増幅された信号発生器による交流信号を駆動コイルに印加し、浮上回転体の回転を行った。

浮上回転体を回転させる際の電磁石は、以下の 4 つの条件で実験を行った。

- 1) 電磁石に常に+5 A を印加する
- 2) 電磁石に常に-5 A を印加する
- 3) 制振手法を適用する（電磁石に+5 A を印加した状態で回転させ、共振前に-5 A に切り替える）

切り替えの方法は、信号発生器が生成する交流電流が既定の周波数に達した時切り替えた。

6.2 +5 A を印加

常に+5 A を電磁石に印加させロータを回転させた時の結果を示す。この時の共振時の最大振幅を計測したところ、1.47 mm であった。また、この時の変位の時系列データを FFT 変換したグラフを Fig. 8 に示す。この時の信号強度の最大値が出た周波数は、12.1 Hz であった。

電磁石に+5 A を印加した場合、ステータ側の永久磁石と同じ方向の磁束を発生し、反発力を強める。これにより剛性が高くなり、共振周波数が高くなることが期待されたが、電磁石無しの場合と差が小さかった。

6.3 -5 A を印加

次に、-5 A を電磁石に印加させ浮上回転体を回転させた時の結果を示す。この時の共振時の最大振幅を計

測したところ、1.63 mm であった。また、この時の変位の時系列データを FFT 変換したグラフを Fig. 9 に示す。この時の信号強度の最大値が出た周波数は、11.6 Hz であった。電磁石に -5 A を印加した場合、ステータ側の永久磁石と反対方向の磁束を発生し、反発力を弱める。これにより剛性が低くなり、わずかに共振周波数が低くなった。

6.4 制振手法の適用

最後に、回転開始時に -5 A を電磁石に印加し共振の前に +5 A を印加した時の、共振時の最大振幅を計測したところ、1.04 mm であった。また、この時の変位の時系列データを FFT 変換したグラフを Fig. 10 に示す。この時の信号強度の最大値が出た周波数は、11.4 Hz であった。

-5 A 供給時の実験結果と比較すると、振幅は 0.59 mm 減少しており、約 36 % 振幅を減少させることに成功した。また、-5 A から +5 A への切り替えにより、平均で 1.3 mm の軸方向での浮上の定常位置の変化が確認された。これは半径方向の剛性を変更するために、反発型磁気浮上部の磁場を変更しているため、浮上回転体の重量と磁場による反発力との釣り合いが変化するためだと考えられる。制振手法を適用した場合、切り替えの前後で周波数応答がそれぞれ一致していないことが分かる。これは、定常位置の変化によって、測定時に上下方向の振動が計測され、その結果 FFT 処理の際に得られた応答が異なってしまったと考えられる。この定常位置の変化は、この制振方法を用いる限り発生するものであり、より正確な周波数応答を得るために、今後は吸引型磁気軸受と組み合わせるなどして、定常位置の変動を減少させる手法が必要となると考える。

また、今回の制振実験において、浮上回転体の質量が磁気軸受の負荷容量に対し軽すぎたため、1.3 mm 程度の変化が起きたと考えられる。フライホイールとして利用する場合、浮上回転体はこれより大きな質量となり、定常位置の変化は問題のない程度に小さくなると予想される。

7 結言

本研究では、反発型磁気浮上系と高温超電導体を用いた磁気軸受において、半径方向の共振を抑える方法を提案した。これは反発型磁気浮上部で 2 種類の磁場の状態を生成し、適切に状態を切り替える事で振れ

Fig. 8 FFT results of experiment with coils powered by +5 A.

Fig. 9 FFT results of experiment with coils by powered by -5 A.

Fig. 10 FFT results of experiment by switching coils current -5 A to +5 A.

まわり共振を抑えるものである。この 2 種類の磁場の状態を生成するために、本研究では、反発型磁気浮上部に電磁石として空芯コイルを挿入し、2 種類の電流を流すことで実現した。

結果として、共振時の最大振幅を約 36 %減らすことに成功し、今回提案した制振手法によって振幅が減少することを確認した。よって、提案した制振手法は有用であると考えられる。今後の課題として、より大きな磁場変動を可能とするために、制振装置の形状検討や供給電流の最適化が挙げられる。また、本研究では、剛性制御に伴い、定常位置の変動が起きてしまった。そのため、吸引型磁気軸受などを組み合わせることにより、定常位置の変動抑制なども課題として挙げられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 17K06224 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 市原, 松永, 喜多, 平林, 他, 10kWh 級フライホイール電力貯蔵システム用ラジアル型超電導軸受の開発, 低温工学, Vol. 39, No. 12, pp. 638-644, 2004.
- [2] 藤森, 平野, 山田, 伊東, エネルギーキャッシュシステム用機械式バッテリーの特性評価, 北陸信越支部総会・講演会 日本機械学会講演論文集, Vol. 48, No. 1, pp. 225-226, 2011.
- [3] I. Murakami, H. Mori, M. Shimizu, N. M. Quan and Y. Ando, Study on rigidity of the superconducting magnetic bearing, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 59, No. 1, pp. 191-200, 2019.
- [4] A. Senba, H. Kitahara, M. Shimizu, H. Ohsaki and E. Masada, Characteristics of an electromagnetic levitation system using a bulk superconductor, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 32, Issue 5, pp. 5049-5051, 1996.
- [5] I. Murakami, Y. Kobayashi, M. Gyoda, Y. Ando and K. Yamada, Development of magnetic levitation synchronous motor with high-Tc superconducting bearing, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 39, pp. 97-103, 2012.
- [6] M. Subkhan and M. Komori, New concept for flywheel energy storage system using SMB and PMB, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 21, No. 3, pp. 1485-1488, 2011.
- [7] M. Sasaki, T. Imamura, T. Sugiura, Vibration Reduction of Rotor Supported by Superconducting Magnetic Bearing Utilizing Electromagnetic Shunt Damper, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 26, No. 3, 2016.
- [8] 市原, 松永, 喜多, 平林, 他, 超電導磁気軸受で支持さ

れた回転体の軸方向移動による危険速度乗り越し, 日本 AEM 学会誌, Vol. 23, No. 1, pp. 86-92, 2015.