

# 小型フライホイール電力貯蔵装置( ComFESS )の開発

## Development of Compact Flywheel Energy Storage System (ComFESS)

久保 厚 A. KUBO 亀野浩徳 H. KAMENO 高畑良一 R. TAKAHATA

The objective of this research program is to develop a flywheel energy storage system that can replace the lead battery involving inherent problems in terms of maintenance and environmental reservation. The basic specification set forth has been "1 kWh class system (ComFESS) capable of providing a backup power supply of 300 Watt for approximately 3 hours", for which challenges were reduction of windage loss and rotation loss. Therefore, the flywheel is housed in a vacuum container and an active magnetic bearing is adopted to support the flywheel without contact.

This paper concerns the Watt loss as related to the specifications of the active magnetic bearing (AMB) and motor/generator. Specifically, discussion will be focused on the approaches employed to cut down on the whole Watt loss of the flywheel system to approximately a quarter of that involved in the conventional system. This improvement stems mainly from the reduction of AMB loss achieved by means of the zero-power nonlinear control.

This zero-power nonlinear control, being able to dispense with the bias current, enables both the AMB loss and the power consumption for AMB control to be minimized.

**Key Words:** flywheel energy storage system, ComFESS, active magnetic bearings zero-power nonlinear control, hysteresis motor

### 1. はじめに

IT革命の進展に伴い、停電などによる通信網の停止は社会生活や個人生活に極めて重大な影響を及ぼすようになってきた。現在鉛蓄電池がバックアップ電源として多数使用され、今後も急速に拡大する方向にある。しかし、鉛蓄電池は数年(3~4年)の寿命でありメンテナンスが必要で、さらに内部に人体、植物に強い影響を及ぼす化学物質や重金属が使用されているため、地球環境問題を避けて通れない。

このような状況に鑑み、メンテナンスや環境面で課題を有する鉛蓄電池に代りうるクリーンで高性能な電力貯蔵システムが求められており、その一つとしてフライホイールの開発が世界中で推進されている<sup>1)</sup>。

本研究では鉛蓄電池の代替としてフライホイール電力貯蔵システムを実現するための要素技術を開発した。その目標となるシステムを「小型フライホイール電力貯蔵システム(以下ComFESSと称す)」と呼ぶ。本ComFESSは、300Wの電力を3時間バックアップ可能な1kWhクラスのシステムである。3時間のバックアップを確保するためには、風損および回転損失の低減が必要である。そのために、フライホイールは真空容器内に収納し、軸受は非接触支持が可能で損失の小さい制御型磁気軸受(以下AMBと称す)を採用した。

### 2. 損失の目標

300W×3時間のシステムを構築するために、システムのプロトタイプ設計を実施した<sup>2)</sup>。ComFESSの構造図を図1に示す。

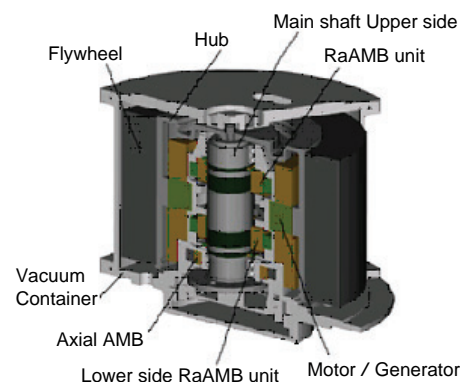


図1 ComFESSの構成図  
3D drawing of ComFESS

本システムでは、小型化を狙うために、フライホイールに直径440mmのCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)を使用し、その内径内部にハブと主軸を有する回転体を採用した。この回転体を $24\,000\text{min}^{-1}$ まで加速した後の減速過程で電力を取り出す構造である。ここで、AMBコントローラやインバータなどの駆動電力として本システムの貯蔵エネルギーを消費することを考慮し、さ

らに300W × 3時間の電力を取り出した場合の回転体の回転減衰特性を試算した。その結果を図2に示す。同図の+印(Conventional)は従来技術のAMBとモータ発電機を使用した場合の回転減衰特性である。AMBにはバイアス電流を用いた線形制御方式を用いている<sup>3)</sup>。モータ/発電機は、誘導モータを従来の電動コンバータで運転している。従来技術では、約1.5時間しか電力を取り出せないことがわかる。表1には、回転速度24 000min<sup>-1</sup>時の各種損失の概算値を示す。同表の「Conventional」は従来技術、「Target」は目標値である。

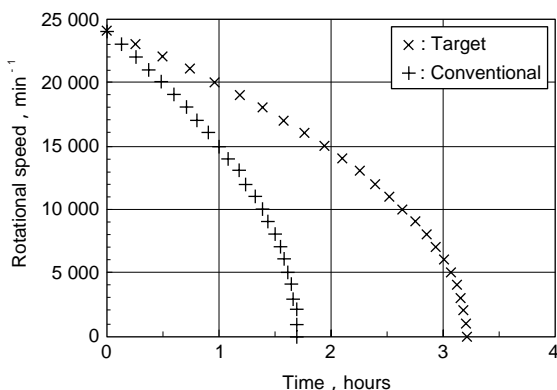


図2 ComFESSの回転減衰特性(試算結果)  
Estimated rotational decay of the rotor

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

@24 000min<sup>-1</sup>

	Conventional [W]	Target [W]
Loss of AMB	500	100
Windage Loss (at 1Pa)	50	50
Loss of Motor / Generator	200	95
Total	750	245

AMBの損失の目標値は、非線形制御方式(ゼロパワー制御)<sup>4)</sup>などを採用することにより、100W程度を目指したものである。風損は圧力2 Pa時の概算値であり、これ以上の低減は難しい。一方、モータ発電機の損失については、誘導モータより損失の小さいモータを採用し、95W程度の損失を目指した。また表1のTarget値を実現した場合の回転減衰特性を、図2に×印でプロットした。この結果より、300W × 3時間の電力取り出しを実現できることがわかる<sup>5)</sup>。

### 3. ComFESSの設計

上記目標を達成するため、ComFESSの設計を実施した。その結果は、次の通りである。

#### 3.1 モータ/発電機とコンバータ

本装置のモータ/発電機として、ヒステリシスモータと永久磁石(Permanent Magnet: 以下PMと称す)モータを比較検討した。その結果、以下の理由でヒステリシスモータを選択した。

- ・構造が単純でコストパフォーマンスが良好。
- ・低損失。(PMモータの損失は、この4~5倍)
- ・コンバータ開発不要。(IGBTタイプ市販コンバータを選定)

#### 3.2 磁気軸受(AMB)

##### 1) PMバイアス型アキシアル磁気軸受(AxAMB)

本研究では、回転体自重の支持に必要な磁気力をPMの吸引力で代替できるPMバイアス型アキシアル電磁石(PM biased AxStator)を採用した。

##### 2) ラジアル制御型磁気軸受(RaAMB)

主軸の上部と下部に1組ずつ配置されるラジアル制御型磁気軸受についても消費電力(銅損)を低減する必要がある。そこで、本研究では、RaAMBのバイアス電流(RaAMBに供給される全電流I = バイアス電流I<sub>o</sub> + 制御電流I<sub>c</sub>)を削減するために、“ゼロパワー非線形制御方式”を採用した。

#### 3.3 回転体

ComFESSの回転体は、主軸、ハブおよびフライホイールから構成される。その回転体の固有振動数を計算した結果を図3に示す。

ComFESSの仕様を表2に示す<sup>6)</sup>。

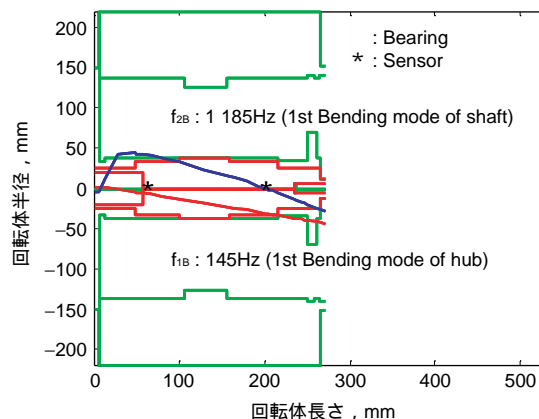


図3 回転体の曲げモード形状シミュレーション結果  
Result of mode shape simulation

表2 ComFESSの主仕様  
Main specification of ComFESS

Rotor	
Total Mass of Rotor:	75kg
Main Shaft:	Outer dia. 75mm Length 258mm
Flywheel:	Outer dia. 440mm Inner dia. 300mm Length 260mm
Energy Storage Capacity	900Wh (effective)
Kinetic Energy of the Rotor	1.6kWh (24 000min <sup>-1</sup> ) 0.1kWh (5 000min <sup>-1</sup> )
Power Capacity	
AxAMB	AMB (1 DOF) PM biased AxAMB
Control method:	Nonlinear control
RaAMB	AMB (4 DOF)
Control method:	Linear control
Electromagnets:	Hetero-polar
Rotor lamination:	Silicon steel plate
Touch Down Bearings	Emergency support for
Upper Side:	Radial direction
Lower Side:	Radial direction and axial direction
AMB Controller	80 ~ 150DCV
Power supply for magnets:	40A (total)
Max. current for AMB:	8A (max) for each electromagnets
Amplifier :	PWM

#### 4. 基本要素試験とその結果

基本設計の各要素の性能を把握するために3種類の試験機を設計製作し基本要素試験を実施した。

1台目は、CFRPのフライホイールを使用し、玉軸受で支持するタイプのComFESS BBである。本装置は、モータ、フライホイールや真空容器の要素試験に使用した。

2台目は、ベークライトのフライホイールを使用し、磁気軸受で支持するタイプのDummy ComFESSである。これは、磁気軸受や回転体固有振動数の要素試験に使用した。

3台目は、ゼロパワー制御研究用フライホイールAMBシステム(AMX095)である。

本要素試験終了後、これらの部品を用いてCFRPを使用した磁気軸受支持のComFESS(図3)が組み立てられるように設計した。

以下に各基本要素試験の結果を述べる。

#### 4.1 損失の測定

回転数24 000min<sup>-1</sup>時のComFESS BBの各損失を測定した結果を表3に示す。

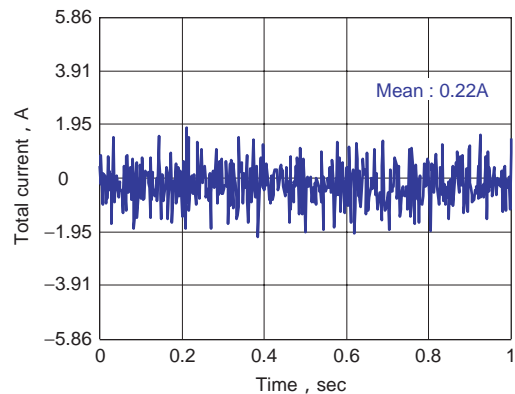
Motor / Generator controllerは、目標値70Wに対して20Wとなり大幅に損失が削減できた。これにより、ComFESS BBの全損失は、目標値の345Wに対して300Wとなり目標を達成した。

表3 ComFESS BB損失測定結果  
Measurement of ComFESS BB loss

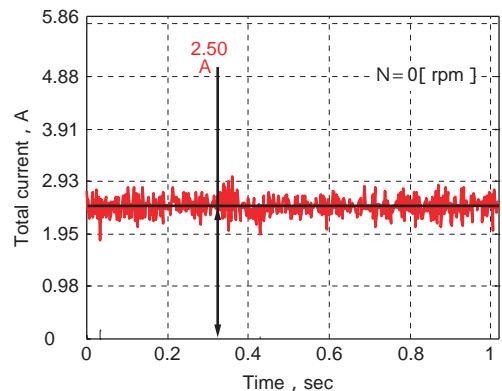
	Target	ComFESS BB
		Measurement
Motor / Generator (W)	25	30
Motor / Generator controller (W)	70	20
Motor / Generator total Loss (W) A	95	50
Ball Bearing (W)	200	200
Windage loss (W)	50	50
Rotational loss (W) B	250	250
Total loss (W) A+B	345	300

#### 4.2 アクシアル磁気軸受のPMバイアス化試験

ComFESSの回転体の安定浮上を達成出来たが、その時の制御電流波形の測定結果を図4に示す。



(a) PMバイアスあり



(b) PMバイアスなし

図4 PMバイアスアキシアル磁気軸受制御電流波形  
Measured results of PM biased AxAMB

PMバイアスAxAMBに供給される全電流はノイズの影響を大きく受けたが、その平均値は約0.22 Aで従来型AxAMBの場合の約2.50 Aと比較してPMバイアス化による消費電力の低減効果を確認した。

### 4.3 ラジアル磁気軸受のゼロパワー制御要素試験<sup>7)</sup>

#### 1) フライホイールAMBシステム(AMX095)

モデリングシミュレーションと実験に使ったフライホイールAMBシステムを、図5に示す。フライホイールAMBシステムはCFRPフライホイールAMB、制御装置、および高周波インバータから構成される。本フライホイールAMBシステムのパラメータを表4に示す。

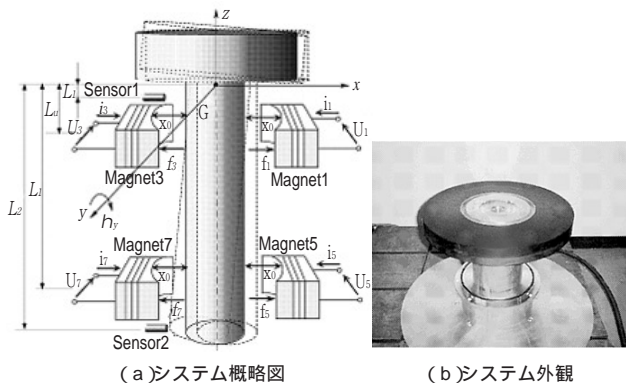


図5 フライホイールAMBシステム(AMX095)  
Flywheel-AMB system (AMX095)

表4 フライホイールAMBシステムの各定数

Parameters of rotor-AMB system

Symbol	Value	Unit
$M$	13.672	kg
$I_r$	0.173	kgm <sup>2</sup>
$I_a$	0.186	kgm <sup>2</sup>
$L_a$	0.0499	m
$L_t$	0.1676	m
$L_1$	0.02535	m
$K_u$	$4.47 \times 10^{-6}$	Nm <sup>2</sup> /A <sup>2</sup>
$K_r$	$4.47 \times 10^{-6}$	Nm <sup>2</sup> /A <sup>2</sup>
$X_0, Y_0$	$0.25 \times 10^{-3}$	m

#### 2) 試験結果

本試験のために、デジタル信号プロセッサ(DSP)でフィードバック制御システムを構築した。本制御システムは、4個の位置センサで測定される4方向の変位を入力し、8個の電磁石のために計算された制御電流を出力とする4入力8出力構造である。制御出力は、D/Aコンバータとパワーアンプを介して電磁石に供給される。

制御性能は、ロータのオービット波形により評価した。6 600min<sup>-1</sup>回転時に得られた上下磁気軸受のロータの波形を図6に示す。回転試験時における下部の対向する電磁石の制御電流を図7に示す。本結果より、ロータの変位に伴ない、対向する2つの電磁石のうち片側だけに電流が流れていることがわかる<sup>4)</sup>。これにより、基本動作を確認することができた。

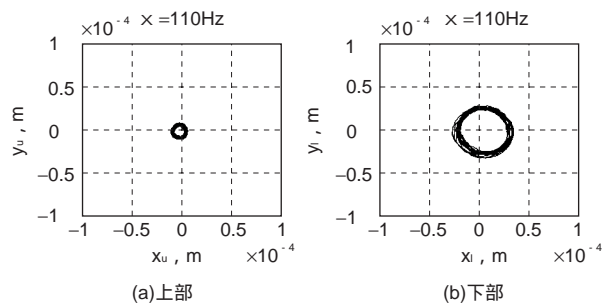


図6 ロータの軌跡(6 600min<sup>-1</sup>)  
Orbits of rotor (6 600min<sup>-1</sup>)

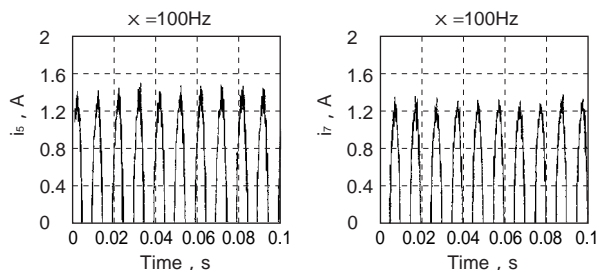


図7 電磁石の制御電流(6 600min<sup>-1</sup>)  
Control current (6 600min<sup>-1</sup>)

ただし、回転体のアンバランスにより、電流値はまだ大きい。これは、回転同期成分を制御せずに回転体を慣性中心で回すアンバランス力補償制御(UFRC)を追加適用することで、電流値を下げることは可能である。

線形制御で使用される従来の磁気軸受機構部を用いて、ゼロパワー非線形制御実験に成功した。表5に示すように、従来の磁気軸受の60%まで、エネルギー消費を抑制した制御技術は、従来達成できなかったより高効率エネルギー貯蔵フライホイールシステムの実現を可能とする。本技術は、大きなジャイロ作用と弾性ロータのシステムにも適用できることが確認できた。高速回転では、さらなる性能向上が期待できるので、ほぼ完全なゼロパワー制御を実現できると考えられる。

表5 回転速度と消費電力

Rotational speed vs power consumption

	Rotational speed (min <sup>-1</sup> )			
	0	600	1 200	1 800
Zero-bias method (W)	64.8	64.4	64.4	70.9
Bias, method (W)	112.2	111.7	112.1	112.1
Energy reduction (%)	48	47	48	41

### 5. 300W × 3時間システム ( ComFESS )の実現可能性

本システムを実現するための現状の技術レベルと課題を以下に述べる。

本研究の基本要素試験の結果をComFESSに反映して回転減衰を計算した結果を図8に示す。従来技術での回転損失計算結果( +印)にヒステリシスモータを反映した結果を ▲印で示し、さらにPMバイアスAMBの効果を加えた結果を ■印で示す。同様に現在までの要素開発レベルでのゼロバイアス制御適用を加えた結果は、□印であり、まだ目標を達成できていないことがわかる。しかしながら、今後アンバランス力補償制御(UFRC)を含むゼロパワー制御( ×印)を適用することにより目標値( ×印)を達成できると考えている。

今後UFRCの開発を推進し本結果をComFESSに適用していきたい。

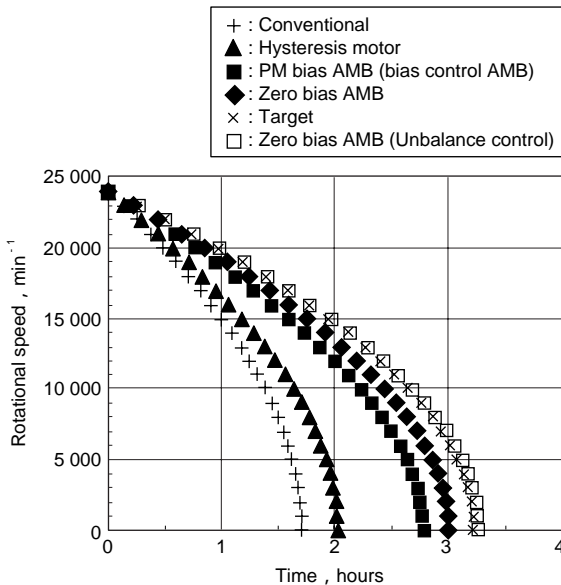


図8 回転減衰特性

Rotational decay of rotor

### 6. おわりに

本研究の結果、下記の要素技術を確立できた。

- 1) ヒステリシスモータの最適ドライブによる低損失化
- 2) 永久磁石の吸引力を利用した回転体自重支持によるアキシアル磁気軸受の消費電力削減
- 3) ゼロパワー非線形制御によるラジアル磁気軸受の消費電力削減

一方、実用化に向けての課題として下記事項を明確化することができた。

- 4) ゼロパワー非線形制御をComFESSに適用するためには、アンバランス力補償制御が必要で、これによりさらなる消費電力低減が可能。

本研究で得られた成果をもとに今後実用化開発へ移行し、製品化のための開発を推進する。一方、産業界から数百キロワットで1分間程度のバックアップが可能なシステムの開発ニーズも出てきている。本要素技術をさらに発展させ、大出力、短時間用のバックアップシステムにも応用展開する予定である。

本研究は、NEDO国際共同研究プログラム(NEDO-Grant Project)として2001年度に採択され、NEDO New Energy and Industrial Technology Development Organization in Japan)の助成を受けて3年間実施したものである。

### 謝辞

本誌掲載にあたり、共同研究者の千葉大学の野波教授およびCentrum voor Constructie en Mechatronica(CCM:オランダ)のソーレン博士をはじめ、ご支援いただきましたアイントホーフエン工科大学(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致します。

## 参考文献

- 1 ) 高畑良一：トライボロジスト，vol. 49，no. 5 (2004) 416 .
- 2 ) 亀野浩徳，久保 厚，S. Gachter，高畑良一：Koyo Engineering Journal no. 163 (2003) 43 .
- 3 ) Y. Miyagawa et al, A 0.5 kWh Flywheel Energy Storage System using A High-Tc Superconducting Magnetic Bearing, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 9, no. 2, pp. 996-999, 1999.
- 4 ) S. Sivrioglu, K. Nonami, R. Takahata and A. Kubo "Adaptive Output Backstepping Control of a Flywheel Zero-Power AMB System with Parameter Uncertainty", Proceeding of 42nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC), pp. 3942-3947, Hawaii-USA, 2003.
- 5 ) H. Kamenno et al, Basic Design of 1kWh Class Flywheel Energy Storage System, Proceedings of The Eighth International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB-8), pp 575-580, 2002.
- 6 ) A. Kubo et al, Dynamic Analysis and Levitation Test in 1kWh Class Flywheel Energy Storage System, Proceeding of 7<sup>th</sup> International Symposium on Magnetic Technology (ISMST-7), pp 144-149, 2003.
- 7 ) 高畑良一，久保 厚，F. Thoolen，野波健蔵：NEDO成果報告会資料 .

## 筆 者



久保 厚\*  
A. KUBO



亀野浩徳\*  
H. KAMENO



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