

磁気軸受制御の新しい展開と電力貯蔵フライホイールへの応用

Recent Trend of Magnetic Bearing Systems and It's Application
for Energy Storage Flywheel System野波 健蔵*
Prof. Kenzo NONAMI

This paper is concerned with the recent trend of a research and development project of magnetic bearing control and its application for flywheel energy storage system. Some new results of magnetic bearing control system are described. Especially, a novel control method called zero power control is introduced. The zero power control means not only the zero bias current but also the zero control current for rotor near its equilibrium. The electromagnetic bearings are used for zero bias control as zero power nonlinear control. After the situation of the energy storage flywheel system is introduced, the application of the zero power control to the flywheel system for better efficiency of energy storage flywheel system is shown in this paper.

Key Words: Magnetic bearing, Zero Power Control, Zero Bias Control, Flywheel, Energy Storage, Nonlinear Control, Experiments

1. 緒言

最近、磁気軸受の新しい応用として様々な容量の電力貯蔵フライホイールが現実味を帯びてきている。そして、日本、米国、ヨーロッパで精力的に開発が進められており、すでに、無停電電源UPS用フライホイールバッテリーがビジネスとしても登場している。

わが国では、90年代前半から開始されたNEDOのフィージビリティプロジェクトがその端緒となった。これは、昼夜間の電力負荷を平準化することを目的として、全国約1万箇所にある変電所施設に併設する形で10MWh級電力貯蔵用フライホイールを施設し、夜間の残余電力を利用してフライホイールを回転させ、電気エネルギーを運動エネルギーに変換して貯蔵し、昼間の電力需要ピーク時には運動エネルギーから電気エネルギーに変換して使用するという壮大な構想である。この基礎研究として小容量と中容量のフライホイールの研究を実施し、フライホイール効率の向上のために、超電導磁石のみならず磁気軸受が適用されている。このプロジェクトでは高効率のフライホイールシステムや磁気軸受を目指した研究が精力的になされている。

本稿では磁気軸受制御の新しい動向および磁気軸受を電力貯蔵フライホイールシステムへ適用する最近の展開について述べる。

2. 磁気軸受制御の新しい展開

磁気軸受を用いることの最大の利点は非接触支持ができることによって摩擦・磨耗がなくなることであり、さらに、クリーン性が高いこと、動力伝達効率を飛躍的に向上させることができ、高速回転も可能となるなど様々な長所を持っている。このため、ターボ分子ポンプやIC製造装置内のクリーン搬送車などに良く使われている。これまで、磁気軸受の先端制御に関する研究はスライディングモード制御^{1), 2), 3), 4)}、厳密な線形化に基づく手法^{5), 6), 7)}、H_∞制御⁸⁾、μ制御⁹⁾などが報告されている。

一方、磁気軸受の短所に関しては、商用化されているターボ分子ポンプなど一部の対象を除けば、一般に高価であること、不安定系を安定化する制御回路が必要なことなど広く普及するためにはさまざまな問題がある。その一つに多くの磁気軸受はそのアクチュエータに電磁石を用いているため、消費電力が大きくなるという欠点がある。

従来の磁気軸受では磁束が変化する中を回転体が通過するので、回転体内部に渦電流が発生する。通常の磁気軸受システムでは渦電流による損失は問題にならないが、電力貯蔵用フライホイールを実現するためには、この回転損失を低減させることが必要である。この問題を解決するために、著者らは「ゼロパワー非線形制御磁気軸受¹⁰⁾」を提

*千葉大学工学部 電子機械工学科 教授 工学博士

案している。ゼロパワー非線形制御磁気軸受は永久磁石を使わずに、電磁石だけを利用して、平衡状態にあるとき一切の電流(パワー)を流さないという意味でゼロパワーと定義している。すなわち、バイアス電流を供給せず、制御電流のみを用いて安定浮上を実現するため、平衡点では制御電流がゼロとなるため理論的には平衡点で完全ゼロパワーとなる。平衡点から離れたときはゼロバイアス制御とも定義できる。また、回転体自身が本来有している自己平衡作用やジャイロ効果を利用することで高速回転域ではロータは平衡点近傍に位置するため、実質的にはゼロパワー制御がほぼ実現される。

初期の磁気軸受ゼロパワー制御は永久磁石を使用することでバイアス電流の省略を狙ったものである。著者は永久磁石と電磁石を併用したゼロパワー磁気軸受系を離散時間スライディングモード制御により実現した¹¹⁾。この磁気軸受は永久磁石と電磁石を組合わせたアクチュエータを用いており、バイアス電流によって発生する吸引力を永久磁石吸引力で代用している。このためバイアス電流を必要とせず、通常の磁気軸受に比べ消費電力を大幅に低減できる。しかし、電磁石と永久磁石を組合わせたアクチュエータとなるために、電磁石のみを用いた磁気軸受に比べ複雑な構成となり高コスト化が問題となる。さらに、回転中に磁束をロータが切ることになり変わらないため、渦電流の問題は解消せず発熱等の課題が残る。

バイアス電流を供給しない非線形磁気軸受システムに関する研究は、Chararaらが入出力線形化を行った磁気軸受システムに対してスライディングモード制御¹²⁾、著者らがバックステップ法に基づいて出力フォードバック制御^{13), 14), 15)}を研究している。しかし、不釣合い振動等の存在のために、浮上体が平衡点に到達せず、ふれまわり振動分や重力によるロータの傾き補正だけ制御電流が供給されるという問題が発生しており、完全ゼロパワー制御は現在まで実現していない。

3. 電力貯蔵フライホイール

地球温暖化防止を目指して排気ガスCO₂の削減および環境保護のためにエネルギーのリサイクルが重要な課題となっている。再生可能なエネルギーを目指す手法として商用の電力貯蔵用フライホイールの研究開発がしのぎを削っており、現在、日本、アメリカ、オランダ、イタリア、ドイツ、その他のヨーロッパ各国で行われている。

オランダの風力発電向けフライホイールエネルギー電力貯蔵プロジェクト¹⁶⁾、電気駆動バス、ハ

イブリッドバスに搭載する電力貯蔵フライホイールに関するプロジェクト¹⁷⁾、アメリカのNASA宇宙衛星用電力貯蔵フライホイール開発プロジェクト¹⁸⁾、フライホイール無停電電源装置(Flywheel UPS)開発プロジェクト¹⁹⁾などの研究開発が報告されている。日本もこの視点からNEDOプロジェクト関連で、四国総合研究所、石川島播磨重工業、光洋精工、千葉大学、東京電力、三菱電機等で電力貯蔵フライホイールの研究がなされている。

電力貯蔵フライホイールシステムの容量は小容量から巨大容量まで各種検討されており、巨大なものは緒言で述べた単機システムの容量が10MWh級システムを目指している。しかし、これは現状の科学技術レベルでは実現が難しいとも言われている。したがって、システムの構成は単機での所定容量システムの実現を目指すのではなく、小容量システムを多数適用することで所定容量を実現する方法が検討されている。単機システムの場合は制御対象は一つであるので、制御系構成自体は容易であるが、実際のところ、システム設計、製造、搬送、維持、安全性、信頼性等に関する課題が山積している。

小容量システムを多数用いて所定容量システムを実現するのは制御対象が多数存在しているので、これらを結合して制御するのは困難であるが、個々のシステムの設計、製造、搬送、維持は容易と思われる。これまでの研究によって、回転による損失から数時間以上のエネルギー貯蔵は無理と考えられ、さらにフライホイールの材料の強度から高速回転は不可能と言われてきた。結果的に、大容量のシステムを設計することはきわめて困難とされてきた^{20), 21)}。そして小容量のフライホイールシステムに対する振動解析²²⁾、物理パラメータの計算²³⁾、中型フライホイールシステムの開発²⁴⁾、大容量フライホイールシステムに対する物理パラメータとエネルギーの試算²⁵⁾、大容量フライホイールシステムに対する概念設計と構造設計²⁶⁾、小容量フライホイールシステムの詳細な研究²⁷⁾が報告されている。

現状は、小容量システムでの実験的研究から多くの課題を克服して、つぎに、中容量システムの開発が進められているというのが実情である。中容量の課題を克服できれば大容量システムの研究開発が実施されるかもしれない。とくに、システム実現のための要素技術としてフライホイール本体の諸元と構造、この製造技術、浮上(磁気軸受)システム、電動発電機、高効率エネルギー変換技術、緊急時の保護などの課題を検討することが必要である²⁸⁾。

一方で、電力貯蔵フライホイールシステムの力学に関する研究²⁹⁾、H 制御³⁰⁾、スライディングモード制御³¹⁾、分散制御³²⁾、 μ 制御³³⁾などの研究が著者らによって集中的に行われている。

4. ゼロパワー非線形制御型電力貯蔵フライホイール

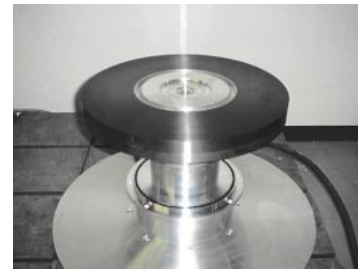
従来の磁気軸受はロータが平衡状態でもバイアス電流によりエネルギーが消費されるため、もし、これを電力貯蔵フライホイールに適用すると、トータルなエネルギー貯蔵効率は良くない。従来の磁気軸受では磁束が変化し、回転体が通過するので、回転体内部に渦電流が発生する。通常の磁気軸受システムでは渦電流による損失は問題にならないが、電力貯蔵用フライホイールを実現するためには、この回転損失を低減させることが必要である。このために、ゼロパワー制御を電力貯蔵フライホイールシステムに適用し、ゼロパワー型の電力貯蔵フライホイールシステムを設計した。

著者らは10MWh級高温超電導磁気浮上フライホイールシステムに対してANSYSでジャイロ効果を有する振動解析モデルを構築し、ジャイロ効果を有する振動解析を行った。つぎに、振動解析の結果に基づく次元有限要素法モデルを構築し、コレスキ分解によってモード分離し、ゼロパワー補償器を設計した。そして、シミュレーションを行い、シミュレーションの結果から制御入力ゼロになることを確認し、ゼロパワー制御の実現可能性について考察した³⁴⁾。

しかし、10MWh級高温超電導磁気浮上フライホイールシステムの実現にはまだ多くの問題があるため、10MWh級高温超電導磁気浮上フライホイールシステムの設計手順に基づいて小容量磁気軸受フライホイールシステムのゼロパワー制御系を設計した。なお、ロータの重量と回転数から簡単な計算により、システムは0.5KWh級磁気浮上フライホイールシステムと定義される。本研究で用いた0.5KWh級磁気浮上フライホイールシステムのロータ部を図1に示す。図1(a)は0.5KWh級フライホイールをつけたロータ部である。図中の黒い部品はCFRP製ロータで直径400mm、高さ40mmのフライホイールである。図1(b)は実験装置の外観である。高さは0.65mで、直径は0.6mである。

ラジアル方向を制御するために、ラジアル磁気軸受ユニットを配置している。ラジアル方向に配置されるギャップセンサでラジアル方向の変位を検出する。ギャップセンサと電磁石以外に保護ベ

アリングも配置している。磁気軸受とロータのギャップ長は250 μ m、保護ベアリングとの距離は100 μ mである。このシステムはNEDO国際共同研究(光洋精工、千葉大、CCM)の基礎研究用試験装置である。なお、本プロジェクトではオランダCCM社と協力して、ゼロパワー磁気軸受型フライホイールを平成15年度中に実現する予定である。将来は、バスへの搭載も検討する予定である。図1のシステムの各パラメータの数値を表1に示す。



(a)ロータ



(b)外観

図1 0.5KWh級フライホイールシステム
0.5KWh class flywheel system

表1 システムの各パラメータの数値
System parameters and values

Item	Value
Mass of the rotor, kg	4.85
Mass of the flywheel, kg	8.8220
Constant of upper magnetic attractive force, Nm^2/A^2	4.75×10^{-6}
Constant of Lower magnetic attractive force, Nm^2/A^2	3.10×10^{-6}
Nominal air gap of x direction, m	0.25×10^{-3}
Nominal air gap of y direction, m	0.25×10^{-3}
Moment of inertia about x and y axis, kgm^2	1.73×10^{-1}
Moment of inertia about z axis, kgm^2	1.86×10^{-1}
Distance from the center of gravity (upper), m	-4.99×10^{-2}
Distance from the center of gravity (lower), m	1.676×10^{-1}

このシステムを用いて、剛性モードと弾性モード、および、ジャイロ効果を無視した場合とジャイロ効果を考慮した場合について振動解析を行い、振動解析結果に基づく制御用モデルを構築し、スライディングモード制御とH_∞制御を行い、閉ループの安定性を考察している。このシステムのゼロパワー補償器設計とシミュレーション、実験結果に関しては、文献^{35), 36)}を参照されたい。

バイアス電流を必要とする従来のPID制御時はこの場合、約1.5Aの電流を常時供給していることが分かっている。したがって、電流にしてPID制御の25%程度で同じ性能を得ていることになる。パワーに変換すると6.25%に低減したことになる。この研究はさらに回転速度を上昇させて、幾つかの提案した方法を検証し考察する予定である。

5. 今後の課題と展望

著者らは、常電導磁気軸受のみによるゼロパワー・ゼロ損失非線形制御実験にすでに成功しており、とりわけ、従来型の磁気軸受のエネルギー消費量の6%に抑制した制御性能は画期的であり、革新的技術と言える。この成功を受けて、高効率電力貯蔵フライホイールの実現性が現実味を帯びてきた。この技術はすでにジャイロ効果の強いシステムや弾性ロータにも適応可能であることが実証されており、超高速回転による更なる性能向上と完全ゼロパワー制御の実現が期待される。

ゼロパワー非線形制御系の設計法としては「周波数整形非線形ロバスト制御」や「LMIベースゲインスケジューリング型H_∞制御³⁷⁾」や「これと結合したスライディングモード制御³⁸⁾」の研究がある。ジャイロ作用を有する系は、固有振動数が回転速度の関数となる時変系となる。したがって、1つの固定補償器で制御する場合、全回転数領域で優れた特性を得ることはできない。一方、ゲインスケジューリング型補償器は全領域で常に最適な性能を有する。したがって、線形行列不等式(LMI)に基づくゲインスケジューリング型H_∞制御やこの超平面とスライディングモード補償器を設計することで、より高性能なゼロパワー制御が実現できると思われる。さらに、不釣り合い振動の大きい系では、「モデルを不要とする未知の外乱周波数推定型適応アルゴリズムによる不釣り合い振動適応抑制制御^{39), 40)}」と併用することも有効となる。

今日、電力貯蔵フライホイール型の無停電電源装置や電気自動車、ハイブリッド自動車分野、列

車車両などへの電力貯蔵フライホイールバッテリーの応用が期待されている。そして、寿命が短く廃棄コストの高い鉛バッテリーに代わり、大容量電力貯蔵が可能で半永久的な使用ができ無公害で安全なバッテリーへの期待が高まっている。

6. 結言

本稿では、磁気軸受制御の新しい展開と電力貯蔵フライホイールへの応用について述べた。「電力貯蔵フライホイールの研究」は古くて新しいテーマであり、磁気軸受とフライホイールの組み合わせはこれまでも何度となく試みられてきたが、要素技術の未熟さが原因して成功に至っていない。しかし、今日の環境は全く異なる。各要素技術は格段に進歩しており、何よりも地球環境保護という大命題が強く叫ばれている。歴史的宿願であった「磁気軸受型電力貯蔵フライホイール」は早々に実現され、かつ、ビジネスとしても成功する条件が整いつつあると思われる。磁気軸受の新しい、大きな市場として今後の展開を期待したい。

参考文献

- 1) 田, 野波, 日本機械学会論文集C編, vol. 60, no. 580, 1994, 4142-4149.
- 2) A. E. Rundell, S. V. Drkunov and R. A. Decarlo, IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol. 4, no. 5, 1996, 598-608.
- 3) 野波, 山口, 日本機械学会論文集C編, vol. 58, no. 545, 1992, 106-111.
- 4) 田, 野波, 日本機械学会論文集C編, vol. 60, no. 569, 1994, 94-101.
- 5) R. D. Smith and W. F. Weldom, IEEE Trans. on Magnetism, vol. 31, no. 2, 1995, 196-203.
- 6) D. L. Trumper, S. M. Olson and P. K. Subrahmanyam, IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol. 5, no. 4, 1997, 427-438.
- 7) 松村, 滑川, 村田, 電気学会論文誌, vol. 118, no. 4, 1997, 427-416.
- 8) 崔, 野波, 日本機械学会論文集C編, vol. 58, no. 553, 1992, 56-62.
- 9) 野波, 日本機械学会論文集C編, vol. 68, no. 666, pp. 398-405, 2002.
- 10) 野波, 有我, 第11回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, 1999, 215-218.
- 11) 野波, 仁科, 斎藤, 日本機械学会論文集C

- 編, 62-595, 1996, 967-975.
- 12) A. Charara, J. D. Miras, B. Caron, IEEE Trans. on Control System Technology, vol. 4, no. 5, 1996, 513-523.
- 13) 有我, 野波, 酒井, 日本機械学会論文集 C 編, vol. 67, no. 654, 2002, 102-109.
- 14) S. Sivrioglu, K. Nonami, A. Kobo, R. Takahata, 8th International Symposium on Magnetic Bearing, August 26-28, 2002, Mito, Japan, 593-598.
- 15) 有我, 野波, 酒井, 日本機械学会論文集 C 編, vol. 67, no. 654, 2002, 111-116.
- 16) <http://www.flywip.com/partners/inasco.html>
- 17) <http://www.prosper.ttk.de/ulev-tap1/opening.html>
- 18) D. A. Christopher, R. Beach, IEEE, 1997, 602-608.
- 19) <http://www.world-egg.com/fly/genrie.html>
- 20) Y. Miyagawa, H. Kamenno, R. Takahata and H. Ueyama, Preprint of ASC '98 in Palm Springs, CA, September 17, 1998
- 21) 中川, 高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発プロジェクト超電導応用研究会シンポジウム講演論文集(J P N), vol. 5, 1998, 398-401.
- 22) R. Takahata, H. Ueyama, Y. Miyagawa, H. Kamenno, H. Higasa, H. Ishikawa, Fifth International Symposium on Magnetic Bearings Kanazawa, Japan, 1996, 436-466.
- 23) M. Ahrens, A. Traxler, P. Burg, G. Schweitzer, Fourth International Symposium on Magnetic Bearings, ETH Zurich, 1994, 553-558.
- 24) R. Shimada, Bull. Res. Nucl. Reaction, vol. 22, 1998, 77-77.
- 25) 樋笠, T. IEE Japan, vol. 113-B, no. 7, 1993, 768-775.
- 26) H. Bornemann, IEEE Trans. On Applied Superconducting, 7-2, 1997, 398-401.
- 27) Takahata, H. Higasa, H. Ueyama, Y. Miyasawa, H. Kamenno And F. Ishikawa, T. IEE, vol. 117-D, no. 9, 1997, 1132-1 138, (in Japanese).
- 28) R. E. Horner, 0-7803-3507-4/96, 1996, IEEE, 668-675.
- 29) 江戸, 神吉, 川西, 香川, 日本機械学会講演論文集, no. 984-1(98.3関西支部第73定期期総会講演会), 307-308.
- 30) 張, 野波, 樋笠, 日本機械学会論文集 C 編, vol. 67, no. 660, 2001, 2572-2579.
- 31) 張, 野波, 樋笠, 日本機械学会論文集 C 編, vol. 67, no. 662, 2001, 3139-3145.
- 32) J. Cao, L. Yu, Y. Xie, Seventh International on Magnetic Bearings, August 23-25, 2000, ETH Zurich, 69-73.
- 33) U. Schonhoff, J. Luo, G. Lu, E. Hiton, R. Nordmann, P. Allaire, Seventh International on Magnetic Bearings, August 23-25, 2000, ETH Zurich, 317-322.
- 34) 張, 野波, 樋笠, 日本 A E M 学会誌, vol. 10, no. 2, 2002, 208-216.
- 35) S. Sivrioglu, M. Saigo, K. Nonami, 第15回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集.
- 36) 張, 野波, 第15回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集.
- 37) S. Sivrioglu, 野波: 日本機械学会論文集, C 編, 63(610), 1997, 1934-1939.
- 38) K. Nonami, S. Sivrioglu: Sliding Mode and Nonlinear Control, Springer-Verlag UK, 123-151, 1999.
- 39) 劉, 野波: 日本機械学会論文集, 66(649), 2000, 2966-2973.
- 40) 劉, 野波: 日本機械学会論文集, C 編, 65(638), 1999, 4305-4311.