超電導磁気浮上軸受支持0.2kWh級フライホイール電力貯蔵装置の試作

正員	高畑良一	(光洋精工)	非会員	宮川裕豊	(光洋精工)
正員	樋笠博正	(四国総合研究所)	非会員	亀野浩徳	(光洋精工)
非会員	上山拓知	(光洋精工)	非会員	石川文彦	(四国総合研究所)

A trial manufacturing of 0.2kWh class flywheel rotor supported by superconducting magnetic bearing for energy storage system

Ryoichi Takahata	Member	(Koyo Seiko Co., Ltd.)
Hiromasa Higasa	Member	(Shikoku Research Institute)
Hirochika Ueyama	Non-member	(Koyo Seiko Co., Ltd.)
Yasukata Miyagawa	Non-member	(Koyo Seiko Co., Ltd.)
Hironori Kamenno	Non-member	(Koyo Seiko Co., Ltd.)
Humihiko Ishikawa	Non-member	(Shikoku Research Institute)

A flywheel rotor whose a main shaft had two pieces of flywheel disk and one magnet was designed and manufactured. The flywheel was made of CFRP material which is light weight and has high tensile strength. The magnet was hooped by CFRP in order to prevent from centrifugal burst. The rotor was suspended by a superconducting magnetic bearing in axial direction and active magnetic bearings in radial direction. The superconducting magnetic bearing was made of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ which had a strong pinning force. It was stably accelerated up to 16,500rpm by a induction motor in a vacuum chamber and then its energy storage value was 176Wh. The rotor design, bearing and rotational properties of the rotor was discussed.

キーワード: 超電導, 磁気軸受, 永久磁石, フライホイール, 電力貯蔵

1. まえがき

高速で回転する回転体を無制御で非接触支持できる軸受として超電導磁気軸受が注目されている。近年、ピン止め力の強い $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 超電導体と永久磁石を組み合わせた超電導磁気軸受を使用して、高速回転タイプの軸受スピンドル^{1,2)} が試作され、その基本性能が確認された。また、超電導磁気軸受は回転損失が非常に小さい³⁾ ことから電力貯蔵用のフライホイールの支持軸受として実用化が期待されている。したがって、1kWh級の小型フライホイール回転体の概念設計⁴⁾ や、8MWh級の大型フライホイール回転体の概念設計⁵⁾ が既に実施されている。また一方で、プロトタイプでは小型の装置^{6) 7)} がすでに試作検討されている。

今後、電力貯蔵量を増加させるためには、より大きな慣性モーメントをもつ回転体の開発、そしてその回転の高速化が期待されている。一方で、それを支持する超電導磁気軸受の静剛性および動剛性向上も要求されている。このように、電力貯蔵を目的とした幾つかのフライホイールが考案されている中で、過去に著者らが考案した1kWh級の小型フライホイール回転体の概念設計⁴⁾ では、定格回転数40,000rpmを実現する必要があった。この基本設計を実施するためにはシステムの効率を検討する前段階でいくつかの

問題が予想された。その主な点は、回転体の設計面では遠心膨張の大きいフライホイールの主軸締結方法（ハブの構造）の開発、回転永久磁石の遠心破壊防止策の開発があげられる。また軸受の設計面では、超電導磁気軸受の軸受定数が確立していないため過去のデータ⁸⁾ をもとに推測で設計する必要があることである。例えば、回転中に超電導磁気軸受の浮上力緩和により軸方向の軸受剛性が許容値以下になる場合は、何らかの対応策を考慮する必要がある。また、半径方向には、フライホイールのようなジャイロ作用の大きい回転体を支持するに十分な動剛性が得られない。そのために、例えば制御型磁気軸受を補助的に使用する必要がある、回転体の振動制御技術を開発する必要がある。

本論文では、1kWh級の小型フライホイール回転体の概念設計の実現を目標に、その第一段階として前述の問題点を中心に、それらの開発課題を明らかにするために、フライホイール回転体を設計製作し、回転試験を試みた。その結果、超電導磁気軸受で支持されたフライホイール回転体試作機としては、過去最大クラスである0.2kWh級のエネルギー貯蔵量を実現した。

図1 フライホイール回転体と機構部の断面図

Fig. 1. Cross-sectional view of the flywheel rotor

図2 フライホイール回転体の機構部の外観写真

(但し上部回転永久磁石なし)

Fig. 2. Photograph of the flywheel system

2. 装置の構造

2.1 回転体の基本設計と装置の概要

1kWh級の小型フライホイール回転体の概念設計をもとに基本設計した回転体と機構部本体の構造を図1に示す。主軸下端部および上端部には、それぞれフライホイール (Flywheel: FW) 1個及び回転永久磁石 (Permanent Magnet: PM) 1個が締結されている。また、中央部に誘導モータ、その両側にそれぞれラジアル方向の制御型磁気軸受 (Active Magnetic Bearing: AMB) 用ロータが圧入されている。

制御型磁気軸受は、回転体の変位信号をもとに、電磁石の電流をフィードバックコントロールし、その吸引力で回転体を所定の位置に非接触支持することを可能にする。フライホイール回転体の自重は、回転体下部の超電導磁気軸受 (Superconducting Magnetic Bearing: SMB) の反発力と、回転体上部の超電導磁気軸受の吸引力で非接触支持できる構造としている。しかし、今回は下部超電導磁気軸受だけで回転体の全自重を支持できたので、上部超電導磁気軸受と上部回転永久磁石は配置していない。このフライホイール回転体の機構部の写真を図2に示す。

また、制御型磁気軸受の制御限界を超えて半径方向の振動が大きくなった場合、主軸は非常用転がり軸受の内輪に接触する。また、超電導磁気軸受の浮上力が減少して軸方向の浮上高さ $Z=0\text{mm}$ になった場合、主軸は下部転がり軸受の内輪の上面に接触することになり、主軸の破損を防止できる構造となっている。

超電導磁気軸受を作動させるためには、超電導体の冷却時に回転体の初期位置決めが必要である。軸方向は回転体下部に配置したZステージを上昇させて $Z=0\sim 15\text{mm}$ の任意の位置に、半径方向は制御型磁気軸受で機構部の中心に位置決めすることができる。

装置の概要を図3に示す。回転体を含む機構部は、万一回転体に遠心破壊が発生した時に備えて、その外部に防護壁を配置した。それらは、1.3Paの真空チャンバ内部に設置された。内部の超電導磁気軸受には外部の液体窒素タンクから液体窒素が加圧供給される。また、発電電動機運転用電力変換器および制御型磁気軸受コントローラと真空低温制御のための液体窒素コントローラを備えている。装置の仕様を表1に示す。

表1 0.2kWh級電力貯蔵システムの諸元

Table 1: Characteristics of 0.2kWh power storage system

回転体	全長	502mm
	直径	400mm
	重量	45kg
発電電動機		誘導電動機(2kW)
蓄積エネルギー		176Wh/16,500rpm
支持軸受	軸方向	超電導磁気軸受
	半径方向	4軸制御型磁気軸受
		(上部回転永久磁石なしの場合)

図3 0.2kWh級電力貯蔵システム全体の概念図

Fig. 3. Schematic drawing of the whole 0.2kWh energy storage system

図4 フライホイールハブの応力解析結果(20,000rpm時)

Fig. 4. Stress calculation results of the hub for flywheel (at 20,000rpm)

2.2 フライホイールの構造

主軸両端部に取り付けるフライホイールは、外径400mm 内径200mm 厚さ40mmの炭素繊維強化複合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastic : CFRP) リングと外径200mm 内径30mmのアルミ製ハブから構成される。アルミ製ハブは、遠心膨張が大きいCFRPリングの内径に追随するように軸方向にスリットを入れている。また、フライホイールハブと主軸との締結部直径は60mmとし、この位置で遠

心膨張によるハブの変形が主軸の変形に追随するようにしている。主軸に締結したアルミ製ハブ単体の20,000rpm時の応力解析結果を図4に示す。①で示すハブの外径位置で最大変位が発生することがわかる。ただし、この変位量よりCFRPの内径変位量のほうが小さいので、両者を固定した場合は、締結部の追従が可能となる。本構造では計算上36,000rpmの最大回転数を確認したが、40,000rpmを実現するためには若干のハブ形状の改良と引張強度60kg/mm²以上のアルミ材料を使用する必要があることがわかった。

2.3 回転永久磁石の構造

永久磁石の構造を図5に示す。永久磁石は強度の強いプラセオジウム系を採用した。半径方向に4層積層されている各リング永久磁石は、製作上の都合で周方向に分割する必要があったために周方向の磁束密度のむらが大きくなることが予想された。そのため、各永久磁石を半径方向に着磁し、ヨークから磁力線がでる構造とした。その結果、軸方向着磁の場合と比較して磁束密度が大きくなる。表面から1mmでの磁束密度は、0.7~0.8Tであった。さらに、周方向の磁束密度のむらを小さくすることができ、回転時の損失を低減が期待できた。周方向に分割した永久磁石は、回転時の遠心膨張を避けるために外周に配置したCFRPリングで補強した。また、内周はアルミ製中実ハブで支持した。ハブおよび永久磁石は組立時最大圧縮応力を受けるものの、回転時はその圧縮応力が減少することになり、各部材にすきまが発生しないように設計した。その結果、最大設計回転数20,000rpm、永久磁石外径部での周速188m/sが可能となった。さらに回転数を向上させるためには、補

図5 回転永久磁石の構造

Fig. 5. Construction of the rotation magnet

強するCFRPリングの積層数を増加させることで可能となるが、その強度向上と大きなシメシロを実現する組立技術の開発が必要となることがわかった。

2.4 超電導磁気軸受の構造

超電導磁気軸受は、液体窒素の流路を有するクライオスタットに固定された超電導部材である。超電導体は、外径188mm内径86mm厚さ15mmであり、表面には劣化防止のため0.1mmのエポキシ樹脂コーティングを施している。これは、直径45mm厚さ16mmのYBCOバルク21個を六角形に加工して組み立てた。その構造を図6に示す。クライオスタットは非磁性ステンレスでできており永久磁石との対向面に存在する蓋の厚みは1mmである。本システムでは、回転体下部に配置した超電導磁気軸受をゼロ磁場で冷却して得られた反発力が 0.3kgf/cm^2 以上有り、この超電導磁気軸受だけで回転体の自重を支持させることが可能であった。今後浮上力緩和が問題になる場合には、回転体上部に超電導磁気軸受を配置すれば、その吸引力が得られるので荷重支持の改善が可能である。またその場合、上部超電導磁気軸受は磁場で冷却で作動させるため、その半径方向の剛性が期待でき、上部制御型磁気軸受の負担を軽減することができる。

2.5 制御型磁気軸受と発電電動機

回転体の半径方向は上部及び下部の制御型磁気軸受で支持した。それぞれ半径方向の変位量を計測し、電磁石による吸引力を制御して、主軸を非接触で支持するものである。その諸元を表2に示す。発電電動機は出力2kW、2極の誘導電動機を用いた。超電導磁気軸受の浮上高さが変動

図6 超電導磁気軸受の構造

Fig. 6. Construction of the superconducting magnetic bearing

した場合のことを考慮して、回転子のコアの軸方向長さは、固定子のコアの軸方向長さよりも5mm長くしている。

表2 制御型磁気軸受の諸元

Table 2 : Data of the active magnetic bearing

電磁石電流	1.5A
電磁石空隙	0.4mm
電磁石内径	91mm
ロータ材料	珪素鋼板(厚さ0.1mm)

3. 実験結果と考察

本システムの運転は下記手順で行った。

- (1) Z昇降軸により回転体を $Z=15\text{mm}$ まで上昇させ、AMBにより回転体の半径方向を位置決め(初期位置決め)
- (2) 液体窒素によりSMBの冷却(SMBの作動)
- (3) Z昇降軸を降下させ回転体をSMBで非接触支持(SMB支持)
- (4) 誘導電動機により回転体を加速(電力貯蔵)
- (5) 回生制動により回転体を減速(電力取出)

初期位置決め時の永久磁石下面とSMBのクライオスタット上面とのすきまはエアギャップで15.5mmとなっている。したがって、超電導体はほとんど永久磁石の磁界の影響を受けず、ゼロ磁場で冷却されたことになる。その後Zステージを降下させ、回転体を浮上させたときそのエアギャップは2.0mmとなった。この時、非常用転がり軸受からの回転体浮上高さは $Z=1.5\text{mm}$ となる。その後ブラックスクリュー⁹⁾による浮上高さの減少が安定した $Z=1.3\text{mm}$ で回転を開始した。回転数と浮上高さZ及び半径方向の振動特

図7 ラジアル方向の振れとアキシアル方向の浮上高さZの測定結果

Fig. 7. Measurement results of the runout in radial direction and the levitation height Z in axial direction

性(上部制御型磁気軸受部)の測定結果を図7に示す。回転開始時、浮上高さZは急激に減少することがわかる。その後その減少量は徐々に小さくなるものの回転数16,500rpm (275Hz)で $Z=0.8\text{mm}$ の浮上高さがえられ、回転体を軸方向に安定支持できた。さらに回生制動時は、浮上高さはほとんど減少せず、制動中はむしろ上昇気味となるものの、停止直前にZは減少して $Z=0.7\text{mm}$ となった。一方、半径方向の振れについては、回転開始時に発電電動機の外乱力によりDC成分で約 $40\mu\text{m}$ の大きな振れが観測された。回転加速とともに振れは小さくなり、4000rpm以上では $10\mu\text{m}$ 以下と安定する。回生制動時も2000rpm以下で振れが小さくなる以外は加速時とほぼ同じである。

このような回転加速時と制動時の浮上高さZの変動の様子は、超電導磁気軸受の磁束フロー・クリープ現象⁹⁾と発電電動機のスラスト力が複合的に作用した結果と考えられる。まず、前者について考察する。一般的に、ゼロ磁場冷却された超電導体上で永久磁石が浮上した際、超電導体の反発力が時間とともに減少することは知られている。また、永久磁石がゼロ磁場中で冷却された超電導体上で垂直に永久磁石が近づく過程で微小振動した際に浮上力のドリフトの発生について、引原ら¹⁰⁾が報告している。本実験は、引原らの観察した報告と磁場変動を受けたという点では同様と推定される。超電導体の浮上力緩和が時間とともに減少して回転体の浮上高さが安定した後で回転体を回転駆動させた際に、浮上高さが急激に減少したという結果を得た。それは、永久磁石が初めて回転を開始して、周

図8 回転体の径方向の軸振動変位のリサーチ図 (16,500rpm時) 左: 上部AMB部, 右: 下部AMB部

Fig. 8. The rissajous figures of flywheel rotor (at 16,500rpm), Left : Upper AMB portion, Right : Lower AMB portion

方向の磁束密度のむらのある永久磁石の回転とモータの外乱力により回転体が半径方向に振れたことにより、超電導体が磁場変動を受けたことが一つの原因と考えている。これが応用上の現実的な問題である。さらに、16,500rpmで約10分間回転を継続させたときにも浮上高さが減少することがわかる。この時の振れは、図8に回転リサーチ図形を示すように上部磁気軸受部で $8\mu\text{m}$ 、下部磁気軸受部で $4\mu\text{m}$ と非常に小さい。このような振れが小さい時の浮上力減少は永久磁石の周方向の磁束密度のむらによる磁場変動が支配的と考えられる。

このような、回転時の浮上高さの減少は、超電導体をゼロ磁場中で冷却した後の1回目の回転加速及び回生制動時に発生した結果である。2回目以降の回転時には、このような現象は若干緩和されるとも考える。しかし、フライホイール電力貯蔵装置の応用面において、このような浮上高さの減少が、システムに与える影響をあらかじめ設計段階で十分検討することが重要であることがわかった。

一方後者については、回転開始時の浮上高さ $Z=1.3\text{mm}$ で、発電電動機の回転子コアの軸方向長さの中心位置は固定子のそれと比較して 0.7mm 下方へずれている状態で回転を開始した。前述したように回転子側のコアは固定子側よりあらかじめ 5mm 長く設計しており、このようなずれの影響を低減してはいるものの、この相対的ずれは軸方向に小さいながらも力を発生させ超電導磁気軸受の負荷を変動させている可能性がある。

以上より、回転加速時の両者の影響を数値的に特定することはまだ十分にはできていない。一方、回生制動時に浮上高さが上昇気味になり、停止すると減少するという図7の結果が得られている。これは、発電電動機のスラスト力が回転体を上向き上昇させる作用をしたように考えられる。なぜならモータ電源停止によるフリーラン減速時に浮上高さが連続的に減少するという傾向もあるからである。

図9 振動モード解析結果

Fig. 9. Simulation results of vibration mode

このような磁場変動と発電電動機のスラスト力の影響を数値的に解明するためには、今後より詳細な検討が必要である。

フライホイール回転体について有限要素法による軸系の振動解析を行った結果を図9に示す。2個の直線は、剛体モードで振動する際の回転体の軸芯のイメージを示す。この振動は、制御型磁気軸受のバネ定数によって決まり、22Hz、40Hzで現れることがわかる。実験結果には、モータによる外乱力が負荷しているので、それが影響して軸が半径方向に振れる様子は顕著に確認できなかった。また、2個の曲線は、回転体の曲げモードで振動する際の回転体の軸芯のイメージを示す。1次曲げおよび2次曲げのモードで振動する周波数はそれぞれ350Hz、570Hzである。これらの曲げの固有振動数については、制御型磁気軸受でこれを減衰させており回転時に振動しないようにしている。結果として、現在16,500rpmまで安定した回転加速を行うことができています。今後回転数を上げるためには曲げの固有振動数が大きく影響することが予想されるため、主軸の構造を改善し固有振動数を高める必要がある。

4. むすび

主軸に2枚のフライホイールと1個の回転永久磁石を締結したフライホイール回転体を設計製作した。軸方向の荷重を超電導磁気軸受で、半径方向を制御型磁気軸受で非接触に支持し、最大16,500rpmまで回転させ、176Whのエネルギー貯蔵を実現した。回転加速および再生制動時の超電導磁気軸受による浮上高さを測定した結果、回転開始時は、浮上高さの減少が著しいことが明らかとなった。

今後は、サイクル運転や長時間運転を実施し、超電導磁気軸受の浮上高さ減少及び電力貯蔵システムとしての性能評価を行う予定である。また、1kWh級の電力貯蔵を実

現するために、フライホイール、回転永久磁石、主軸等の設計および製作技術の開発を行う予定である。

最後に本研究の推進にあたりご協力をいただきましたセイコーエプソン株式会社、新日本製鐵株式会社、四国電力株式会社、日本複合材料株式会社に謝意を表します。

(平成8年10月29日受付、平成9年4月30日再受付)

文献

- (1) R.Takahata, H.Ueyama and A.Kubo : Characterization of Superconducting Magnetic Bearings (Runout Performance at High Speed Rotation, Advances in Superconductivity 5, 1309~1312 (1993))
- (2) H.Fukuyama, K.Seki, T.Takizawa, S.Endou, M.Murakami, H.Takaichi and N.Koshizuka : An Improvement of the Static and Dynamic Characteristics of Superconducting Magnetic Bearings Using MPMG-YBaCuO, Advances in Superconductivity 5, 1313~1316 (1993)
- (3) H.J.Bornemann, T.Ritter, C.Urban, O.Zaitsev, K.Weber and H.Rietschel : Low Friction in A Flywheel System with Passive Superconducting Magnetic Bearings, Applied Superconductivity Vol.2, No.7/8, 439~447 (1994)
- (4) 高畑良一, 上山拓知, 樋笠博正 : 「1 kWh級電力貯蔵システムの概念設計」, 電学論D, Vol.115, No.9, 1198~1199 (1995)
- (5) 樋笠博正, 石川文彦, 芝山宗昭, 小野健, 横山彰一, 中村史朗, 山田忠利, 吉田康夫 : 「8 MWh級高温超電導浮上式フライホイール電力貯蔵システムの概念設計および適用性の検討」, 電学論B, 113, 768~775 (1993)
- (6) H.Higasa, F.Ishikawa, N.Kawauchi, S.Yokoyama, S.Nakamura, H.Imaizumi and N.Ito : Experiment of a 100Wh-Class Power Storage System using High-Tc Superconducting Magnetic Bearing, Advances in Superconductivity 6, 1249~1252 (1994)
- (7) Q.Y.Chen, Z.Xia, K.B.Ma, C.K.McMichael, M.Lamb, R.S.Cooley, P.C.Fowler and W.K.Chu : Hybrid High Tc Superconducting Magnetic Bearings for Flywheel Energy Storage Systems, Applied Superconductivity Vol.2, No.7/8, 457~464 (1994)
- (8) 樋笠博正, 高畑良一, 今泉寛, 宮健三 : 「超電導磁気軸受周波数応答関数」, 電学論D, Vol.115, No.10, 1276~1283 (1995)
- (9) 宮健三, 吉田義勝 : 「超電導の数理と応用」, 養賢堂156~159 (1997)
- (10) T.Hikihara, F.C.Moon : Levitation drift of a magnet supported by a High-Tc superconductor under vibration, Physica C 250, 121~127 (1995)

高畑 良一

(正員) 昭和36年4月19日生。60年大阪府立大学工学部船舶工学科卒業。62年光洋精工(株)入社。総合技術研究所にて超電導磁気軸受の応用研究に従事。応用物理学会, 低温工学会, 精密工学会, 関西造船協会会員。

樋笠 博正

(正員) 昭和6年1月8日生。26年旧制新居浜工業専門学校卒業。同年四国電力(株)入社。63年(株)四国総合研究所にて高温超電導応用研究に従事。工学博士。第13,30回オーム技術賞授賞。日本AEM学会, 低温工学会

上山 拓知

(非会員) 昭和32年10月22日生。58年京都工芸繊維大学工芸工学部電子工学科卒業。同年光洋精工(株)入社。総合技術研究所にて制御型磁気軸受応用研究に従事。日本機械学会正員

宮川 裕豊

(非会員) 昭和45年6月23日生。平成5年大阪工業大学工学部電気工学科卒業。同年光洋精工(株)入社。総合技術研究所にて磁気軸受応用研究に従事。

亀野 浩徳

(非会員) 昭和45年3月28日生。平成6年東京農工大学大学院修士課程卒業。同年光洋精工(株)入社。総合技術研究所にて磁気軸受応用研究に従事。トライボロジー学会。

石川 文彦

(非会員) 昭和21年4月26日生。44年大阪大学工学部電気工学科卒業。同年四国電力(株)入社。62年(株)四国総合研究所に出向。負荷平準化・電力利用研究室室長負荷平準化技術研究に従事。