

永久磁石を用いた反発浮上形簡易磁気軸受の構成法と装置性能評価

著者	大路 貴久
著者別名	Ohji, Takahisa
雑誌名	博士学位論文要旨 論文内容の要旨および論文審査結果の要旨 / 金沢大学大学院自然科学研究科
巻	平成12年6月
ページ	194-198
発行年	2000-06-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/16294

氏名	大路 貴久
生年月日	
本籍	石川県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第355号
学位授与の日付	平成12年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	永久磁石を用いた反発浮上形簡易磁気軸受の構成法と装置性能評価
論文審査委員(主査)	山田 外史(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	岩原 正吉(工学部・教授) 高嶋 武(工学部・教授) 藤田 政之(工学部・助教授) 松村 文夫(石川高専・校長)

学位論文要旨

Abstract: A permanent magnet bearing system utilizing the repulsive forces operating between the stator and rotor permanent magnet for levitation and radial control has been fabricated. The repulsive type magnetic bearing has the advantages of simplified control scheme and less number of electromagnets. This magnetic bearing system can be used for inertial energy storage using fly-wheel under small radial disturbance. This bearing system can be realized for two types of machine configurations : Vertical-shaft machines and Horizontal-shaft machines. The stability of both types of magnetic bearing systems is strongly influenced by the configuration of the permanent magnets in the bearing system, so it is indispensable for the system to grasp the characteristics of repulsive force and stiffness along passive control axis. The repulsive forces, stiffnesses, and magnetic losses operating between the stator and rotor permanent magnets have been calculated by three dimensional finite element analysis, and the optimum permanent magnet configuration has been derived.

This bearing system characteristically has constant stiffness in the radial direction and soft levitation at steady position, therefore, the rotor has a low natural frequency of oscillation. Hence the region of steady rotational speed between second order oscillation mode and third one is wide. Even if the oscillation of rotor occurs around the natural frequency of oscillation, the rotor runs through the critical speed effectively by changing the rotational speed owing to the soft stiffness. This system having the peculiarity as stated above is suitable for application of fly-wheel energy storage system.

The consistency of the permanent magnet magnetization effect the continuous steady-state and dynamic performance of the system. Due to demagnetization or ageing or manufacturing asymmetry, the field distribution may not be uniform along the periphery of the magnet. In this respect, we have shown experimentally that the magnetic material fit on the permanent magnet reduces the changes in the magnetic flux density along the periphery effectively.

Key words: magnetic bearing, permanent magnet, fly-wheel, energy storage, magnetization.

1. まえがき

一般に磁気軸受は、利点として機械的摩擦や摩耗の問題、振動、騒音の問題が極めて少ないことが挙げられる^[1]。著者らの提案する永久磁石を用いた反発浮上形簡易磁気軸受は、これらの利点を有しつつ、さらに制御電磁石や制御回路の数を削減し、コスト削減や周辺装置の縮小を可能にした簡易な磁気軸受構成を持つ。この構成はフライホイール電力貯蔵装置など回転体に対し機械的に非接触を確立した状態でエネルギーを得る装置等に適用できる。永久磁石によって確立された半径方向の受動安定軸は剛性が小さく、さらに定常位置においてその剛性は一定という、一般の能動形磁気軸受とは異なる特徴を持つため、半径方向の安定性を向上させる磁石配置を検討するとともに高速回転での振動状態を把握する必要がある。

本稿では、反発浮上形簡易磁気軸受として、横軸形反発浮上磁気軸受、縦軸形反発浮上磁気軸受の2種類を構成^[2]し、非接触浮上および安定回転を確認するとともに装置性能を評価した。外乱振動特性、回転軸振動特性、回転減衰特性等の評価指標から、反発浮上形簡易磁気軸受が回転体に蓄えられたエネルギーを利用する装置に適することを示した。さらに横軸形反発浮上磁気軸受に関しては、回転体質量の増加と受動制御軸の剛性の増大、渦電流損失の軽減を目指した軸受部

永久磁石の最適形状を導出し、また縦軸形磁気軸受装置に対しては、永久磁石の着磁不均一に対する動作特性について検討を加えた。

2. 反発浮上形簡易磁気軸受の構成

永久磁石反発形磁気軸受の方式には図1、図2に示す横軸形および縦軸形の装置構成が考えられる。回転軸両端に軸方向に着磁された2つのロータ部磁石を有する回転体とそれを保持するステータ部磁石によって受動的に浮上力と半径方向の安定を得る。軸方向に対する不安定は、常電導電磁石で吸引制御することにより安定な非接触浮上を確立する。フライホイールは回転体中央に設置し、制御電磁石、ギャップセンサー等をそれぞれ図のように配置させ制御を行う。図3、図4には軸受部に使用する永久磁石配置を示した。縦軸形磁気軸受に使用する場合、円筒形の永久磁石を使用でき、現在、永久磁石は全てSr-ferrite磁石で構成されている。横軸形の場合は自重を支える必要があるためステータ部磁石は回転非対称となる。さらに浮上方向に対しStiffnessを高めるためにロータ部磁石の上方から上部ステータ磁石(Nd-Fe-B磁石、 $\alpha=45^\circ$)を配置している。ステータ部磁石には浮上力を増大させるため強力なNd-Fe-B磁石を使用している。回転体の質量、動作平衡点は軸受部永久磁石の反発力特性を基に設定しており、横軸形磁気軸受が軸長510mm、回転体質量8kg、縦軸形磁気軸受が軸長420mm、回転体質量5kgである。

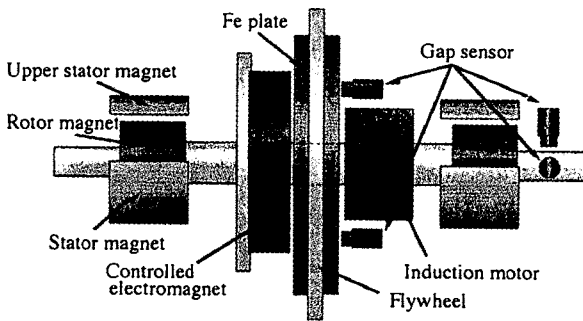


Fig. 1 Bearing system configuration. (Horizontal shaft type)

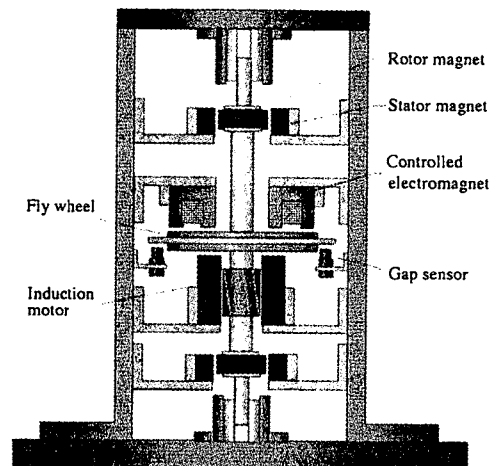


Fig. 2 Bearing system configuration. (Vertical shaft type)

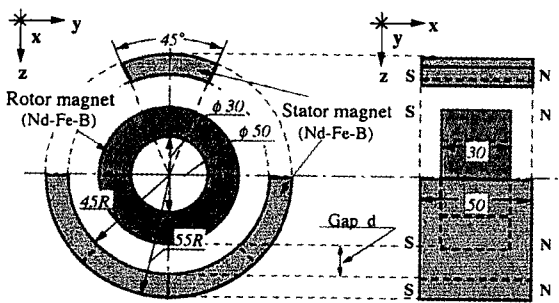


Fig. 3 Permanent magnet configuration. (Horizontal shaft type)

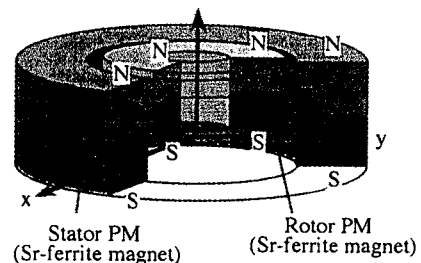


Fig. 4 Permanent magnet configuration. (Vertical shaft type)

3. 軸受部永久磁石に対する有限要素法解析^[3]

軸受部永久磁石に対し図5の三次元モデルを用い、ロータ部磁石に運動条件を付加した動特性解析を行った。回転体が安定回転状態で運転する場合であっても、回転角 θ に対し、ステータ部磁石からの磁束密度の不均一によってロータ部磁石中に渦電流が発生し、ジュール損や制動トルクの原因となり、この観点からも軸受部永久磁石の最適形状を検討する必要がある。解析モデルに対し円弧角 α を 30° 毎に変化させロータ部磁石に回転条件を与え、ロータ部磁石中の電流密度を解析した。ステータ部磁石が円周方向に対し不連続となる横軸形の場合、円周方向に対する磁束密度変化が急峻となる箇所においてロータ部磁石に渦電流損失が発生する。図6よりロータ部磁石中の渦電流は回転速度の上昇に伴い増大し、また上部ステータ磁石の円弧角 α が 60° で最大となる

ことがわかる。横軸形の場合、上部ステータ磁石を設置することで浮上方向反発力および剛性の増大を考慮し、さらに回転時の損失を上部ステータ磁石が無い場合より小さく抑えるには、 $\alpha = 105^\circ$ 程度が最適であると言える。また縦軸形の場合、渦電流による損失は非常に小さく、回転体の軸振動による磁場変動や永久磁石の着磁不均一のみが磁氣的損失の要因となる。

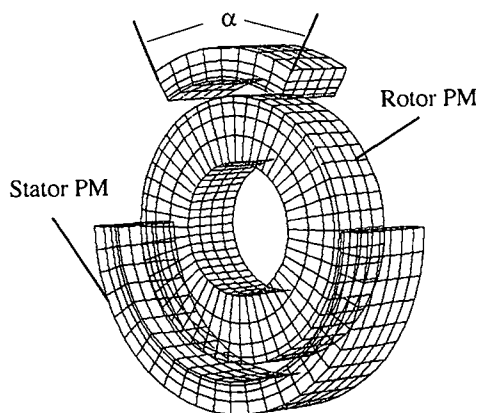


Fig. 5 3-D FE model of PM configuration.

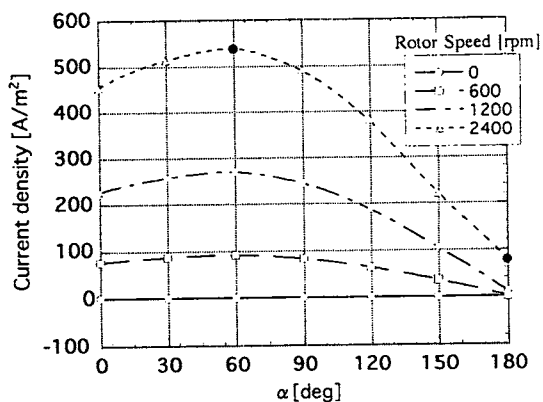


Fig. 6 Eddy-current loss characteristics.

4. 反発浮上形簡易磁気軸受の動作特性

磁気軸受装置に対し、線形化モデリングおよび積分形最適レギュレータによる制御系設計を行い、浮上実験、外乱応答実験、回転実験等から装置性能を評価した。ここでは、横軸形磁気軸受に対する結果を示す。図7は安定回転時における回転軸の軌道を描いたものであり、回転体は半径方向の振動幅が約100 μm 程度で安定回転する。安定回転時に各座標軸方向に外乱を印加した場合、制御方向はコントローラにより速やかに定常位置に収束するとともに、半径方向（受動制御軸）は、ある程度の外乱であれば緩やかに定常位置に静定する。図8に回転速度を上昇させた時の半径方向振動幅を示す。この結果より1000rpm以下の非常に低速時に回転体の固有振動数に起因する2つのピークが存在することが確認できる。このように回転体が軸振動を起こした場合であっても、回転速度を変化させることで振動は速やかに収束する。半径方向の剛性は一般の能動形磁気軸受に比べ小さいため、振動周波数も非常に小さくなる。これらの振動モードは二次までの振動モードであり、三次の振動モードを解析的に調べると⁽⁴⁾三次モードは永久磁石部で生じる剛性による影響は比較的小さく、その結果、図9に示すように安定回転領域（ハッチング部）が非常に広く取れることから、外乱が小さく主として回転力利用した電力貯蔵装置への適用が可能であることが確認できる。さらにこのような用途に適用する場合の指標として、回転減衰特性を図10に示す。回転体は回転速度が半減するまでにHe中で約900秒かかり、このときフライホイールに保存される回転エネルギーは562.6 Jであった。横軸形磁気軸受では真空中であっても磁氣的損失が残存するが、縦軸形であれば理論上、磁氣的損失はゼロである。

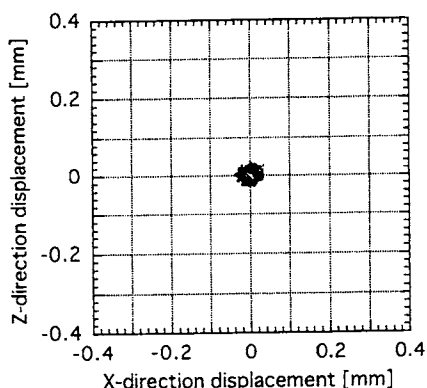


Fig. 7 Radial vibration characteristics.

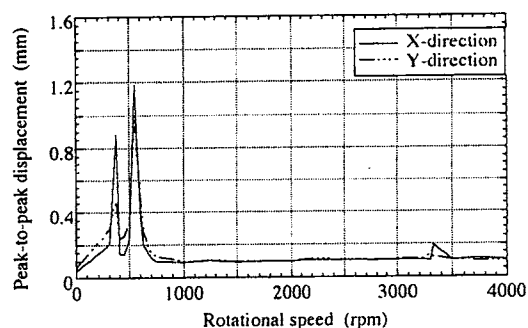


Fig. 8 Peak-to-peak displacement versus rotational speed.

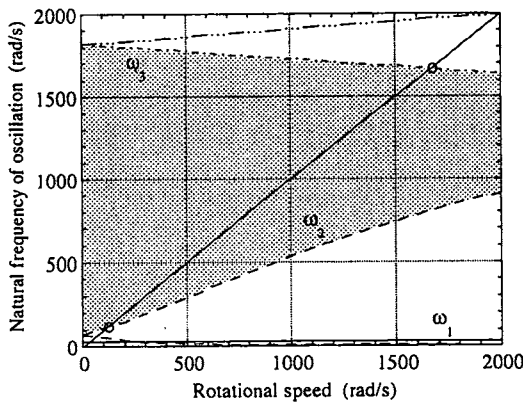


Fig. 9 Natural frequency of oscillation versus rotational speed. (Stiffness $K_y = 2320$ N/m)

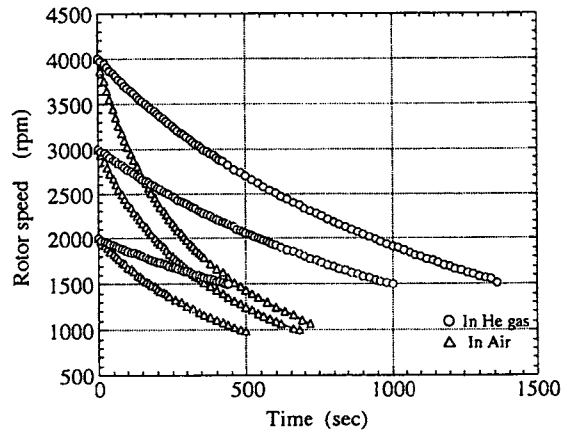


Fig. 10 Decay of rotor speed. (Horizontal shaft type)

5. 軸受部永久磁石の着磁不均一の軽減^[5]

永久磁石は製作工程上、少なからず着磁の不均在存在し、縦軸形磁気軸受の場合であっても回転時の軸振動や磁氣的損失にも影響を及ぼすことが考えられる。永久磁石の着磁状態を着磁不均一の少ない状態(Uniform)と着磁不均一の大きい状態(Non-uniform)を設定し、軸振動特性、回転減衰特性を測定した。ここでは回転減衰特性を図11に示す。軸振動に大きく寄与するのはロータ部磁石に存在する着磁不均一であり、この問題に対して、複数枚の円盤状磁石を重ね合わせ、円周方向に回転させながら調整することで着磁状態を均一化できる。ステータ部磁石の着磁不均一は回転体の軸振動特性に大きな影響を与えず、永久磁石間の反発力が均衡を保つ箇所において安定回転する。しかしながら円周方向に対する着磁不均一は磁氣的損失の原因となり、図11の回転減衰特性は着磁が均一である方が、回転継続時間が僅かながら長くなること分かる。軸受部永久磁石で生じる磁氣的損失は、円周方向の空間的な磁束密度変化が急峻であるほど大きい。永久磁石の表面に磁性材料としてステンレス板を付加することにより、図12は磁石表面から等距離にて測定しており、磁束密度の急峻な変化が抑えられ着磁はさらに均一化される。磁束密度の減少が永久磁石間の反発力、剛性の減少につながるが、永久磁石表面の磁束密度が弱い部分を補うようにステンレス内部を磁束が通り、一種のフィルタ的な役割を果たすため、磁氣的損失を軽減するための有効な手法であると言える。

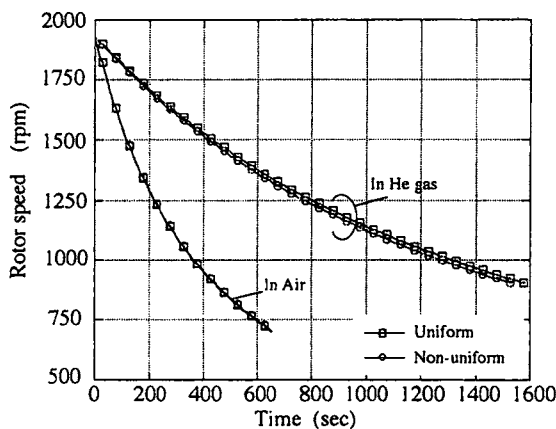


Fig. 11 Decay of rotor speed. (Vertical shaft type)

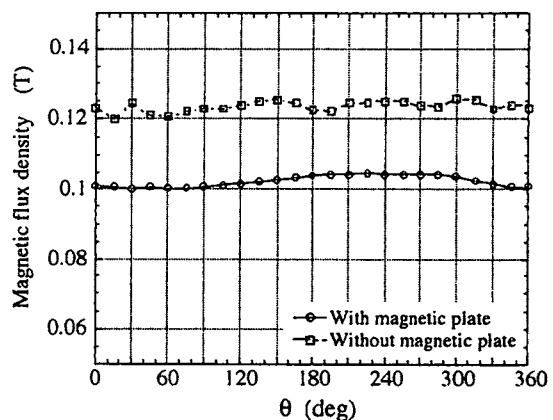


Fig. 12 Characteristics of Magnetic flux density along the periphery.

6. まとめ

本稿では、反発浮上形簡易磁気軸受として、横軸形・縦軸形の2種類を構成し、非接触浮上および安定回転を確認するとともに装置性能を評価した。両者の軸受方式に共通な特性として、

- ・回転体に与えられた外乱は安定回転時であれば、安定浮上時と同様に減衰し安定状態となる。
- ・回転体の固有振動数は低速回転時に存在し、回転体のふれ回りは回転数を上昇させることで安定回転に復元できる。
- ・回転体固有の二次の振動モードが非常に小さいため三次モードでの危険速度までの安定回転域が大きく取れる。

という利点を持ち、回転力を保存し利用するシステムへの応用に適することを示した。横軸形反発浮上磁気軸受において浮上反発力の増大、剛性の増大、渦電流損失の軽減を考慮した上部ステータ磁石を設置する場合、円弧角 $\alpha = 105^\circ$ が最適であることを解析的に導出した。また着磁不均一の問題に対しては、特にロータ部磁石に関する着磁不均一は回転体の軸振動に大きな影響を与えるため、回転時の軸振動および磁氣的損失を減少させるために、複数枚の永久磁石を利用する方法と磁性材料を付加する方法を提案しその有効性を確認した。

参考文献

- [1] 電気学会 磁気浮上応用技術調査専門委員会編：磁気浮上と磁気軸受，コロナ社（1993）。
- [2] S. C. Mukhopadhyay, T. Ohji, T. Kuwahara, M. Iwahara, S. Yamada and F. Matsumura : NASA periodicals, NASA/CP-1998-207654, 393-405 (1998).
- [3] 大路, S.C.Mukhopadhyay, 桑原, 山田：「永久磁石反発形磁気軸受の軸受部永久磁石に対する動特性の解析」, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD97-79, pp.21-25(1997).
- [4] 日本機械学会編：磁気軸受の基礎と応用, p110, 養賢堂発行(1995).
- [5] 大路, 鹿野, S.C.Mukhopadhyay, 山田, 岩原：「永久磁石を用いた反発浮上形磁気軸受の回転特性の評価」, 電気学会マグネティクス研究会資料, MAG99-44, pp.49-54(1999).

学位論文審査結果の要旨

平成12年1月26日に第1回論文審査委員会を開催し、また2月2日に行われた口頭発表後、同日中に第2回審査委員会を開催し、討議した結果、以下の通り判定した。

本論文は、磁気軸受の中でも特徴的な永久磁石を用いた反発浮上形簡易磁気軸受について、横軸形および縦軸形の軸受装置を提案し、装置の構成法や性能に対し磁界解析、制御系設計、各種の駆動試験など幅広く検討したものである。その成果は、以下のように要約できる。

- (1)反発浮上形簡易磁気軸受は、制御軸数を最小化し、制御の複雑化や高コスト化の問題を解消する軸受装置であり、回転力を利用する装置への適用を念頭においた実験装置の設計、製作、浮上制御を行い、非接触浮上、安定回転を確立した。
- (2)横軸形および縦軸形の2種類の軸受構成を提案し、装置性能に大きく影響を及ぼす軸受部永久磁石での有限要素解析を行い、横軸形における軸受部永久磁石の最適形状を反発力特性および渦電流損失の見地から導出するとともに、縦軸形における永久磁石の着磁不均一を取り扱い、装置の動作特性の向上を試みた。
- (3)反発浮上形簡易磁気軸受の基礎的特性として、軸振動特性や回転減衰特性等を実験的に検討し、永久磁石で得られる受動安定での無制御かつ柔らかい浮上が回転力を利用する装置として適用可能であることを示した。

以上の研究は、磁気軸受分野において独特な装置構成を持つ反発浮上形簡易磁気軸受の開発と装置性能を検討し、磁気軸受としての有用性を確認したものであり、博士論文に値するものと判定した。