

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 23 日現在

機関番号：12301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760178

研究課題名（和文）電力貯蔵フライホイールへの応用を目的としたローレンツ力型磁気軸受の開発

研究課題名（英文）Development of Lorentz force type magnetic bearing for energy storage flywheel

研究代表者

栗田 伸幸（KURITA NOBUYUKI）

群馬大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60435493

研究成果の概要（和文）：本研究では電力貯蔵フライホイールに着目した。そして、フライホイールを支持する際の回転損失を極力小さくすることを目的に、ローレンツ力型磁気ベアリングを開発し、小型の電力貯蔵フライホイールに適用した。製作した実験装置において、約 3000r/min までの範囲でロータを安定に浮上回転制御することを確認した。また、フリーラン実験を行い、磁気ベアリングとボールベアリングの減速特性を比較した。そして、ローレンツ力型磁気ベアリングがボールベアリングに比べ、回転損失を約 1/3 に低減できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：This research focused on an electric power storage flywheel. In order to make rotational loss small, the Lorentz force type magnetism bearing was developed, and it applied to the small electric power storage flywheel. The fabricated experimental setup achieved stable rotor levitation control in the range up to 3000 r/min. Moreover, the free-run experiment was carried out in order to compare the deceleration characteristics of a magnetic bearing and a ball bearing. The proposed Lorentz force type magnetism bearing showed clearly that a rotation loss can be reduced in one-third compared with the ball bearing.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：メカトロニクス・自動制御・機械力学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：磁気ベアリング，電力貯蔵フライホイール，再生可能エネルギー，ローレンツ力

1. 研究開始当初の背景

環境問題に対する意識の高まりを受けて、風・水力発電などの再生可能エネルギーの利用が注目されている。これらのエネルギーを効率的に利用できれば、CO₂の排出抑制効果に

よる地球環境問題への寄与など、その効果は大きい。しかし、再生可能エネルギーによる発電は間歇的であるため、電力を安定に供給するには電力の負荷平準化・貯蔵技術が必要となる。現在、小規模な電力貯蔵には鉛蓄電

池などの2次電池が使用されている。しかし2次電池には化学物質や重金属など環境に悪影響を及ぼすおそれのある物質が使用されている上、使用可能年数が数年程度であるため、メンテナンスが必要となる。そこで、メンテナンスフリーで、クリーンな電力貯蔵技術の開発が求められている。

2. 研究の目的

メンテナンスフリーで、クリーンな電力貯蔵技術として、電力貯蔵フライホイールが研究されている。しかし、回転軸の支持に用いられる従来型磁気軸受は、構造的にロータ内部に渦電流損が発生し、電力貯蔵効率が低下する問題がある。そこで、電力貯蔵フライホイールへの応用を目的に、渦電流損の発生を根本的に無くする事のできる、ローレンツ力型磁気軸受を開発する。

3. 研究の方法

(1) 試作機1号機の製作

提案するローレンツ力型磁気ベアリングの動作原理を確認するために、シャフトの上端をボールベアリング支持し、下端にローレンツ力型磁気ベアリングを備えた試作機1号機の設計・製作を行う。そして、製作した実験装置において、動作原理を確認する。また、磁気ベアリングとしての基本特性を確認する。

(2) 試作機2号機の製作

提案するローレンツ力型磁気ベアリングは半径方向の制御を行う。そのため、完全に磁気浮上制御するためには、ローレンツ力型磁気ベアリングをシャフトの上下に設置し、さらにアキシヤル磁気ベアリングによりローラの自重を制御する必要がある。そこで、試作機1号機で得られた問題点をフィードバックして、より高性能な試作機2号機の設計・製作を行う。試作機2号機では、ローレンツ力型磁気ベアリングの軸支持力をより協力にするために、軸方向着磁された永久磁石に加え、半径方向に着磁された永久磁石を用いる。そして、ハルバッハ磁石配列に近い永久磁石配列とすることで、エアギャップの磁束密度を増加させる。製作した試作機2号機の基本性能の確認と有用性の評価を行う。

(3) 試作機3号機の製作

試作機2号機では永久磁石を固定するために接着剤を使用した。実験の途中で永久磁石がはがれ、実験装置が破損してしまった。そのため、実験装置の再設計・再製作を行った。永久磁石を固定するために、接着剤ではなく、専用の固定具を利用した。そのため、エアギャップを5mmから7mmを増やす必要があった。また、磁束密度を増加させるために用いた半径方向に着磁した永久磁石を利用することができなくなった。これらの変更により軸支

持力が低下することが予想されるが、本装置は軸を縦にして使用するために、再設計後の実験装置でも良好な制御性能が得られると考えられる。

4. 研究成果

(1) 試作機1号機

動作原理を確認するために製作した片持ち型の試作機1号機を設計・製作した。製作した実験装置の写真を図1に示す。

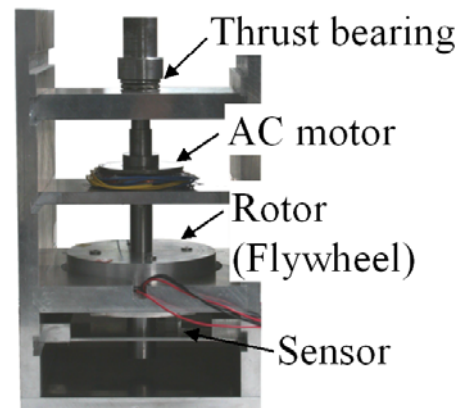


図1 試作機1号機

実験装置のシャフトは縦型とし、上部をボールベアリングによって支持する。そして、シャフト下部はローレンツ力型磁気ベアリングにより支持する。装置は片持ち型構造となっている。ロータ下部の変位検出は最下部に取り付けた渦電流式変位センサにより行う。ロータの回転は中央部に設置したアキシヤルギャップ型のACモータにより行う。図2に制御系の構成を示す。渦電流式変位センサでロータの半径方向の変位を検出し、変位信号をA/Dコンバータを介してDSPに入力する。そして、DSP内で作成したPID制御器により、制御電流指令値を計算する。その後、指令電圧をD/Aコンバータを介してパワーアンプに入力し、ここから各コイルに制御電流を流す。

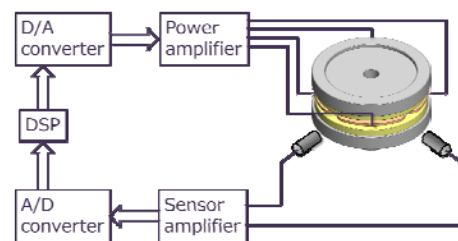


図2 制御系の構成

ローレンツ力型磁気ベアリングの動特性を確認するために、ステップ応答を測定した。結果を図3に示す。波線が軸受制御なしの時

の結果であり、実線が、軸受制御を行った場合の結果である。軸受制御を行うことにより、オーバーシュートを100%から28%に低減することができた。また、整定時間を0.3秒から0.06秒に短縮することができた。

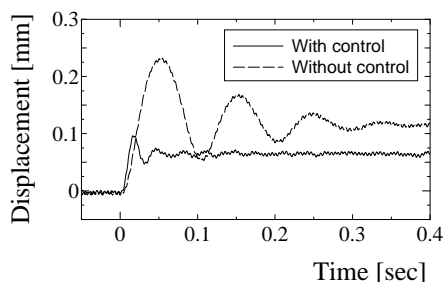


図2 制御系の構成

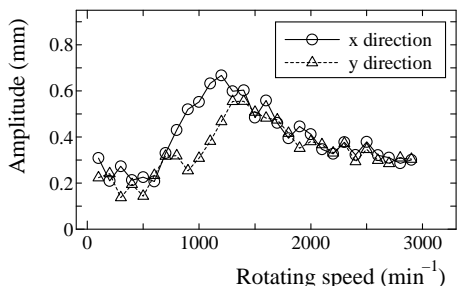


図3 制御系の構成

次に、浮上回転実験を行った。結果を図3に示す。振動振幅は最大で0.6mmまで増加したが、約3000rpmまでの範囲で安定な磁気浮上回転制御を行うことに成功した。

(2) 試作機2号機

試作機1号機により、提案する磁気ベアリングが軸を制御できることを確認した。したがって、試作機1号機から得られた問題点を設計にフィードバックし、完全磁気浮上を目的とした試作機2号機を設計・製作した。実験装置の断面図を図4に示す。また、製作した実験装置のロータの写真を図5に示す。実験装置のロータは縦型とし、シャフトの上下にローレンツ力型磁気ベアリングを備える。そして、上部に配置したアキシアル磁気ベアリングにより垂直方向を制御する。ロータの回転は上下のラジアル磁気ベアリングの中央に配置したアキシアルギャップ型のACモータにより制御する。また、試作機2号機はエアギャップの磁束密度を増加させるために図6に示すように半径方向に着磁した永久磁石を備えている。

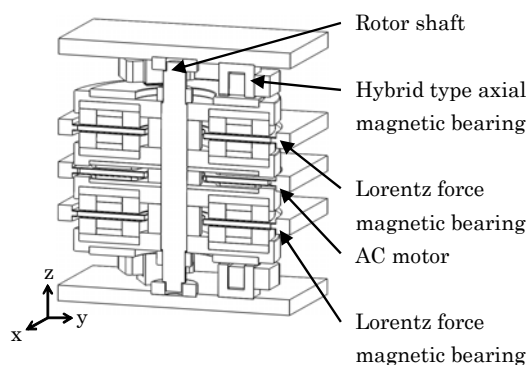


図4 装置の断面図



図5 製作したロータの写真

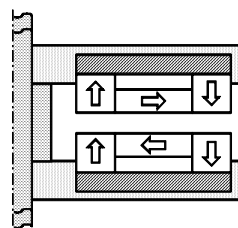


図6 試作機2号機のロータの断面図

製作した実験装置は試作機1号機と同様の制御系によって軸受制御を行った。

まず、コイルに一定電流を流し、軸受力の測定を行った。測定結果を図7に示す。上下の磁気ベアリングとともに約30N/Aの強力な力係数を得ることができた。

次に浮上特性を確認するために、インパルス応答を測定した。結果を図8に示す。DSPによって、ロータが約0.4mm変位する程度のインパルス外乱を印可した時の応答を変位センサにより測定した。また、結果は図示していないが、制御電流値も測定した。外乱が印可された後、振動は約0.06秒で最大値の5%以下に収束している。また、制御に必要な電流値は±1A以下に抑えることができた。

さらに、浮上回転特性を確認した。結果を図9に示す。図において、○と△が制御を行った場合の結果であり、□が無制御時の結果である。軸受制御を実施することにより、振動振幅を約0.1mmに抑えられた状態で、約2500rpmまでの範囲で安定な浮上回転を行うことができた。

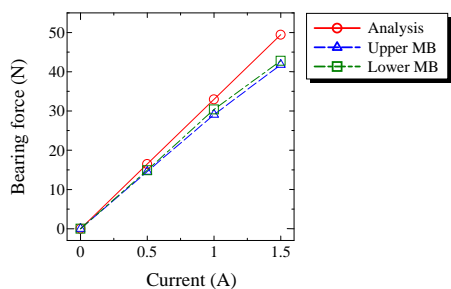


図7 試作機2号機の軸受力

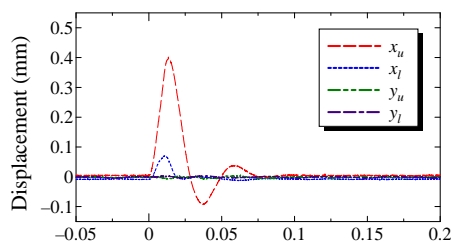


図8 試作機2号機の浮上特性

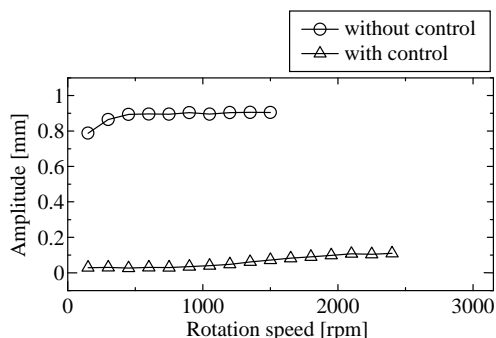


図9 試作機2号機の浮上回転特性

(3) 試作機3号機

試作機2号機の永久磁石は接着剤で固定していたため、実験の途中で装置が破損してしまった。したがって、新たに試作機3号機を設計・製作した。設計した試作機3号機のロータ断面図を図10に示す。永久磁石を固定するために専用の部品を製作し、利用した。そのため、エアギャップが試作機2号機では5mmであったが、試作機3号機では7mmに増加した。さらに、半径方向に着磁した永久磁石も使用しなかった。したがって、試作機3号機の軸受力は試作機2号機に比べ、約40%低減した。

試作機3号機の磁気浮上回転特性を確認した。実験結果を図11に示す。結果より、軸受力が低下したにもかかわらず、安定した状態で約3000rpmまでの範囲で浮上回転を行うことができた。

次にローレンツ力型磁気ベアリングの回転損失を確認するために、フリーラン実験を行った。実験結果を図12に示す。

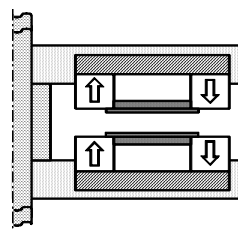


図10 試作機3号機のロータの断面図

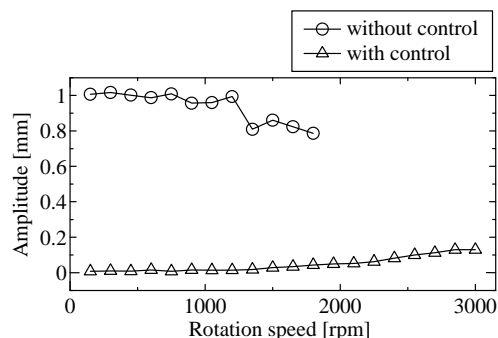


図11 試作機3号機の浮上回転特性

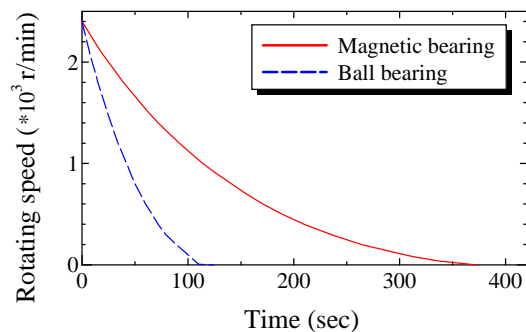


図12 フリーラン実験

実線がローレンツ力型磁気ベアリングの結果であり、波線がボールベアリングでロータを支持したときの結果である。磁気ベアリングで支持した場合、ロータの回転が停止するまでにかかった時間は、ボールベアリングで支持した場合に比べ約3.5倍長くなった。これにより、本磁気ベアリングが回転損失を大幅に低減できていることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

1. Nobuyuki Kurita, Keisuke Ohshio, Takeo Ishikawa, "Design of permanent magnet hybrid magnetic bearing with minimum salient poles", Journal of System Design and Dynamics, Vol. 5, No. 5, pp. 829-840 (2011) 査読有り
2. Nobuyuki Kurita, Keisuke Ohshio, Takeo Ishikawa, "A study on the Basic

Characteristics of a Novel Design Active Magnetic Bearing with Permanent Magnet Bias Flux”, IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol. 131, No. 8, pp. 1000-1006 (2011) 査読有り

3. Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa, Yohji Okada, “Development of Lorentz force type magnetic bearing”, Materials Science Forum (Trans Tech Publications Inc.), Vol. 670, pp. 455-465 (2011) 査読有り
4. Nobuyuki Kurita, Noboru Kuroki, Yohji Okada, “Development of Lorentz Force Type Magnetic Bearing for Small-sized Energy Storage Flywheel System”, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 17, No. 2, pp. 227-231 (2009) 査読有り

[学会発表] (計9件)

1. 篠原悠, 栗田伸幸, 石川赴夫, “ラジアル方向着磁磁石の有無による2種類のローレンツ力型磁気ベアリングの開発”, 第2回電気学会東京支部栃木支所・群馬支所 合同研究発表会, 2012年2月29日, 群馬県桐生市
2. Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa, Yuh Shinohara, Yohji Okada, “Levitation characteristics of the Lorentz force type Magnetic Bearing”, 20th MAGDA Conference, November 15, 2011 Kaohsiung, Taiwan.
3. 篠原悠, 栗田伸幸, 石川赴夫, “ローレンツ力を用いた磁気ベアリングの浮上回転特性に関する研究”, 第1回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, 2011年3月3日, 足利工業大学, 栃木県
4. Nobuyuki Kurita, Keisuke Ohshio, Takeo Ishikawa, “Design of permanent magnet hybrid magnetic bearing with minimum salient poles”, MOVIC2010, August 17-20, 2010, Tokyo JAPAN.
5. Nobuyuki Kurita, Keisuke Ohshio, Takeo Ishikawa, “Basic Analysis and Design of the Permanent Magnet Hybrid Type Magnetic Bearing for Small-sized Hydraulic Generator”, IPEC2010, June 2, 2010, Sapporo, JAPAN.
6. 栗田伸幸, 篠原悠, 石川赴夫, 岡田養二, “ローレンツ力型磁気軸受の軸受特性に関する研究”, 第22回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2010年5月20日, 門司港レトロ, 福岡県北九州市
7. 大塩佳祐, 栗田伸幸, 石川赴夫,

“永久磁石ハイブリッド型磁気軸受の設計”, 平成22年度電気学会全国大会, 2010年3月18日, 明治大学, 東京

8. Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa, and Michio Matsunami, “Basic design and dynamic analysis of the small-sized flywheel energy storage system -Application of Lorentz force type magnetic bearing-”, ICEMS 2009, November 16, 2009, Tokyo, JAPAN.
9. Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa and Yohji Okada, “Development of Lorentz force type magnetic bearing”, JAPMED’6, July 28, 2009, Bucharest, Romania.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗田伸幸 (KURITA NOBUYUKI)
群馬大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 60435493