

固定速フライホイール電力貯蔵に関する研究

研究代表者 東京理科大学理工学部電気電子情報工学科 近藤潤次

1. はじめに

近年、太陽光発電や風力発電の導入が世界規模で急速に進んでいる。これらの発電方式は、発電時に地球温暖化の原因となる二酸化炭素や有害な放射性廃棄物を排出しないという環境保全の点でも、太陽光や風といった純国産のエネルギー源を使うというエネルギーセキュリティの点でも、優れた特徴を有しており、今後もそれらのシェアは拡大していくと考えられる。

しかし、これらの発電方式は、日射強度や風速の変動という気象の変化に伴い、発電出力が勝手に変動する特性を有するため、出力変動電源と呼ばれる。従来火力発電が、発電出力を調整できることを考えると、この出力変動は大きな欠点である。電力系統全体では、常に需要（消費）に応じて供給（発電）を調整することで、需給バランスを維持しなければならない。出力変動電源の割合が増えると、このバランス維持が困難になることが懸念されている。

この需給バランスを維持する一つの解決策として、電力貯蔵装置を用いる方法がある。すなわち、発電過多の時間帯に余剰な電力を用いてエネルギーを蓄え、発電不足の時間帯に蓄えておいたエネルギーを放出して発電することで、需給バランスの維持に寄与させる。電力系統において最も普及している電力貯蔵装置は揚水発電であるが、適地が限られていることや、大電力需要地から遠隔にあることなどから、今後の大幅な増設は容易ではない。これに対して近年、二次電池による電力貯蔵の導入が盛んに行われつつあるが、充放電サイクル寿命が短いことや高価であることといった問題が残されている。

これに対し、フライホイール電力貯蔵装置も開発されている。これは、慣性モーメント J の物体を角周波数 ω で回転させることで、運動エネルギー $E_{st} = J\omega^2/2$ を蓄積するものである。電力系統での実用例としては、沖縄本島に設置された ROTES (26.5 MVA) [1] や、波照間島に設置されたもの (30kW×30 秒×8 基) [2] がある。米国の ISO-NE (ISO New England) は 3MW/750kWh のフライホイール電力貯蔵設備を試験・評価している [3]。

これら従来のフライホイール電力貯蔵装置では、角周波数 ω を変化させることで蓄積エネルギー E_{st} を増減させ、充放電を行っている。電力を充放電するには、発電電動機の回転軸にフライホイールを取り付ける構造となるが、発電電動機を系統に直結すると、その回転速度は系統周波数により決まる一定値に固定される（誘導機の場合は滑りにより回転速度に若干の変動がある）。発電電動機の回転速度を効率よく制御するには、周波数変換器を使って系統に連系する必要がある。周波数変換器は制御性に優れるが、高価でかつ過電流耐量が低いという欠点がある。そこで本研究では、角周波数 ω は制御せ

ず、代わりに慣性モーメント J を変化させることで充放電を行う固定速フライホイール電力貯蔵を提案する。

フライホイールの慣性モーメント J を変化させることは、すでにいくつか提案され研究発表されている。文献[4]では、ディーゼル発電機のパルス負荷に対する回転速度の安定性向上のためのフライホイールとして、3種類の慣性モーメント可変フライホイールを設計している。うち2つはバネと遠心力のつり合いによりフライホイール内のおもりの径方向位置を変えて慣性モーメントを変えるものであり、残りの1つはモータにより位置を変えるものである。ただし後者では、モータ及びその制御装置をフライホイールと一緒に回転させなければならないという欠点がある。文献[5]では、中空の内部に液体である水を封入したフライホイールを提案しており、水の容器内分布が遠心力と重力のバランスに従い変化するような容器の形状にしている。角周波数 ω が変化すると遠心力が大きくなるため水の分布が外周側に偏り、慣性モーメント J が増加する。文献[6]では弾性材料を用いたフライホイールを提案し、角周波数 ω が高くなると遠心力が大きくなり径方向に延びることで慣性モーメント J が増加する。ただし以上の提案はすべて概念設計のみで実際に製作・実験を行ったものではない。また、ほとんどの提案（文献[4]の中の1つを除く）は角周波数 ω の変化に伴う遠心力の変化を利用して慣性モーメント J を受動的に変化させることで、角周波数 ω の変動を抑えようとするものである。

本研究は、電力貯蔵装置として慣性モーメント J を能動的に変化させることで充放電するという提案であり、かつ試作機を製作し実験によりその性能を評価した。

2. 装置の基本構成

図1に本提案のフライホイール電力貯蔵装置の構成を示す。赤色で示しているものについては、後述の実験の説明で用いるので、現時点では触れない。本装置は主に、発電電動機、慣性モーメント可変型フライホイール、慣性モーメント制御装置の3つから成る。

慣性モーメント可変型フライホイールは、遠心调速機と同様の構造となっており、複数個のおもりを有する。各おもりと回転軸は2本のアームにより機械的に結合されているが、回転軸回りに取り付けられた可動片の位置を上下に動かすことで、回転軸からおもりまでの半径 r を変えることができる。これにより、慣性モーメント J が変わる。

慣性モーメント制御装置は、上記の可動片を動かすものである。慣性モーメント可変型フライホイールを回転させると、おもりには径方向外向きの遠心力がはたらく。この力は、アームを介して可動片を上を持ち上げる力となる。回転状態で可動片を下に動かして半径 r を小さくして慣性モーメント J を小さくするには、この力に抗して下に引っ張る仕事 E_c が必要になる。本研究では、この機構にばねまたはウィンチを用いた。

発電電動機には同期機または誘導機のどちらを用いることも可能である。この発電電動機の電機子巻線の端子を、周波数変換器を介さず電力系統に直結する。常時は系統周波数及び発電電動機の極数（および誘導機なら滑り）で決まる回転速度で空転する。こ

れにより，回転部分（フライホイールおよび発電電動機の電機子）には運動エネルギー $E_{st} = J\omega^2/2$ が蓄えられる。厳密にはこの間，発電電動機は電動機として作用し，主にベアリングでの摩擦損および風損を補うのに必要な電力を消費し続ける。

次に，損失が無い理想状態を仮定して，放電時の動作を説明する。可動片を下に動かして慣性モーメント J を小さくすると，角運動量保存則に従い，フライホイールはそれまでの回転速度より速く回転しようとする。この時に，発電電動機は以下の作用により電気エネルギー E_m を出力する。

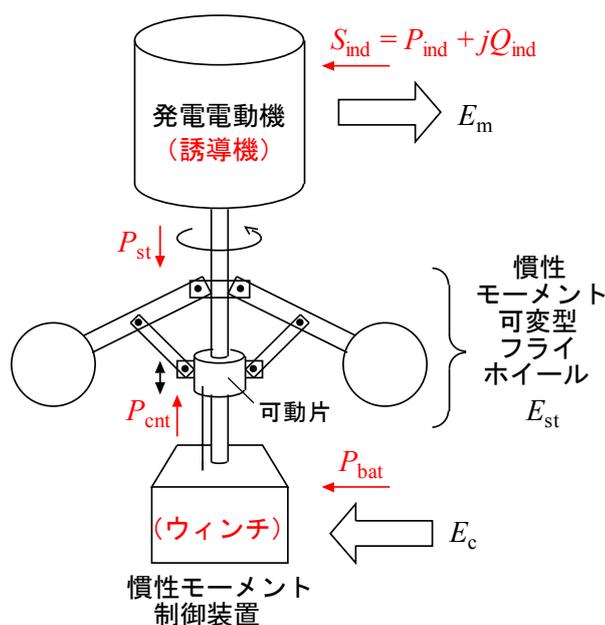


図 1. 固定速フライホイール電力貯蔵装置の構成

同期機の場合，発電電動機の回転子が同期速度よりも早く回転しようとするため，内部起電力の位相が系統電圧の位相よりも進み，発電機として作用する。この時，回転子は減速する方向の電磁力を受け，回転子の回転速度は同期速度を維持することになる。ただし，フライホイールが回転子を速く回そうとするトルクが，同期機の最大トルクを上回ると，同期機は脱調し発電できなくなり加速されることになる。

誘導機の場合，発電電動機の回転子が同期速度よりも早く回転しようとするため，滑りが負値となり発電機として作用する。この時，回転子は滑りの分だけ同期速度より早く回転する。ただし，フライホイールが回転子を速く回そうとするトルクが，誘導機の最大トルクを上回ると，発電出力は低下し滑りの絶対値はより大きくなる（回転子は加速される）。

充電時の動作は，放電時の逆である。すなわち，可動片を上を動かして慣性モーメント J を大きくすると，角運動量保存則に従い，フライホイールはそれまでの回転速度より遅く回転しようとする。この時に，発電電動機は電動機として作用し，電気エネルギー

— E_m を消費する。また、可動片を上を動かす際に、フライホイールは仕事— E_c を行う。
充放電に伴うフライホイールの蓄積運動エネルギーの増分は次式で表される。

$$\Delta E_{st} = E_c - E_m \quad (1)$$

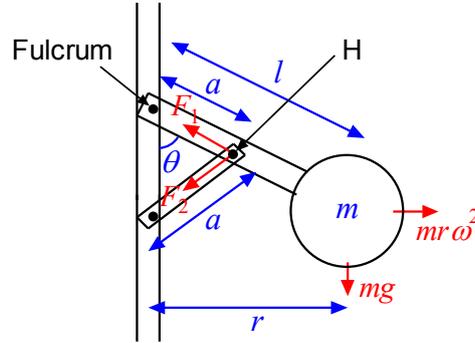


図 2. おもりとアームの寸法と力

3. エネルギー収支の理論式

図 2 は図 1 のうちの、おもり 1 つとそのアームおよび回転軸について、簡略化して示したものである。青色は寸法およびおもりの質量を表しており、赤色は力のベクトルを表している。まず、H 点での力のつり合いより、(2)式が導かれる。

$$F_1 + F_2 \cos \left\{ 2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \right\} = ml^2 \omega^2 \sin^2 \theta + mg \cos \theta \quad (2)$$

また、支点を中心としたモーメントのつり合いより、(3)式が導かれる。

$$aF_2 \sin \left\{ 2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \right\} + mgl \sin \theta = ml^2 \omega^2 \sin \theta \cos \theta \quad (3)$$

(3)式を変形して、以下の式が導かれる。

$$F_2 = \frac{ml^2 \omega^2}{2a} - \frac{mgl}{2a \cos \theta} \quad (4)$$

また、(4)式を(1)式に代入して、以下の式が導かれる。

$$F_1 = ml\omega^2 \left\{ \left(1 - \frac{l}{2a} \right) \sin^2 \theta + \frac{l}{2a} \cos^2 \theta \right\} + mg \left(\cos \theta - \frac{l \cos 2\theta}{2a \cos \theta} \right) \quad (5)$$

おもりの数を n とし、可動片を下げるのに必要な力を $F_z (= nF_2 \cos \theta)$ とする。また、可動部の軸方向位置を z_1 (このとき $\theta = \theta_1$) から z_2 (このとき $\theta = \theta_2$) に下げるのに必要な仕事 E_c は、(4)式を代入して(6)式となる。

$$E_c = \int_{z_1}^{z_2} F_z dz = -2a \int_{\theta_1}^{\theta_2} F_z \sin \theta d\theta = \frac{nm l^2 \omega^2}{2} (\sin^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_2) - nmgl (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \quad (6)$$

フライホイールの蓄積エネルギーは、運動エネルギーと位置エネルギーより(7)式となる。

$$E_{st} = \frac{nm l^2 \omega^2}{2} \sin^2 \theta + nmgl(1 - \cos \theta) \quad (7)$$

また、可動部を $z_1 (\theta = \theta_1)$ から $z_2 (\theta = \theta_2)$ に下げたときの蓄積エネルギーの増分 ΔE_{st} は、

$$\Delta E_{st} = \frac{nm l^2 \omega^2}{2} (\sin^2 \theta_2 - \sin^2 \theta_1) - nmgl(\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \quad (8)$$

(1),(6),(8)式より、電力系統に放出されるエネルギー E_m は(9)式で表される。

$$E_m = E_c - \Delta E_{st} = nm l^2 \omega^2 (\sin^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_2) \quad (9)$$

(6),(8),(9)式より、位置エネルギーの項を無視すれば、 $E_c : -\Delta E_{st} : E_m = 1 : 1 : 2$ の関係がある。すなわち、このフライホイールは電力貯蔵装置とはいえ、蓄積エネルギー放出分 $-\Delta E_{st}$ と同じ大きさのエネルギー E_c を慣性モーメント制御装置からフライホイールに与えることにより、それらの2倍の電気エネルギー E_m を出力する。実際には、発電電動機や慣性モーメント制御装置には損失があるし、可動片を動かすのにも摩擦損がある。これらの損失を十分に小さくしないと、放電時に正味のエネルギーが得られず $E_c < E_m$ となる可能性もある。

4. 固定速フライホイール電力貯蔵検証装置によるエネルギー収支の確認

まず、固定速フライホイール電力貯蔵検証装置を用いて、3章で導いたエネルギー収支が成立していることを確認する実験を行った。検証装置の外観を図3に、諸元を表1にそれぞれ示す。



(a) 装置全体(誘導機以外)

(b) 遠心调速機

図3. 検証装置外観

表1. 検証装置諸元

項目	記号	値
おもりの数	n	2
おもりの質量	m	52 (g)
アーム長	l	17 (cm)
同期回転速度	ω	10π (rad/s)
誘導機定格電力		25 (W)

図 3(a)に発電電動機は写っていないが、装置上部に 4 極の三相誘導機が減速比 5 の減速機を介して回転軸に接続されている。このため、回転軸の同期回転速度は 300 rpm である。タコメータにより計測したところ、空転時の回転速度は滑りにより 290 rpm 程度であった。遠心调速機は実験用教材として販売されているものである。慣性モーメント制御装置は、ばねを予め伸ばしておいて、金具を外すことでばねの復元力で可動片を下に引き下げる構造となっている。

図 4 に、慣性モーメント制御装置により可動片を引き下げ、電力系統へ電気エネルギーを放出した時の、誘導機の消費電力の変動を示す。図 4 は、誘導機の電圧および電流の測定結果から各時刻の消費電力値を算出したものである。

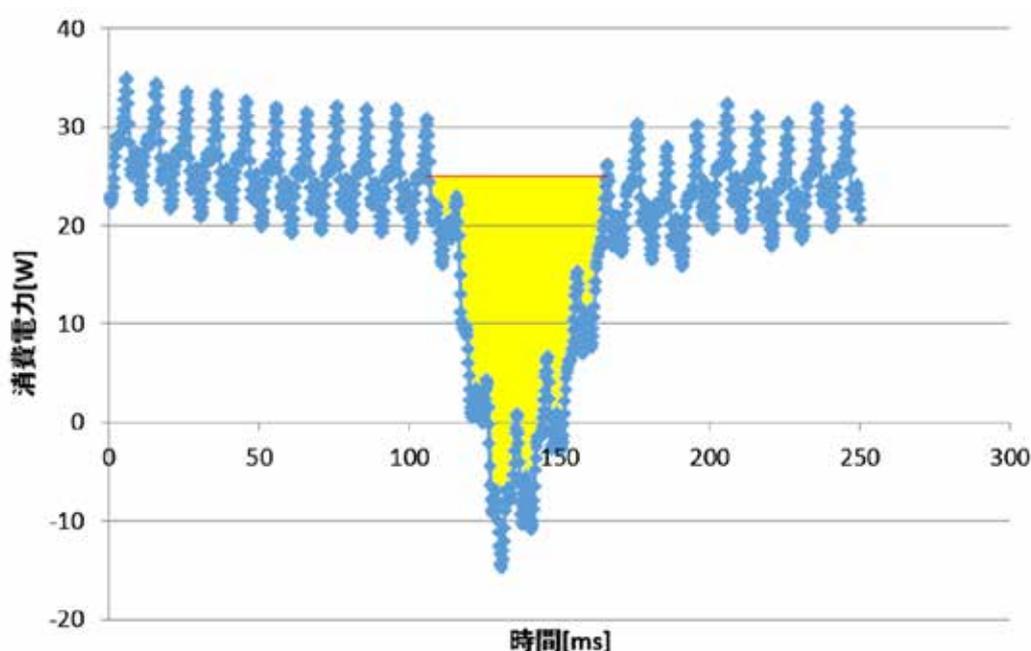


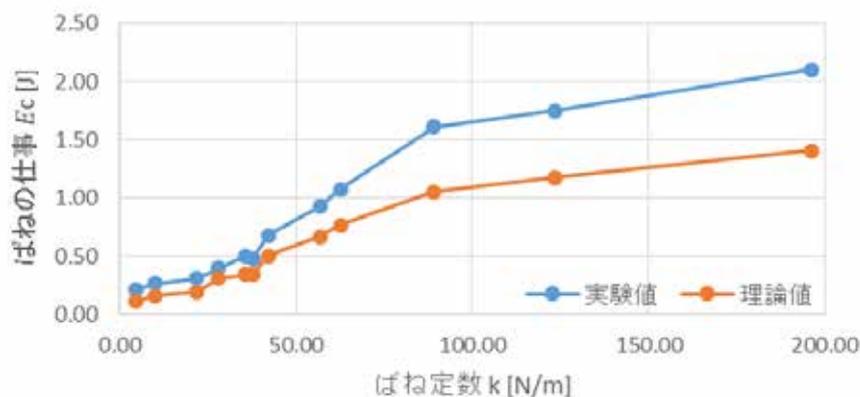
図 4. 固定速フライホイール電力貯蔵検証装置のエネルギー放出時の消費電力変化

図 4 より、まず可動片を動かしていない空転時に、本装置では 25W 程度の電力が消費されていることが分かる。これは、回転軸を支えるベアリングの摩擦損や空損を補うためと考えられる。また、110ms 頃から 170ms 頃までの時間に可動片を動かすことで、消費電力が減り、負値に至っている。消費電力が負値ということは、本装置から電力系統に向かって電力を送り出している、すなわち放電していることを意味する。ここで、上記の空転時の消費電力 25W は、装置の損失低減に注力すればもっと減らせる可能性があるもので、本研究の本質ではない。そこで、この損失分を無視した、図 4 の黄色の面積を、本実験での放出電気エネルギー E_m とする。

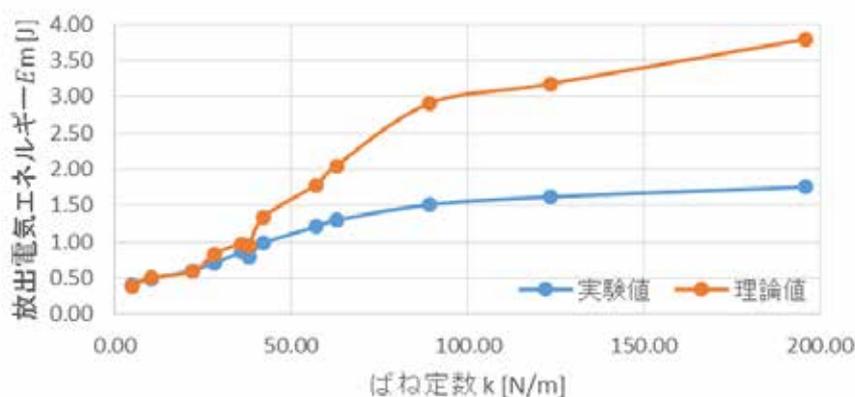
また、放電実験をばね定数 k および自由長さ x_0 が異なるばねを使って行った。軸方向位置が z_1 の時のばね長を x_1 、 z_2 の時のばね長を x_2 とすると、ばねが行った仕事 E_c は

$k\{(x_1 - x_0)^2 - (x_2 - x_0)^2\}/2$ となる。

以上より、 E_m と E_c はそれぞれ、(9)式や(6)式で導かれる理論値と上記の実験値を比較した。その結果を図5に示す。



(a) ばねが行った仕事 E_c



(b) 放出電気エネルギー E_m

図5. 検証装置に関するエネルギーの実験値と理論値の比較
(ばねの自由長さがそれぞれ異なるため、各グラフは理論値さえも完全な右肩上がりになっていない)

ただし図5において、下記の考慮を行っている（この考慮を行うことで、可動片を下げるのに必要な力 F_z に関して、理論値とばねばかりを用いた実験値が良く一致した）。

- ・ ばねが行った仕事 E_c の実験値には、可動片（質量 600g）による位置エネルギー放出を含めた。
- ・ おもりの慣性モーメントにアームの慣性モーメントを加えた。

図5(a)より、ばねが行った仕事 E_c の実験値は理論値より大きい。この理由としては、可動片を下に移動する際、理論値の F_z のみならず、摩擦力に抗する必要があったためと考えられる。また図5(b)より、放出電気エネルギー E_m の実験値は理論値より小さい。この理由としては、減速機や誘導機の効率があまり良くないこと等が考えられる。

5. 固定速フライホイール電力貯蔵実証装置の運転

4章で述べた検証装置では、放電時の出力電力もその持続時間も短く、動作特性を詳細に把握することが困難であった。そこで、より大型な実証装置を設計し、実験を行うことにした。この実証装置では、なるべく蓄積エネルギーを大きくするために、おもりの数 n を4とした。また、おもりの質量 m は1つあたり470gで、アーム長 l は30cmとした。発電電動機としては4極の三相誘導機（定格90W）を減速比3の減速機を介して回転軸に接続した。また、慣性モーメント制御装置としては、直流12Vの自動車用バッテリーで動作するウィンチ（正・逆の両方向の回転が可能）を用いた。本装置での充放電実験結果の一例を図6に示す。図6中の記号は図1に赤色で記されている。

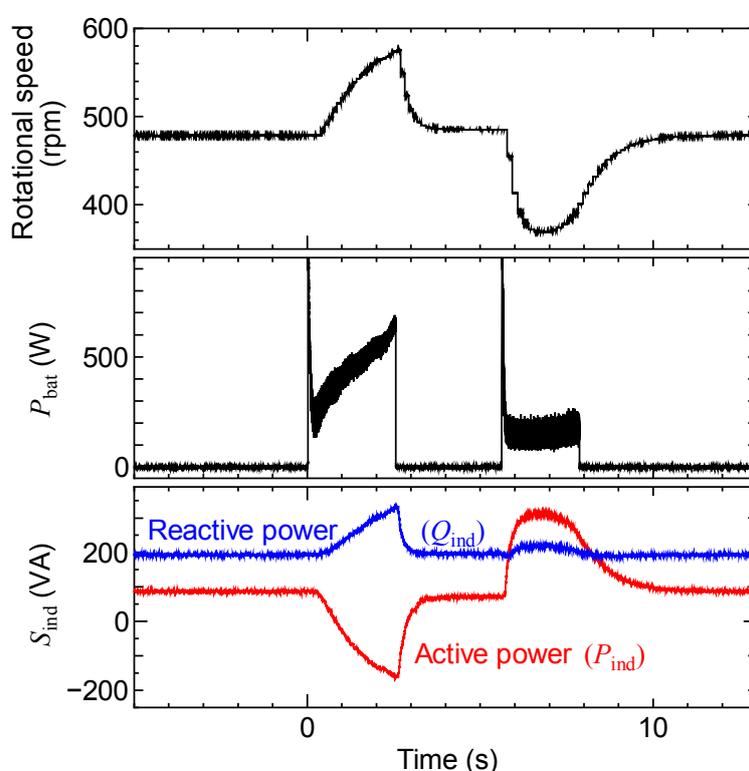


図6. 固定速フライホイール電力貯蔵実証装置の運転例

回転速度は小野測器製の非接触回転検出器 LG-9200 および周波数/電圧変換器 FV-1500 により測定した。また、誘導機の有効・遅れ無効電力消費については、HIOKI 3169-01 により測定した。

図6において、フライホイールの回転速度は時刻0秒より前の空転時には同期速度500 rpmより少し低い480 rpmである。時刻0秒より2.5秒間ほど、ウィンチを巻き取り動作させ、電気エネルギー E_m を放電させた。その後、時刻5.5秒ごろより2.5秒間ほどウィンチを逆回転させてエネルギーを蓄えた。この充放電の際、フライホイールの回転速度には2割程度ずつである ± 100 rpmの大きな変動があった。滑りが大きいので、

もう少し定格容量の大きな発電電動機を用いるべきと考えられる。また、ウィンチを動かすためにバッテリーが出力した直流電力 P_{bat} が、誘導機の出力電力より大きくなっている。図 1 において、誘導機の効率 P_{st}/P_{ind} やウィンチの効率 P_{cnt}/P_{bat} がより高いものを選定すべきと考えられる。

6. まとめ

慣性モーメントを能動的に変化させることで充放電を行う固定速フライホイール電力貯蔵装置を提案した。まずエネルギー収支に関する理論式を導出した。次に、検証装置により、上記の理論値と実験値の比較を行い、損失を考えると説明可能な誤差の範囲で同様な傾向を得た。また、より大型の実証装置の設計と実験を行い、効率の改善が重要であることを示した。

謝辞

本研究は「公益財団法人 JFE21 世紀財団」の研究助成によって行われた。また、近藤研究室所属の佐藤君、石田君、竹島君の協力の下で行われた。記して、関係者各位に謝意を表す。

参考文献

- [1] 向井一馬・宇藤祐悦：「電力系統の品質向上に寄与する水力発電技術」, 東芝レビュー, Vol.58, No.7, pp. 42-45 (2003)
- [2] 山下光司・坂本織江・北内義弘・七原俊也・井上俊雄・塩浜智洋・福田仁：「小規模離島への風力発電導入時の系統周波数安定化方式の開発」, 電気学会論文誌 B, Vol. 131, No. 5, pp.437-446 (2011)
- [3] M.L. Lazarewicz, T.M. Ryan, "Integration of Flywheel-Based Energy Storage for Frequency Regulation in Deregulated Markets", 2010 IEEE PES General Meeting (2010)
- [4] L.G. Yuan, F.M. Zeng, G.X. Xing, "Research on the Design and Control Strategy of Variable Inertia Flywheel in Diesel Generator Unit under Pulsed Load", 2010 IEEE International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE), pp. 187-189
- [5] J. Braid, "Conceptual design of a liquid-based variable inertia flywheel for microgrid applications", 2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), pp. 1291-1296
- [6] R.V. Harrowell, "Elastomer flywheel energy store", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 36, No. 2, pp. 95-103 (1994)