

1 kWh級小型フライホイール電力貯蔵装置の基本設計 - ゼロパワー非線形制御型磁気軸受の適用 -

Basic Design of 1kWh Class Compact Flywheel Energy Storage System

- Application of Active Magnetic Bearings with Zero-power Nonlinear Control Method -

亀野浩徳 H. KAMENO 久保 厚 A. KUBO
ステファン・ゲヒター S. GÄCHTER 高畑良一 R. TAKAHATA

In the development of a flywheel energy storage system (FESS) that provides a rated power for several hours, mechanical and electrical losses of the FESS become a crucial point. Therefore, this paper presents the specifications in terms of losses for active magnetic bearings (AMB) and motor/generator. The total loss of a conventional FESS and the methods to reduce almost quarter in the total loss, are presented. The point of improvement is mainly the reduction of the AMB loss by using zero-power nonlinear control. This control method avoids the bias currents, which cause the rotational loss of the AMB and the power consumption of the AMB controller.

On the other hand, the rotor system's dynamic analysis are calculated in order to guarantee a stable rotation of the rotor including flywheel. As the result, it is possible to conclude that unexpected vibration of the rotor caused by bending mode natural frequencies will not occur at the rated rotational speed.

The basic design of the 1kWh class compact flywheel energy storage system (ComFESS) that is able to supply the energy of 300W during 3 hours, has been completed.

Key Words: flywheel energy storage system, ComFESS, active magnetic bearing, zero-power nonlinear control

1. はじめに

図1に示すような光ファイバ通信施設の場合、電力系統に不慮の事故が発生したときでも最低3時間は電力を供給しつづけなければならない。そのため、非常用バックアップ電源として鉛蓄電池が使用される¹⁾。しかし、鉛蓄電池には下記～の問題がある。

寿命が短い

人体や動植物に悪影響を及ぼす有害物質を含む
周辺の温度管理が必要

大きな設置面積が必要

そこで、この鉛蓄電池に置きかえることが可能な、高効率でクリーンなフライホイール電力貯蔵装置(FESS: Flywheel energy storage system)²⁾の開発が求められている。

しかし、今までに実用化されているほとんどのFESSの場合、瞬時停電対策や周波数安定化を目的としていたので、電力供給時間は数秒間から数分間程度であった。そのため、FESSの全損失は大きな問題ではなかったため、軸受には転がり軸受が使用されていた。これに対して、3時間程度の電力供給が必要な図1の非常用バックアップ電源にFESSを応用する場合、FESSの全損失は重大な問題になる。

そこで本研究では、回転体の非接触支持が可能な制御型磁気軸受(AMB: Active magnetic bearing)などを採用し、全損失の低減化を試みた。そして、300Wの電力を連続で3時間供給可能な1 kWh級FESSのシステム基本設計を行い、その成立性を検討した。その結果、損失の大きな機械要素について、損失の低減目標および開発課題を明確化し、システム基本設計を完了することができた。

本研究では、この1 kWh級FESSのことを小型フライホイール電力貯蔵装置(ComFESS: Compact flywheel energy storage system)と呼ぶ。

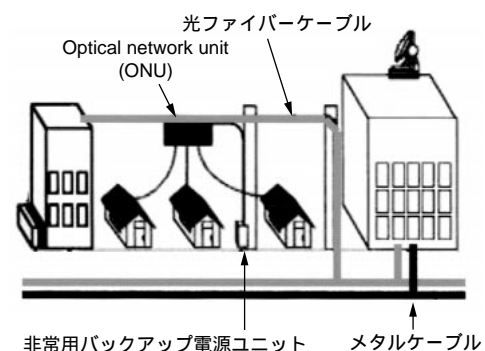


図1 光ファイバ通信施設

Telephone network facilities of optical fiber cables

2. ComFESSのシステム基本設計

2.1 従来技術を使用した場合の損失

まず最初に、従来技術のAMBやモータ発電機を用いた場合のComFESSの全損失を明確化した。この全損失は、AMB損失、風損およびモータ発電機損失に分類され、従来技術を用いた場合の各損失は表1の“従来”に示す各値のとおり試算される。ここで、これらの試算値に基づいて、ComFESSに貯蔵されたエネルギーから300Wの電力を連続で取り出したときの回転体の回転減衰特性を計算した。その結果を図2の“印(従来)”に示す。図2より、従来技術を用いた場合、回転体の回転は約1.5時間で停止(0 min⁻¹)することがわかる。この結果は、ComFESSの各損失をさらに低減しなければならないことを示唆している。

なお図2の計算では、回転体を後述の外径440mmのCFRP製フライホイール(極慣性モーメントは1.86kgm²)とし、定格回転数を24 000min⁻¹(回転エネルギーは1.6kWh)と仮定した。また、AMBコントローラやモータ発電機用インバータの電源としてComFESSに貯蔵されたエネルギーを使用することを考慮している。

2.2 損失の低減目標

次に、1 kWh級のComFESSを実現するために、各損失の目標値を表1の“目標”に示すとおり設定し、開発課題を明確化した。

表1 ComFESS全損失の分類
Classification of ComFESS losses

	従来	目標
AMB損失, W	500	70
風損(10Pa以下), W	50	40
モータ発電機損失, W	200	80
合計, W	750	190

24 000min⁻¹のとき

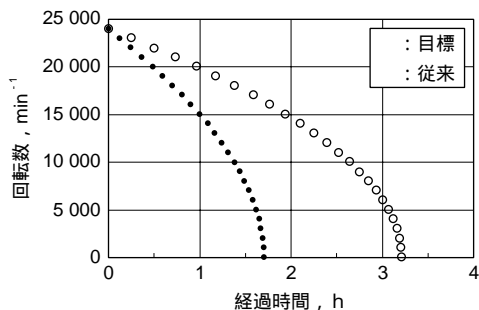


図2 ComFESSの回転減衰特性(試算結果)
Estimated rotational decay of rotor

この目標値を達成できれば、図2の“印(目標)”で示すように、ComFESSは300Wの電力を連続で3時間以上取出すことが可能になる。なお、具体的には、次の(1)~(3)の方法で各損失の目標を達成する見込みで、現在までにシステム基本設計を完了した。今後試作し、設計の妥当性について検証する予定である。

- (1)AMB損失；PMバイアス型アキシアルAMBやゼロパワー非線形制御方式のラジアルAMBを採用することにより、AMB損失を約500Wから約70Wまで低減(詳細は後述)。
- (2)風損；約10Pa程度の真空度を想定してあり、通常のロータリポンプでさらに真空度を高めることは難しく、40W以下までの風損低減は困難。
- (3)モータ発電機損失；ヒステリシスモータを採用し、損失を約200Wから約80Wまで低減。

3. AMBの基本設計

前項のAMB損失の目標値を達成するために、損失の要因をさらに分析した結果、表1のAMB損失は下記1)~3)に分類できる。ここで、従来技術のAMBを用いた場合の各損失の値を表2の“従来”に示す。

1)AMBの回転損失

主にRaAMBのロータコア内に発生するうず電流損にもとづく。

2)AMBの消費電力

主に電磁石への供給電流に起因する銅損にもとづく。

3)AMBコントローラの消費電力

主にAMBコントローラ内のアンプやセンサ回路などを駆動するための消費電力にもとづく。

表2の損失目標を達成するために、アキシアルAMB(AxAMB)とラジアルAMB(RaAMB)の基本設計を実施したので、以下に報告する。

表2 AMB損失の分類
Classification of AMB losses

		従来	目標
1)AMB回転損失 (うず電流損)	AxAMB	≒0	≒0
	RaAMB	200	≒0
2)AMB消費電力 (銅損)	全体	100	
	AxAMB		≒0
	RaAMB		≒0
3)AMBコントローラの消費電力	全体	200	70
合計		500	70

24 000min⁻¹のとき

3.1 AxAMBの基本設計

ComFESSでは、回転体の自重(約75kg)をAxAMBで非接触支持する必要がある。そのためにはAxAMBに約4Aの浮上電流を供給しなければならない(ここで、AxAMBに供給される全電流 = 浮上電流 + 制御電流)。しかし、この浮上電流がAxAMBの消費電力(銅損)を増大させる原因になる。

これを避けるため、回転体の自重支持に必要な磁気力を永久磁石(PM: Permanent magnet)の吸引力で代用した。その基本構造を図3に示す。このPMバイアス型アキシャル電磁石(AxStator)は、PM吸引力の調整のために、AxStator鉄芯(AxStator Core)内に分布するPMの磁束を微調整できるPMギャップ(PM Gap)を有することが特徴である。

さらに、回転体の軸方向振動については、コイル(AxCoil)に制御電流を供給し、PMバイアス型AxStatorに磁気力を発生させることにより安定化させる。ただし、PMバイアス型AxStatorを実現させるためには、PM磁束を強めたり弱めたりできるように、制御電流を振動に応じて交番させなければならない。そのために、従来技術のモノポーラ型アンプの代わりにバイポーラ型アンプが必要となる。図4には、制御電流とPMバイアス型AxStatorの発生する磁気力の関係を試算した結果を示す。PMバイアス型AxStatorは、制御電流が0Aのときに回転体自重(約75kg)に相当する

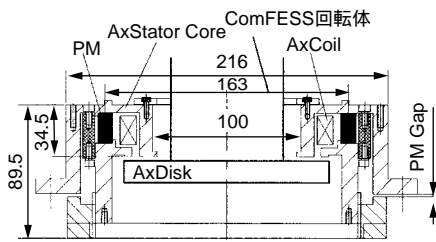


図3 PMバイアス型アキシャル電磁石
PM biased AxStator

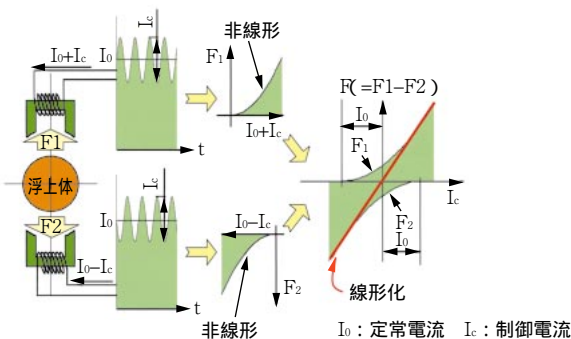


図5 線形制御方式
Linear control method

磁気力を発生し、制御電流の増減とともに磁気力の増減することがわかる。なお、図4の横軸にはマイナスの制御電流が表記されてあるが、これはPM磁束を弱める方向に制御電流を供給することを意味する。

ここで、回転体が安定に浮上回転していると仮定すれば、制御電流はほとんど0Aになる。したがって、AxAMBの銅損は理想的には0Wとなる(表2“目標”の2))。

一方、AxAMBの回転損失(うず電流損)についても、安定に浮上回転しているときはほとんど0Wとなる(表2“目標”の1))。これは、従来技術の場合と同様にAxAMBの回転体に及ぼす周方向の磁束変化が非常に小さく、回転体の内部にうず電流がほとんど発生しないためである。

3.2 RaAMBの基本設計

本来、個々のRaAMB電磁石(RaStator)は、供給する電流(=定常電流 I_0 +制御電流 I_c)と発生する磁気力(F_1 あるいは F_2)の関係は強い非線形性を示す。しかし、図5に示すように、互いに対向配置されたRaStator間で浮上体を吸引させ合い、 F_1 と F_2 を相殺することにより、磁気力 $F(=F_1 - F_2)$ と制御電流 I_c の関係の線形化を図っている(線形制御方式)。そのため、各RaStatorには常に定常電流(Bias current)を供給しなければならず、この

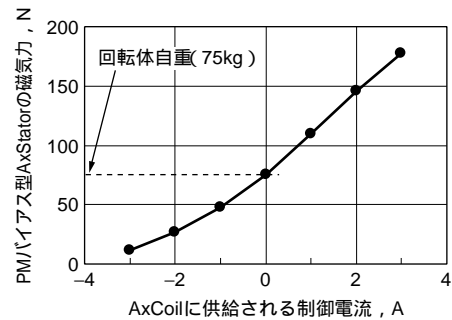


図4 PMバイアス型アキシャル電磁石の磁気力
(試算結果)

Simulated magnetic force of PM biased AxStator

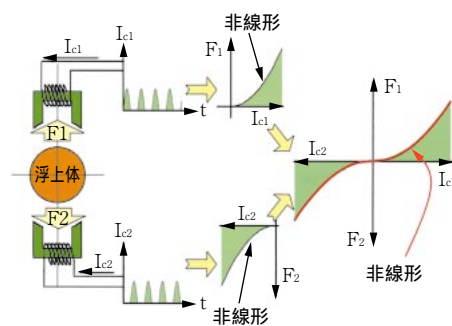


図6 ゼロパワー非線形制御方式
Zero-power nonlinear control method

定常電流がRaAMBの消費電力(銅損)を増大させる原因になる。

この銅損の低減を目的として、“ゼロパワー非線形制御方式(Zero-power nonlinear control method)³⁾⁴⁾”を採用した。これは、浮上体を目標位置まで吸引するとき、一方の電磁石コイルのみにしか制御電流を供給しない、DSPによるスイッチング制御方式である。そのため、図6に示すように、磁気力 F_1 および F_2 と制御電流 I_{c1} および I_{c2} の関係は強い非線形性を維持する。なお、この方式の場合、制御アルゴリズムが非常に複雑という問題があったが、近年、演算処理能力の高速なDSPが開発されたことにより、この問題は解決されつつある。また、制御電流が0A近傍のときにチャタリングの発生が懸念されたが、ほとんど発生しないことを別の実験³⁾⁴⁾で確認している。

以上の結果、ゼロパワー非線形制御方式を採用した場合、RaStatorへの定常電流の供給が不要なので、回転体が安定に浮上回転していると仮定すれば、制御電流はほとんど0Aになり、その結果、RaAMBの銅損は理想的には0Wとなる(表2“目標”の2))。

一方、RaAMBの回転損失(うず電流損)についても、安定に浮上回転しているときは理想的には0Wとなる(表2“目標”の1))。これは、制御電流がごく僅かなので、RaAMBの周方向の磁束変化が非常に小さく、その結果、回転体の内部に発生するうず電流も微小なためである。

ところで、上述の設計を適用したAMBで支持した回転体が安定に浮上回転しているときでも、実際にはモータ発電機の駆動力や回転体のアンバランス力が作用するので、回転体には微小な振れ回りや振動が残留することが予測される。この場合、その振動の安定化のためにAxAMBやRaAMBには制御電流が供給されるので、結果的には僅かではあるが銅損や回転損失が発生することになる。したがって本研究では、これらの銅損や回転損失の程度についても評価および理論検証する予定である。

3.3 AMB Controllerの消費電力

AMBコントローラの消費電力は、AMBコントローラ内のアンプやセンサ回路などを駆動させるために必要な直流定電圧電源の損失がほとんどを占める。従来は、定電圧電源の方式として、ノイズやリップルの少ないトランジスタ式シリーズレギュレータを使用していたが、本方式の電源を用いた場合、AMBコントローラの消費電力は約

200Wであった。しかし近年では、ノイズやリップルの改善された高効率のスイッチングレギュレータが開発され、その結果、AMBコントローラの消費電力を約70Wまで低減できる見込みが得られた(表2“目標”の3))。

4. ロータダイナミクス検討

前述のPMバイアス型AxAMBやゼロパワー非線形制御方式のRaAMBを用いたComFESSの機械設計を実施した。図7にComFESSの構成図を示す。回転体は、中央に配置された主軸と、その上側にハブを介してボルト締結されたCFRP製フライホイールから構成される。そして、回転体、AxAMB、RaAMBおよびヒステリシスモータなどの全要素部品は、真空容器の内部に設置される。ComFESSの主な仕様を表3に示す。

ここで、ComFESS回転体の固有振動数解析を実施した。その結果を図8および図9に示す。なお、図8は曲げモード形状を示し、図9は回転体回転数に対する1次曲げ固有振動数のジャイロ分岐の影響を示す。

表3 ComFESSの主仕様
Specifications of ComFESS

回転体	
全質量, kg	75
極慣性モーメント, kgm ²	1.86
主軸(外径×長さ), mm	75×258
フライホイール (外径×内径×長さ), mm	440×300×260
AxAMB 制御方式	PMバイアス型 非線形制御方式
RaAMB 制御方式 電磁石構造 ロータ	ゼロパワー非線形制御 ヘテロポーラ けい素鋼板
タッチダウン軸受 上側(非常時の支持方向) 下側	半径方向 半径&軸方向
AMBコントローラ 電磁石供給電源, DCV/A 最大電流, A(max) アンプ形式	80~150/40(total) (各電磁石ごと) PWM
定格回転数, min ⁻¹ (Hz)	2400(400)
真空度, Pa	約10
エネルギー貯蔵容量, Wh	900
回転体の回転エネルギー, kWh	1.6(24000min ⁻¹ 時) 0.1(5000min ⁻¹ 時)
電力容量, W	300(連続3時間)

これらの結果より，1次曲げ固有振動数(601Hz)が定格回転数(回転周波数=400Hz)よりも十分大きく，定格回転数で曲げ振動が誘発される恐れは少ないと判断することができる。

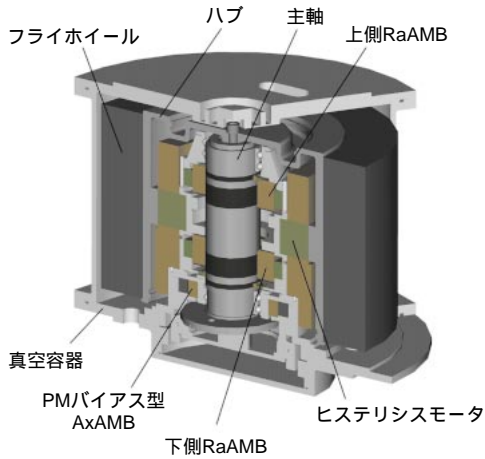


図7 ComFESSの構成図
Schematic drawing of ComFESS

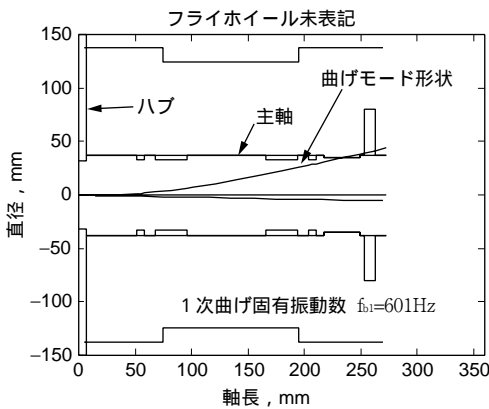


図8 1次曲げ固有振動数の曲げモード形状
1st bending mode shape

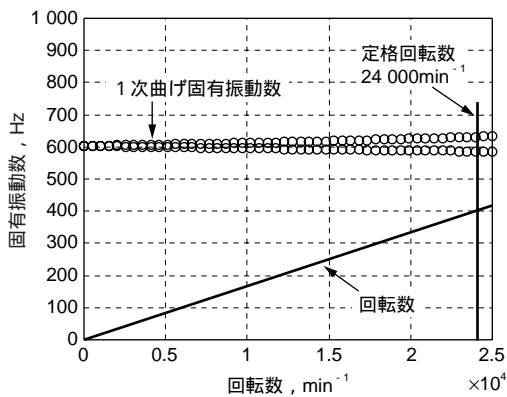


図9 1次曲げ固有振動数のCampbell Map
Campbell map of 1st bending mode

5. おわりに

本研究の結果，以下の結論が得られた。

- 1) PMバイアス型アキシャル制御型磁気軸受，ゼロパワー非線形制御方式のラジアル制御型磁気軸受およびAMBコントローラの基本設計を実施した。その結果，AMB損失を理想的には70Wまで低減できる見込みが得られた。
- 2) ComFESS回転体の固有振動数解析を実施した。その結果，1次曲げ固有振動数は定格回転周波数よりも充分大きかった。この結果は，定格回転数でComFESS回転体の曲げ振動が発生しにくいことを示す。
- 3) 上記1)2)の結果，300Wの電力を連続3時間供給することが可能な小型フライホイール電力貯蔵装置(ComFESS)の基本設計が完了した。

今後，以下の項目を実施し，ComFESSシステムの成立性と実用化のための問題点を明確化する予定である。

- ComFESSの詳細設計と試作。
- PMバイアス型アキシャル制御型磁気軸受およびゼロパワー非線形制御方式のラジアル制御型磁気軸受の理論検証。
- ComFESSの浮上・回転試験。
- ComFESSのシステム総合評価。

なお、本研究は、NEDO国際共同研究プログラム△(NEDO-Grant Project)“Compact Flywheel Energy Storage System”の一環として、NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization in Japan)の助成を受けて実施した。

謝辞

本研究の遂行にあたり，有益なご助言をくださったアイントホーフェン工科大学(オランダ)のシュレッサー名誉教授およびNTRK CO., LTD.の西本社長に深く感謝いたします。

共同で本研究を推進している千葉大学の野波教授およびCentrum voor Constructie en Mechatronica (CCM:オランダ)のソーレン博士に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 山崎：光ファイバ通信における端末機器への給電，J. IEEE Japan, Vol. 118, No.9(1998) 522-525.
- 2) 財団法人日本自動車研究所：エネルギー使用合理化システム開発調査 - ハイブリッド電気自動車開発調査 - ，日本自動車研究所 技術調査報告書 第26号(1997)I-69.
- 3) Y. Zhang, K. Nonami et al：Zero Power Control of 0.5kWh Class Flywheel System Using Magnetic Bearing with Gyroscopic Effect, Proceedings of 8th International Symposium on Magnetic Bearings ISMB-8 (2002) 587-592.
- 4) S. Sivrioglu, K. Nonami et al., Nonlinear Adaptive Control For a Flywheel Rotor AMB System with Unknown Parameter, Proceedings of 8th International Symposium on Magnetic Bearings ISMB-8 (2002) 593-598.
- 5) H. Kamenno et al., Basic Design of 1kWh class Flywheel Energy Storage System, Proceedings of 8th International Symposium on Magnetic Bearings ISMB-8 (2002) 575-580.

筆者



亀野浩徳*
H. KAMENO



久保 厚*
A. KUBO



ステファン・ゲヒター*
S. GÄCHTER



高畑良一**
R. TAKAHATA

* 総合技術研究所 機械システム研究部

** 総合技術研究所 機械システム研究部
工学博士