

# 短周期電力変動補償向けフライホイールの設計と実機評価

田中 賢太\* 伊東 淳一 松尾 宗哉 才記 由次 山田 昇 (長岡技術科学大学)

Design and Experimental Evaluation of the Flywheel System for Compensation of Power Fluctuation

Kenta Tanaka\*, Jun-ichi Itoh, Soya Matsuo, Yuji Saiki, Noboru Yamada (Nagaoka University of Technology)

This paper introduces the performance of a power leveling system with a 3.0-MJ, 3315-r/min flywheel energy storage. In terms of cost reduction, this system uses low cost ball bearings and general purpose induction motor. Therefore, such a system configurations occurs large loss during standby mode. In order to overcome this problem, low-loss design algorithm that focuses on the mechanical loss is applied to the design of the flywheel. As a result, the flywheel loss in the steady state consists of bearing loss of 28.3%, the copper loss of 22.5% for the induction motor. Moreover, charge and discharge efficiency is measured to evaluate the prototype flywheel system. From the analysis, it is confirmed that the charging efficiency is 75.4% and the discharge efficiency is 77.2%.

**キーワード** : フライホイール, 電力平準化, 低損失設計  
(Flywheel, Power leveling, Low-loss design)

## 1. はじめに

近年、太陽光や風力をはじめとする自然エネルギーを使ったクリーンな発電方式の導入が進んでいる。しかし、これらは日射量や風向、風速などの自然環境によって発電電力が大きく変動する欠点を併せ持っている。このような発電システムを電力系統と連携する場合、系統への周波数変動や電圧変動といった悪影響を与える可能性がある。そこで、太陽光や風力発電の電力変動を吸収し、系統電力への影響を抑制するエネルギー貯蔵装置の研究が盛んに行われている。現在エネルギー貯蔵装置として、鉛バッテリー、電気二重層キャパシタ、フライホイールの三種類が有力であるとされている<sup>(1)</sup>。それぞれ異なる特徴を持っており、例えば鉛バッテリーは低コストで高いエネルギー密度を実現可能であるという特徴がある。しかし、周囲の温度変化によって寿命が劣化することや、化学反応によってエネルギーを貯蔵するため、内部抵抗が大きく短周期の充放電に対応できないという問題がある。電気二重層キャパシタは、充放電効率がが高く、内部抵抗が小さいため急速な充放電が可能である。しかし、バッテリーと同様に、周囲の温度変化によって寿命が劣化する欠点を持つ。一方、フライホイールは消耗部品がモータとフライホイールを支持する軸受のみであるため寿命が長く、エネルギーを貯蔵する回転体自体に寿命はない。また、バッテリーと比べて短い期間で

の充放電に強いという特長がある。そこで、著者らは太陽光、風力発電の短周期電力変動補償にフライホイールを適用することを検討している。

近年のフライホイールの研究動向として、フライホイールを数万 r/min の回転速度で駆動する研究が盛んに行われている。これは、フライホイールに貯蔵される運動エネルギーが回転速度の二乗に比例し、回転速度を高めるほどエネルギー密度が向上するためである。しかしながら、通常のボールベアリングでは数万 r/min の回転速度に対応できないため、機械的な接触なしで回転軸を保持する磁気浮上を用いた軸受が採用されている<sup>(2)-(4)</sup>。これは、本来モータと回転体を組み合わせただけの簡単な構造であるフライホイールの高コスト化、システム構成の複雑化を招くおそれがあり、実用化の妨げになっている。

そこで、磁気軸受を使用しないフライホイールシステムの実現が求められている。著者らは、軸受にボールベアリングを採用し、汎用インバータと誘導機により構成したフライホイールシステムを試作し、評価を行ってきた<sup>(5)(6)</sup>。試作システムの損失解析結果より、フライホイールで発生する損失のうち 30%程度が機械的な損失であることが明らかとなった。この結果より、フライホイールの実用化に向けてさらなる損失低減とフライホイールの低損失設計方法の確立が必要である。

本論文では、同一のエネルギーを蓄えるときにフライホ

イール回転数および形状に設計自由度があることに着目した損失を低減する設計法を確立し、それを実験により検証する。ここでは、風損とベアリング損からなる機械損失を数値解析および理論計算から算出し、設定した貯蔵エネルギーや安全性を満たしつつ機械損失が最小となるフライホイールの寸法を設計する。さらに、実機実験より損失解析を行いフライホイールの低損失設計の妥当性を検証する。また、エネルギー貯蔵装置の特性として重要である充放電効率を実験的に解析し、試作システムの有用性を検証する。

## 2. 試作フライホイールシステムの特徴

図 1 に試作システムの外観図を示す。本システムは、3315r/min で 3.0MJ の運動エネルギーを貯蔵できるフライホイール形状となっている。この回転数領域でシステムを設計することにより、汎用誘導機と汎用インバータを採用することができ、低コストかつ高い生産性を実現できる。また、試作システムではフライホイール格納容器とモータを磁性流体シールにより分離している。これにより、フライホイール格納容器内を真空ポンプで減圧することが可能となり、高速回転時の風損を大幅に低減できる。また、モータと格納容器が分離されているため、格納容器内の真空引きがモータの放熱に影響しない。したがって、モータに特別な冷却機構を追加することなく、汎用モータをそのままフライホイールの駆動に適用可能である。

図 2 に補機類を含めた試作フライホイールシステムの構成を示す。フライホイール加速時は誘導機がモータとして動作し、電気エネルギーが運動エネルギーとして貯蔵される。一方、減速時は誘導機が発電機として動作し、運動エネルギーが電気エネルギーとして放出されるため、市販の回生コンバータを用いて系統に電力を回生している。また、システムの評価のため、インバータ、誘導機、真空ポンプおよびオイルクーラにはパワーメータを取り付け、冷却系等には流量計および熱電対を、軸受とフライホイール格納容器内には熱電対のみを取り付けている。

## 3. フライホイール形状の低損失設計

### (3.1) 基礎モデルの検討

図 3 にフライホイール形状の低損失設計アルゴリズムの示す。フライホイールの低損失設計にあたり、フライホイールの回転方向、軸受の種類などを決定し、基礎的なモデルを設定する必要がある。フライホイールの回転方向としては縦型(垂直軸)と横型(水平軸)が考えられる。縦型の場合、フライホイールの荷重は軸方向に負荷されるため、軸は基本的に水平方向にはたわまず、フライホイールの振れ回りを無視した設計が可能となる。また、縦型では、軸のたわみによる振れ回りによる破損の可能性は横型に比べて低く、たわみを無視した設計ができるため設計項目の削減につながる。本研究では、低損失化と安全性の確保を優先項目としてフライホイールの設計を行うため、回転方向は縦型を選択する。また、回転軸を支える軸受はフライホイールの荷重によるアキシアル方向荷重と回転によるラジアル方向荷重を同時に支える必要が有るため、アンギュラ玉

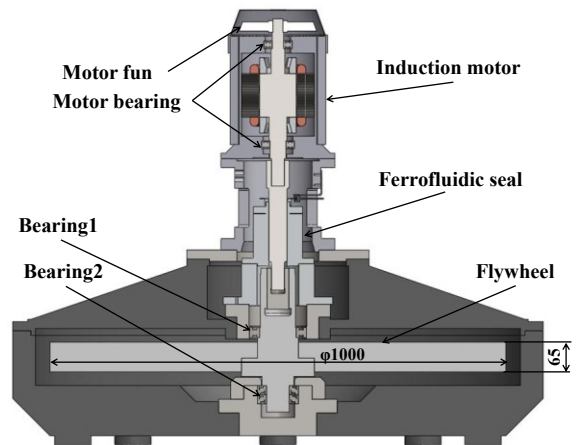


Fig. 1. Configuration of a prototype flywheel system that employs the general purpose motor and ball bearings.

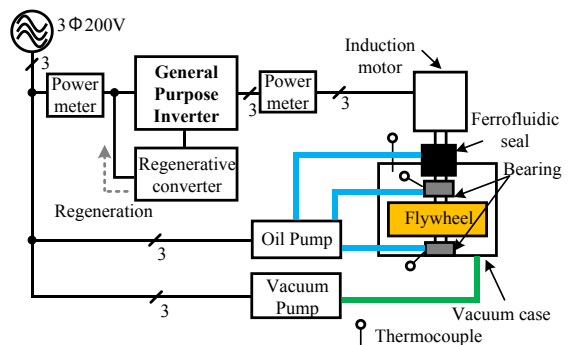


Fig. 2. Block diagram of the flywheel system including the measurement system and the auxiliary device.

軸受を採用する。

### (3.2) 要求値の入力

本行程では、検討した基礎モデルを低損失設計するための要求仕様を設定する。設計事項は、安全性、低損失仕様の探索、長寿命化である。選択できる設計パラメータで考えられるフライホイール形状は膨大な組み合わせとなるため、コンピュータによる自動設計を行う。試作システムの設計では、要求仕様としてフライホイールの最大半径 0.5m, 最大幅 0.5m, 最高回転速度 10000r/min, 安全率 8, 要求寿命を 10 年とする。フライホイール寸法の最大値は、一般的な工作機械やスピンドル製作会社の生産現場で加工可能な大きさを想定している。

### (3.3) 仕様探索

本行程では、設定した要求値に対して評価項目が低損失となるフライホイールの仕様を仮決定する。例えば、風損はフライホイール半径と格納容器内壁の半径比が影響するため、半径比を 0.70~0.95 の範囲で 0.01 ずつ変化させ、最小の風損を得るための半径比を探索する。また、フライホイール半径、幅、回転速度、軸径などのパラメータもそれぞれ取り得る最小値から最大値まで変化させ、様々なフライホイール形状を仮決定する。

### 〈3・4〉性能評価

本行程では仮決定した仕様において、風損および軸受損失算出する。ここで、風損および軸受損失は次章で説明する定常損失の解析手法によって算出している。さらに、本行程で算出した風損と軸受損失の合計を暫定値として記録し、別のフライホイール形状で算出した機械損失の合計値と比較することにより、機械損失が最小となるフライホイール形状を更新していく。以上の行程を繰り返し、入力された条件におけるすべての組み合わせの中から、安全性、要求寿命を満たしながら機械損失が最小となるフライホイール形状を決定し、設計を終了する。

表 1 に低損失設計アルゴリズムを基に算出した 3MJ 貯蔵フライホイールシステムの仕様を示す。計算結果より、フライホイールの形状は、半径が大きく幅が小さい円盤形状となった。これは慣性重量が大きくなったことで、フライホイールの運轉回転速度を低くすることができ、回転速度に依存する風損及び軸受損を低減することができるからである。軸受は、フライホイール上部に深溝玉軸受を 1 枚、下部にアンギュラ玉軸受を 2 枚配置した。フライホイール密閉容器内は、風損を低減する目的で、フライホイール運轉前に真空ポンプを使用して減圧する。また容器内の真空度を維持するために、磁性流体シールを採用する。

## 4. 定常損失の解析手法

本章では、フライホイール定常回転状態で発生する損失を機械損失と電気的損失にわけて解析する。この解析より、システムで発生する損失の要因を明らかにし、さらなる高効率化に向けた検討を行う。

### 〈4・1〉風損の解析

製作したシステムにおけるフライホイール表面とその周囲にある気体との摩擦損失、すなわち風損  $P_w$  は、摩擦モーメントとフライホイールの形状より(1)式で算出できる。

$$P_w = C_{ms}\rho\omega^3(r_o^5 - r_i^5) + C_{mc}\rho\omega^3r_o^2r_i^2t_i \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $C_{ms}$  は上面・底面の摩擦モーメント係数、 $C_{mc}$  は側面の摩擦モーメント係数、 $\omega$  は角加速度、 $\rho$  は流体密度、 $r_o$  は格納容器の半径、 $r_i$  はフライホイール半径、 $t_i$  はフライホイールの回転軸方向の厚みである。しかし、(1)式で用いる摩擦モーメントは、フライホイールと格納容器内の流体の状態によって変化するため、単純な数式で求めることが困難である。そこで、本研究では数値流体力学 (CFD) を利用して正確な風損の解析を行う。解析に用いたのは非構造格子系熱流体解析システム SCRYU/Tetra (ソフトウェアアクレイドル製) である。実際のシステムを忠実に再現したモデルでは解析の複雑化、計算時間の増大などがあるため、解析と無関係な部品や機構を省き、単純化したものとした。解析条件として、流体の流れは乱流とし、乱流モデルとして SST k- $\omega$  モデルによる計算を行った。SST k- $\omega$  とは、k- $\omega$  モデルをベースに k- $\epsilon$  モデルを融合したモデルであり、壁面近傍では剥離流れの予測精度が優れている k- $\omega$  モデル、壁面から離れた領域では k- $\epsilon$  モデルを用い、さらに乱流せん断力の輸送効果も考慮することができる。初期条件として、

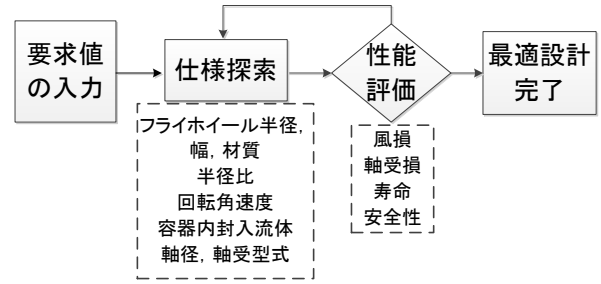


Fig. 3. Low-loss design algorithm of the flywheel with a focus on mechanical loss.

Table 1. Specifications of the flywheel which is calculated from the optimum design.

Flywheel	Material	SCM440
	Radius	500 mm
	Thickness	65 mm
	Stored Energy	3.0 MJ at 3315 r/min
Motor/Generator	MLC1115C	
Inverter	FRENIC 37G11S-2HF	

流体の圧力には、実験時は真空ポンプを用いてフライホイール密閉容器内を減圧しているので 500Pa、温度には 10°C を与えた。また、境界条件としては外側の流体表面には静止壁を、フライホイール表面は流体メッシュ速度と壁面速度を一致させるようにした。フライホイールの回転に関しては、フライホイールそのものではなく流体をフライホイールの軸まわりに回転させ、相対的にフライホイールを回転させた。回転速度は 3315r/min とし、定常状態となるまで解析を行った。

図 4 にフライホイール周囲の圧力の解析結果を示す。ここで、解析条件は 3315r/min、フライホイール格納容器内の真空度を 500Pa とする。なお、圧力は色が青に近づくほど低く、赤に近づくほど高い。解析結果より、フライホイール中心部から半径方向に向かって圧力が増加することがわかる。これは、周速の増加に伴って流体との摩擦による損失が増加するためである。

### 〈4・2〉軸受損失の解析

軸受損  $P_B$  は、ベアリングの摩擦モーメント  $M$  および回転速度  $n$  から(2)式によって得られる。

$$P_B = 1.047 \times 10^{-4} nM \dots\dots\dots (2)$$

また、摩擦モーメントは荷重に無関係な摩擦モーメント  $M_o$  と、荷重に依存する摩擦モーメント  $M_l$  に分離可能で、それぞれ次のように表される。

$$M = M_o + M_l \dots\dots\dots (3)$$

$$M_o = f_o \times 10^{-7} (\nu n)^{2/3} d_m^3 \dots\dots\dots (4)$$

$$M_l = f_l P d_m \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $f_o$  は軸受の形式と潤滑方式に依存する係数、 $\nu$  は潤滑油の粘度、 $d_m$  は転動体のピッチ内径、 $f_l$  は荷重の大きさおよび、方向に依存する係数、 $P$  は軸受にかかる荷重である。

表 2 に各軸受の損失計算に用いた値を示す。本システムでは、フライホイール上部に軸受を 1 個、下部には 2 個配置している。これらのパラメータを(4)式、(5)式に代入することで各回転速度における軸受損を計算する。

#### (4.3) 基本波に対する銅損の解析

試作機ではフライホイールの駆動に誘導機を採用している。本章では、モータで発生する損失を銅損と鉄損に分離する。

図 5 に誘導機の基本波に対する等価回路、表 3 に使用した誘導機の仕様を示す。これより、二次入力  $P_2$  と機械出力  $P_{mec}$  の関係を(6)式に示す。

$$P_2 : P_{mec} = 1 : (1-s) \dots\dots\dots (6)$$

この関係式より、二次抵抗  $R_2'$  は(7)式で算出できる。

$$R_2' = \frac{s}{1-s} \frac{1}{3} I_2'^2 \dots\dots\dots (7)$$

ここで、すべり  $s$  は実測した回転数と同期回転数から算出した値である。また、二次電流  $I_2'$  はモータ単体の無負荷試験から算出する。モータの出力軸に負荷を取り付けずにモータを回転させた場合、すべり  $s$  が非常に大きくなるため、出力抵抗  $R_2'/s$  はほぼ 0 とみなせる。したがって、このとき回路に流れる電流はすべて励磁電流  $I_0$  となるため、二次電流  $I_2'$  は一次側電流を  $I_1$  とすると、(8)式で導出することができる。

$$I_2 = I_1 - I_0 \dots\dots\dots (8)$$

これらの結果より、基本波に対する銅損  $P_c$  は(9)式で表される。

$$P_c = 3R_1 I_1^2 + 3R_2' I_2'^2 \dots\dots\dots (9)$$

#### (4.4) 高調波に対する銅損の解析

インバータを用いて誘導機を PWM 駆動する場合、高調波電圧が誘導機に印加される。その結果、高調波成分による損失が発生する<sup>(8)</sup>。ここでは、モータ電流の高調波成分により発生する銅損を算出する。

図 6 にモータ電流の高調波解析結果を示す。解析結果は基本波の電流振幅によって基準化している。高調波解析結果より、モータを PWM 駆動することによりキャリア周波数に起因する高調波成分が発生することがわかる。前項で求めた基本波に対する銅損の解析では高調波成分に対する銅損が考慮されない。そこで、本項では高調波成分に対する誘導機の等価回路を用いて銅損を算出し、より詳細な損失解析を行う。

図 7 に高調波成分に対する誘導機の一相分の等価回路を示す。PWM 駆動によって発生する高調波成分は、基本波成分と比較して十分に高い周波数領域であるため、基本波に対する等価回路における励磁インダクタンスを無視することができる。また、高調波成分に対するすべり  $s$  は 1 と見なせるため、機械出力を示す要素である  $R_2'(1-s)/s$  を無視することができる。これより、高調波成分に対する損失は(10)式によって求められる。

$$P_n = 3(R_1 + R_2') I_n^2 \dots\dots\dots (10)$$

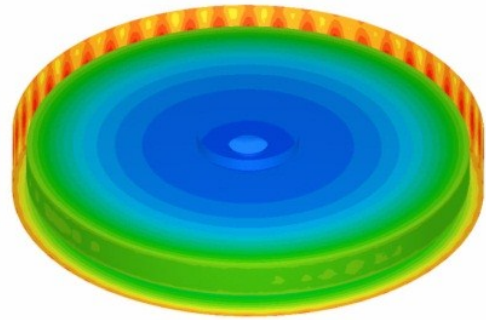


Fig. 4. Visualization of the ambient pressure of the flywheel at the rated energy storage.

Table 2. Condition for bearing loss calculation.

Bearing1	$f_0$	2
	$f_l$	0.0002
	Viscosity $\nu$	17 mm <sup>2</sup> /s
	Pitch diameter $d_m$	102.5 mm
	Rotation speed $n$	3315 r/min
	Load $P$	0 N
Bearing2	$f_0$	2
	$f_l$	0.00025
	Viscosity $\nu$	17 mm <sup>2</sup> /s
	Pitch diameter $d_m$	70 mm
	Rotation speed $n$	3315 r/min
	Load $P$	2528.4 N

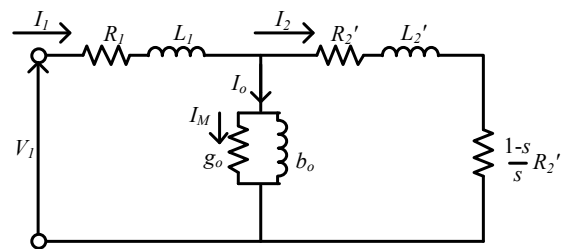


Fig. 5. Equivalent circuit of the induction machine with respect to the fundamental wave.

Table 3. Specifications of the motor that is used in the prototype system.

Rated Voltage	200V
Rated Current	14.4A
Output Power	3.7kW
Primary resistance $R_1$	1.01Ω
Excitation current $I_0$	5.90A

#### (4.5) 鉄損の解析

図 5 に示す誘導機の等価回路より、モータで発生する鉄損  $P_i$  は励磁コンダクタンス  $g_0$  を用いると(11)式で表現できる。

$$P_i = 3 \frac{I_M^2}{g_o} \dots\dots\dots (11)$$

また、励磁コンダクタンス  $g_o$  は(12)式で表される。ここで、 $P_o$  は無負荷時の入力電力、 $W_m$  は無負荷時の機械損失である。

$$g_o = \frac{P_o - W_m}{V_1^2} \dots\dots\dots (12)$$

## 5. 実験結果

### 〈5.1〉 定常損失の解析

図 8 に定常損失の解析結果を示す。ここで、実験条件は 3315r/min、3.0MJ、フライホイール格納容器内の真空度は 500Pa とする。解析は、はじめにフリーラン試験の結果より機械損失と電氣的損失を分離する。フリーラン試験はフライホイールに 3.0MJ 貯蔵された状態でインバータとモータを電氣的に切り離し、機械的損失のみで貯蔵エネルギーを消費させる試験である。これより、全貯蔵エネルギーが消費されるまでの時間から機械損失を算出する。解析結果より、機械損失の 48.6% を軸受損失が占めている。また、モータの電氣的損失が全損失の 41.7% を占めている。これより、さらなる高効率化に向けて、軸受損失の低減とモータ効率の改善が必要であることがわかる。

図 9 に機械損失の実測値と解析結果の比較を示す。図内の  $P_m$  は各種機械損の合計値、 $P_f$  は磁性流体シールの損失、 $P_{em}$  はモータの機械損(ファンによる風損+軸受損)を示している。また、 $P_f$  と  $P_{em}$  はフライホイールと回転軸を切り離れた状態でのフリーラン試験と磁性流体シールを切り離れた状態でのフリーラン試験より算出した。図 9 より実験値と解析値がよく一致していることが確認でき、解析結果に十分な精度があることがわかる。また、鉄損の解析結果は 167W となり、全電氣損失から銅損を差し引いた値である 192W に対して 13% の差異が発生している。これは、鉄損を誘導機の簡易等価回路を用いて算出したことが原因であり、銅損の解析値は妥当であると考えられる。

### 〈5.2〉 エネルギー貯蔵装置の解析

エネルギー貯蔵装置の重要な特性として、エネルギー充放電効率が挙げられる。これは、所望のエネルギーを貯蔵するために消費したエネルギーの比である充電効率  $\eta_m$  と、貯蔵したエネルギーに対する放出できたエネルギーの比である放電効率  $\eta_{out}$  によって評価される。

図 10 にエネルギー貯蔵時の電力を、図 11 にエネルギー放出時の電力を示す。実験条件は、エネルギー貯蔵時 2700r/min から 3315r/min までフライホイールを加速し、エネルギー放出時 3315r/min から 2700r/min まで減速することとした。ここで、充放電時のエネルギー  $E$  は回転角速度  $\omega$  とフライホイールの慣性モーメント  $J$  より(13)式より算出している。

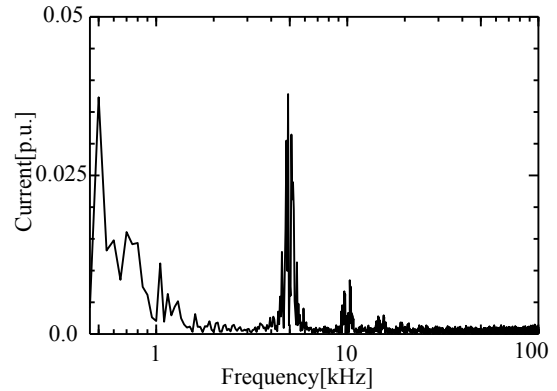


Fig. 6. Analysis of harmonic current at the rated energy storage.

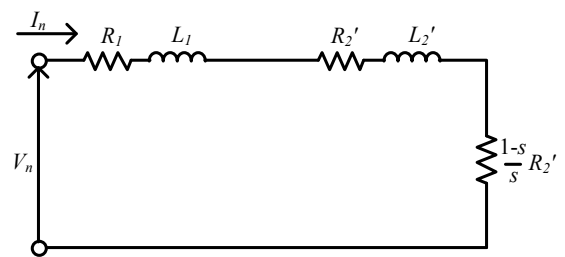


Fig. 7. Equivalent circuit of the induction machine for harmonic wave.

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \dots\dots\dots (13)$$

エネルギー変化量を(13)式より求めると、3315r/min から 2700r/min までフライホイールの速度が変化する場合のエネルギー変化は 1.01MJ となる。次に、実験結果を用いてエネルギー貯蔵効率の算出を行う。図 10 より、1.01MJ のエネルギーをフライホイールに貯蔵するために入力した電力 1.34MJ であり、充電効率は 75.4% となった。また、図 11 より放電効率を求めると、1.01MJ のエネルギー変化に対して放出できたエネルギーが 0.78MJ となり、放電効率は 77.2% となった。フライホイール以外のエネルギー貯蔵装置の効率は、鉛蓄電池が 75~85%、レドックスフロー電池が 70% 程度<sup>(9)</sup>、電氣二重層キャパシタが 90% 程度<sup>(10)</sup> であると言われている。これより、試作フライホイールシステムのエネルギー貯蔵効率は従来の電力貯蔵装置と同程度となることがわかった。しかしながら、近年需要が増加している電氣二重層キャパシタと比較すると効率が悪く、フライホイールの導入拡大に向けてさらなる高効率化が課題である。例えば、ベアリング損失を低減するためにピボット軸受<sup>(11)</sup>の採用が挙げられる。ピボット軸受は、円錐形で先端に丸みをつけた軸端を、同様の形の凹面で受ける軸受である。これは、磁気軸受と異なり、追加の制御システムが不要であるため、システムの大型や制御の複雑化は招かない。また、モータ損失の低減を実現するためには、二次銅損の発生しない永久磁石モータの採用が有力である。

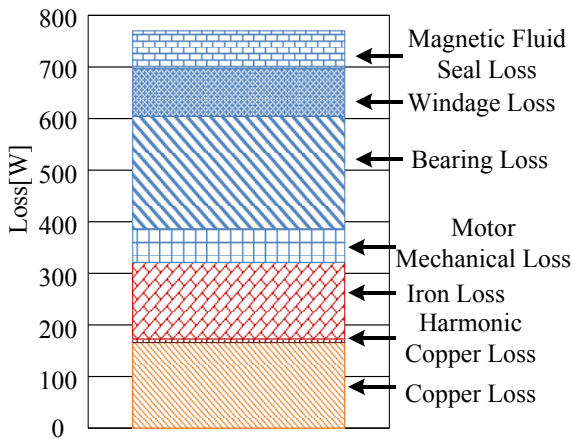


Fig. 8. Loss analysis results at the rated energy storage.

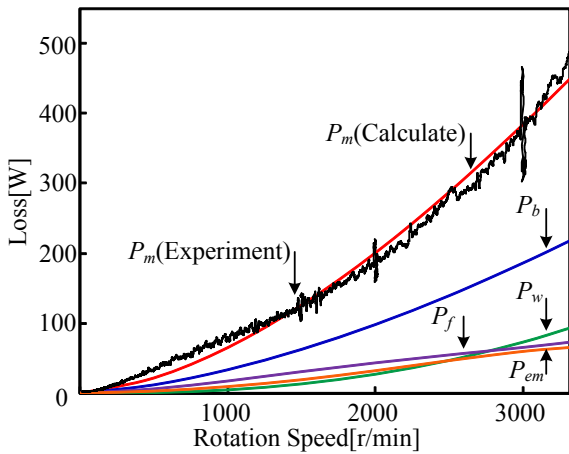


Fig. 9. Comparison of theoretical calculations and experimental results of mechanical loss.

## 6. 結論

本論文では、短周期電力変動補償向けのフライホイールシステムを試作し特性を評価した。試作システムは、軸受にボールベアリングを採用し、汎用誘導機によりフライホイールを駆動することでシステムの単純化を実現する。さらに、機械損失に着目した低損失設計により、フライホイール形状を決定し、機械損失の低減を試みた。定常損失の解析結果より、試作システムで発生する機械損失のうち、軸受で発生する損失が48.6%を占めており、モータ損失は全体の損失の41.7%を占めていることがわかった。さらに、エネルギー貯蔵効率を算出した結果、充電効率は75.4%、放電効率は77.2%となり、現在実用化されている鉛バッテリーやレドックスフロー電池と同程度の効率であることがわかった。今後はさらなる高効率化に向けて、ピボット軸受や永久磁石モータの適用およびその低損失設計を検討していく。

## 文 献

[1] 黒崎晏夫他, "環境と省エネルギーのためのエネルギー新技術大全", エヌ・ティー・エス(2003)

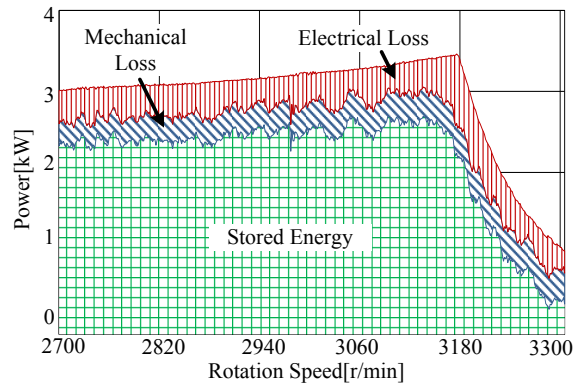


Fig. 10. Analysis of the efficiency of energy storage when the rotation speed of flywheel is increased from 2700r/min to 3315r/min.

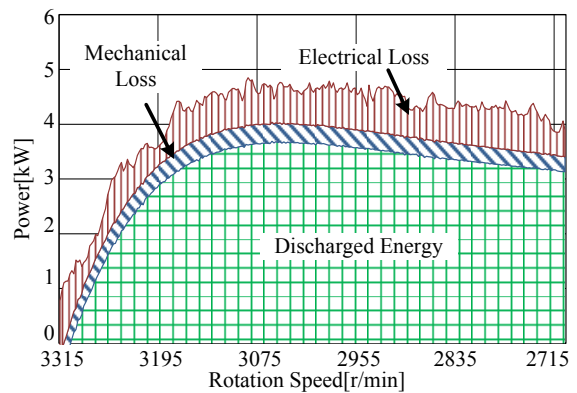


Fig. 11. Analysis of the efficiency of energy discharge when the rotation speed of flywheel is decreased from 3315r/min to 2700r/min.

- [2] B.H.Kenny, P.E.Kascak, R.Jansen, T.Dever, W.Santiago, "Control of a high-speed flywheel system for energy storage in space applications", IEEE Trans on Industry Applications, Vol. 41, No. 4, pp. 1029-1038(2005)
- [3] Z.Kohari, Z.Nadudvari, L.Szlama, M.Keresztesi, I.Csaki, "Test Results of a Compact Disk-Type Motor/Generator Unit With Superconducting Bearings for Flywheel Energy Storage Systems With Ultra-Low Idling Losses", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 21, No. 3, pp. 1497-1501(2011)
- [4] K.Murakami, M.Komori, H.Mitsuda, "Flywheel Energy Storage System Using SMB and PMB", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, pp. 2146-2149(2007)
- [5] 田中賢太, 大沼喜也, 藤森崇起, 伊東淳一, 山田昇: 「エネルギーキャッシュ向けフライホイールの損失分離」, SPC-11-006, MD-11-032(2011)
- [6] 田中賢太, 伊東淳一, 松尾宗哉, 山田昇: 「スミス法による無駄時間補償を付加したフライホイール電力平準化装置の再生電力制御法」, 平成24年電気学会産業応用部門大会, 1-58 (2012)
- [7] 山田昇, 藤森崇起, 若嶋振一郎, "小型フライホイールエネルギー貯蔵システムの機械損失予測", 日本機械学会論文集B編78巻789号, pp.1095-1106 (2012)
- [8] 小倉工, 伊東淳一, "インバータの運転方式に応じた総損失の評価", SPC-09-184, LD-09-074(2009)
- [9] エネルギー総合工学研究所, "新エネルギーの展望 -二次電池-", 日新社(2008)
- [10] 小池卓志, 川島清貴, 内田利之, 堀洋一, "電気二重層キャパシタで駆動される電気自動車の可能性とその展望", 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会第10回例会(2007)
- [11] 石津成一, 内田榮市, 大森憲一郎, 嶋田隆一, 高橋勲, 田中一彦, 谷本光生, 地福順人, 八星文昭, "産業用エネルギー蓄積装置", 電気学会論文誌, Vol.109, No.10, pp.705-716(1989)