

低コスト・汎用を志向した フライホイール電力平準化システムの実機検証

田中 賢太* 伊東 淳一 松尾 宗哉 山田 昇 (長岡技術科学大学)

Experimental Verification of the Flywheel Power Leveling System
Oriented to Low Cost and General Purpose Use

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

This paper introduces the performance of a power leveling system with a 3.0 MJ, 9500 r/min flywheel energy storage. In terms of cost reduction, this system use low cost structure of flywheel and components of the general purpose products. Therefore, time delay of the measurement circuit limits the control performance. In order to overcome this problem, time delay compensation scheme based on Smith predictor is applied in the control to improve the control performance of the power regeneration. As a result, the settling time is reduced by 40% compared to without a compensator. In addition, the effectiveness of power leveling control in a prototype is evaluated by experiment. From the harmonics analysis, it was confirmed that the power fluctuation was suppressed up to 84.6%. Furthermore, vibration analysis during the power leveling is performed using the acceleration sensor. From the results, it was confirmed that the vibration level of the prototype is sufficiently small.

キーワード：フライホイール，電力平準化，振動解析，遅れ時間補償
(Flywheel, Power leveling, Vibration analysis, Time delay compensation)

1. はじめに

近年、太陽光や風力をエネルギー源とした発電システムの研究が盛んに行われている。これらの発電システムは、従来の火力発電や原子力発電などと比べて比較的小規模なシステム構成で発電可能であることや、発電時に温室効果ガスである二酸化炭素を排出しないクリーンな発電方式である。しかしながら、日射量や風向、風速は気象条件によって変動するため天候によって発電できない場合や、電力の安定供給ができないという欠点を併せ持っている。このように発電電力が不安定なシステムを電力系統と連系する場合、系統への周波数変動や電圧変動などの悪影響を与えてしまう可能性がある。したがって、系統連系を想定した太陽光・風力発電システムでは発電電力を一時的に貯蔵し、これの充放電によって変動電力を補償する技術が必須となる。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、フライホイールが有力であるとされている。これらの装置はそれぞれ異なる特徴を持っており、例えば、バッテリーは低コストで大容量を実現可能であるが化学反応を利用してエネルギーを貯蔵するため、温度特性が悪く高温環境下では著しく寿命が劣化する。一方、フライホイールの消耗部品は回転体の軸受のみであり、エネルギーを貯蔵する回転体に寿命はない。そのため、周囲温

度による特性劣化もほとんどなく、非常に寿命が長い。また、高サイクルでの充放電にも強いという特徴を持っている。

近年のフライホイールの研究では、高効率と超高速回転による高いエネルギー密度を実現するために磁気浮上を用いた軸受が採用されている。しかし、磁気軸受を適用するために必要であるバランス取りが非常に難しく、制御システムも複雑になるという問題がある⁽¹⁾⁻⁽³⁾。これは、本来構造が簡単なフライホイールシステムの大型化や高コスト化、制御の複雑化を招く恐れがある。

そこで、本研究では汎用品を組み合わせるによりシステム全体の低コスト化を実現する。試作システムでは、フライホイールの軸受として、安価なボールベアリング、モータの駆動に汎用インバータを、さらに制御器には安価な PIC マイコンを用いてフライホイールの充放電制御を行う。従来瞬時電力を制御する方式では、高速な応答性能を持つ電流センサや高度な処理能力が必要とされ、専用設計を伴うカスタムインバータが用いられてきた。本システムは、電力検出に市販のトランジューサなどの装置を採用することでカスタムインバータを不要とし、安価なマイコンによる制御を可能にしている。しかし、安価なトランジューサは大きな検出遅れ時間を持つため、制御帯域をあげると不安定になる可能性がある。そこで、本研究では電力制

御にスミスの無駄時間を適用し制御性能の改善を試みる。さらに、実際の太陽光発電の電力変動を模擬し、試作システムによる電力平準化効果を実験により確認する。また、ボールベアリングを用いると振動が増加するが、その妥当性を検証するため、電力平準化動作時にフライホイールで発生する振動を計測し、試作システムの振動レベルの解析を行う。

2. 試作フライホイールシステムの構成

図1に試作したフライホイールの写真、表1にシステムの主な仕様を示す。本システムではフライホイールの駆動に工作機等で用いられる汎用の高速誘導機を採用した。また、回転体の慣性モーメントを適切に設計することにより、比較的低回転数領域で電力補償に十分な運動エネルギーを貯蔵する。これにより、従来のフライホイールの研究で要求される数万 r/min の超高速回転が不要となり、磁気軸受と比較して低コストなボールベアリングが適用可能となっている。

図2に補機類を含めた試作システムの構成を示す。本システムでは、モータの駆動に汎用インバータを採用し、フライホイールから放電される電力を系統に回生するため、市販の回生コンバータを組み合わせている。フライホイールに充放電される電力の検出はトランスデューサを用いており、検出値には無駄時間 T_L が発生する。さらに、フライホイールの充放電を制御するための回転数指令値は PIC マイコンを用いて生成し、汎用インバータに速度指令値として入力する。機械的な特徴として、フライホイールは密閉容器内に格納してあり、真空ポンプを用いて真空引きを行う。これにより、高速回転時に発生する風損を大幅に低減することが可能である。また、オイルクーラを用いて軸受とモータを油冷しており温度過上昇を防止する。

なお、本システムは数百 kW 程度の風力や太陽光などの自然エネルギー発電により生じる短周期変動電力の補償を想定しており、この場合、複数台並列で運用する。よって、真空ポンプやオイルクーラは共用できるので大きなコストアップ要因とはならない。

3. 電力制御方式

〈3.1〉速度指令式の生成

フライホイールは、電気エネルギーを回転運動エネルギーの形態で貯蔵する装置であり、回転体の回転角速度を変化させることで充放電を行う。フライホイールの減速時は誘導機が発電機として働くことで、運動エネルギーが電気エネルギーとして放出され、フライホイールの加速時は誘導機がモータとして動作することで、電気エネルギーを運動エネルギーとして貯蔵することができる。一般に安価な汎用インバータは外部から速度指令を与えることしかできないため、本システムではフライホイールの速度制御により充放電の電力を制御する。

回転体の運動エネルギーとして蓄えられるエネルギー E は(1)式にて得られる。

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

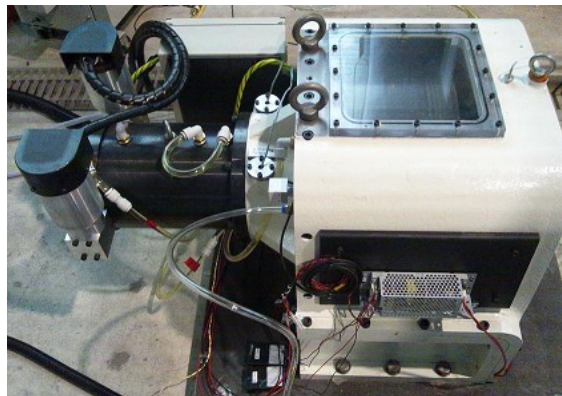


Fig.1. Photograph of the prototype Flywheel system.

Table 1. Specification of the Flywheel system.

Rated voltage	200V
Rated current	126A
Rated speed of rotation	9500r/min
Accumulated energy	3.0MJ
Weight of FW	241kg
Diameter of FW	45cm
Energy density	0.0172J/mm ³
Bearing	FAG HS7012C.T.P4S

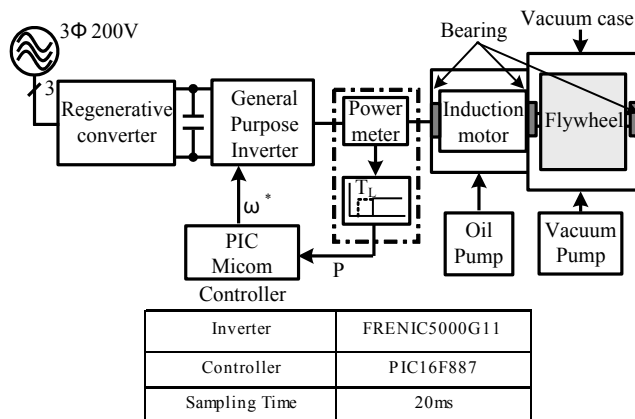


Fig.2. Configuration of the Flywheel system.

ただし、慣性モーメント $J[\text{kgm}^2]$ 、回転体の角速度 $\omega[\text{rad/s}]$ である。

一方、フライホイールの出力電力は回転運動エネルギーと電力の関係より、(1)式の両辺を微分することで得られ、(2)式となる。

$$P = J\omega \frac{d\omega}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

つまり、フライホイールの回生電力は回転角速度と角加速度の積に比例する。よって、フライホイールの回生電力 P^* を出力するための速度指令値 ω^* は(2)式より、(3)式によって得られる。

$$\omega^* = \frac{1}{J} \int \frac{P^*}{\omega} dt \dots\dots\dots (3)$$

さらに、(3)式を実機に実装するために離散化すると(4)式となる。

$$\omega_n = \omega_{n-1} + \frac{1}{J} \frac{P^*}{\omega_{n-1}} \Delta t \dots\dots\dots (4)$$

〈3・2〉 スミス法による無駄時間補償を適用した制御系

本システムではフライホイールの出力電力検出を安価なトランジェューサにより行うことを想定しており、この検出値には数百 ms の無駄時間が発生する。制御対象に無駄時間がある場合、高速応答をするためゲインをあげると制御が不安定になる。そこで、スミス法による無駄時間補償を適用し制御性能の改善をおこなう。

図 3(a)に通常のフィードバック制御系を示す。制御対象に無駄時間 T_L がある場合の特性方程式を(5)式に示す。

$$1 + C(s)G(s)e^{-T_L s} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

このように無駄時間要素が含まれ制御対象に通常のフィードバック制御を適用すると、オーバーシュートや整定時間の増加など制御性能の悪化を招く。

図 3(b)にスミス法による無駄時間補償を適用した制御ブロック図を示す。この補償器は制御対象の無駄時間経過後の出力を推定し、フィードバックすることにより無駄時間を特性方程式から取り除く⁽⁴⁾。この際の特性方程式は(6)式となり、補償器を追加することにより特性方程式からむだ時間要素が除去され、制御性能の改善が期待できる。

$$1 + C(s)G(s) = 0 \dots\dots\dots (6)$$

4. 実験結果

〈4・1〉 応答性能の検証

試作システムの応答性能を検証するため、回生電力のステップ応答を測定する。実験条件は定常回転速度 6000 r/min, 回生電力指令値を 2 kW とする。また、実験に使用した汎用インバータは富士電機製 FRENIC5000G11S, コントローラに使用したマイコンは PIC16F887 であり、サンプリング時間は 20 ms である。電力検出にはサンプリング時間 400 ms のパワーメータを使用している。PI 制御器のゲインは限界感度法により求めた値であり、スミス補償器の有無によらず等しいゲインである。

図 4 に遅れを補償しない場合と、スミス法による遅れを補償した場合の実験結果を示す。図 4(a)より、スミス補償器を適用しない場合はオーバーシュートが発生していることがわかる。一方、図 4(b)に示すようにスミス補償器を適用した場合は回生電力にオーバーシュートが発生しておらず、整定時間が 40%低減している。これらの結果より、電力検出に大きな無駄時間を持つシステムに対してスミス補償器を適用することで回生電力の応答性が改善することが確認できる。

図 5 に無駄時間補償を適用した試作システムの周波数特性を示す。これより、スミス補償器を適用した場合の応答周波数は 0.18 Hz(周期 5.56 sec)となった。

再生可能エネルギーを用いる発電方式は気象条件によって発電電力が大きく変動する。風向や風速、日射量の変化は数十秒から数分の短周期変動と数十分の長周期変動が組み合わされている⁽⁵⁾。したがって、数十秒単位の短周期電力

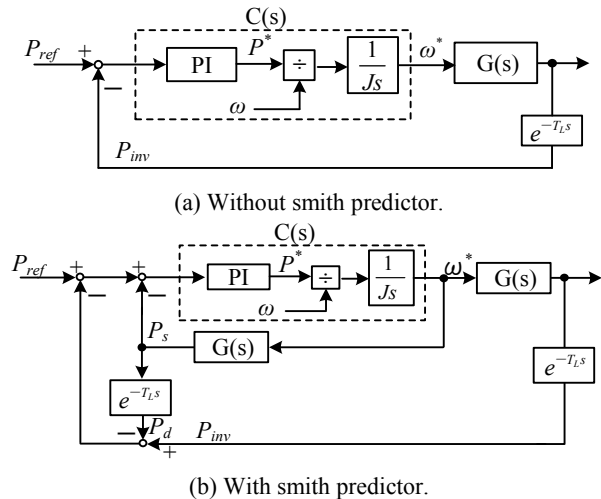


Fig.3. Block diagram of time delay compensation scheme based on Smith predictor.

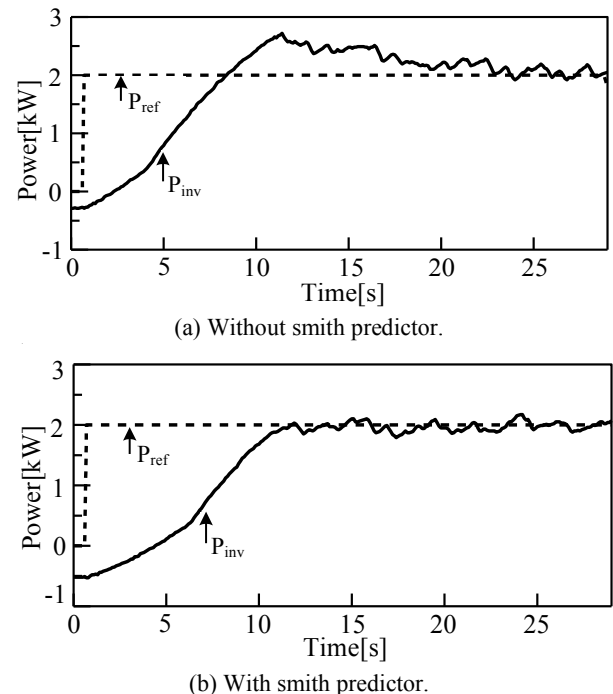
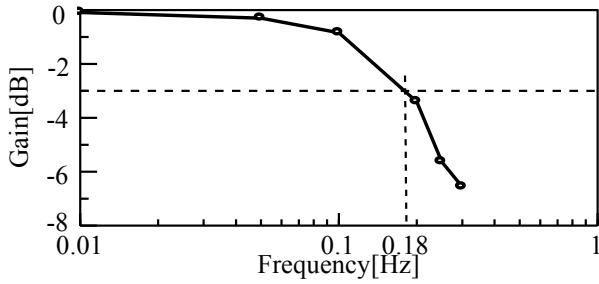


Fig.4. Experimental results of the step response with and without smith predictor. (Rotation speed is 6000r/min)

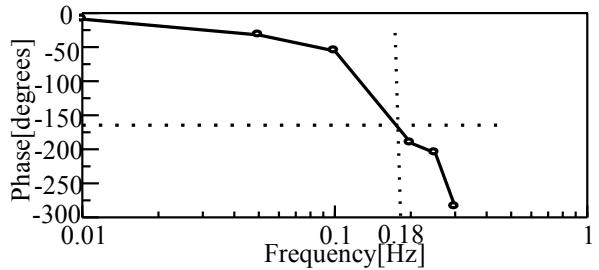
変動を抑制する用途にフライホイールを適用することを考えるとき、試作したフライホイールシステムの応答速度は十分適用可能であると考えられる。

〈4・2〉 短周期電力変動補償制御

図 6 に短周期電力変動補償制御に用いるシステム構成図を示す。本試験では、太陽光発電の電力変動を模擬するため降圧チョップを使用し、出力電流制御を行うことでインバータの直流リンクコンデンサ部分に電力変動を与える。電力変動は降圧チョップの出力電力を検出し、ハイパスフィルタを通すことで変動成分を抽出する。これをフライホイールの指令値として入力し、変動成分を充電・放電動作によって補償する。本試作システムは数十秒周期の短い周期の変動補償を目的としているため、変動を抽出するハイパスフィルタのカットオフ周波数を 0.0025 Hz としている。



(a) Gain characteristic.



(b) Phase characteristic.

Fig.5. Bode diagram of the demonstrated flywheel system when Smith predictor is applied. (Rotation speed is 6000r/min)

図 7 に実験結果を示す。ここで、フライホイールのベースの定常回転数は 5500 r/min であり、図 7(a)に示す電力変動パターンは実際の太陽光発電の発電データの一部を用いている。

図 7(b)に変動補償後の系統電力、図 7(c)にフライホイールの出力電力を示す。これらの結果より、発電電力の変動がフライホイールの出力電力によって補償され、同図(b)は同図(a)の電力変動をゆっくりと平均化した波形となっており、系統電力に急峻かつ大きな電力変動が発生していないことがわかる。また、変動補償後の系統電力波形に高周波リプルが発生しているが、これは電力検出の遅れ時間の影響により生じるリプルである。今後ゲインの最適化などを図ることで改善することが予想される。また、図 7(d)より電力変動補償動作時の速度変動は 1000 r/min 以下であり、急激な速度変動が生じていないことがわかる。

図 8 に変動補償前後の高調波解析結果を示す。変動補償前は 0.004 Hz~0.02 Hz 付近に大きな変動成分が表れているが、平準化動作後は変動成分が最大で 84.6 %低減しており、試作システムを用いた電力変動補償制御の有効性が確認できる。

5. 試作システムの振動解析

本研究では、フライホイールを太陽光発電や風力発電へ適用することを想定しており居住地の近くに設置する可能性がある。したがって、システム動作時の低騒音、低振動が要求される。しかしながらフライホイールは回転機であるため、静止器であるバッテリーや電気二重層キャパシタと比較すると大きな振動が発生すると考えられる。磁気ベアリングなどを使用すれば非接触で支持できるが、コストアップ要因となる。そこで、実験により試作システムの短周期電力変動補償時の振動解析を行う。

図 9 に振動解析に用いる加速度センサの取付け位置を示

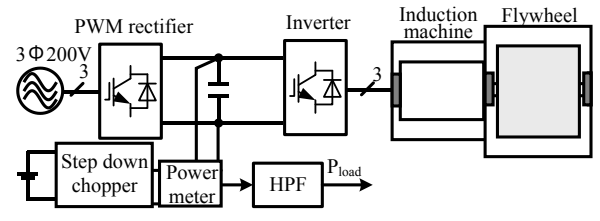
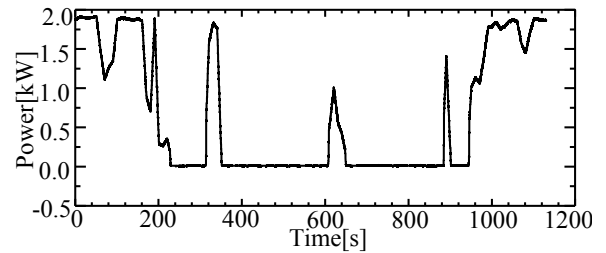
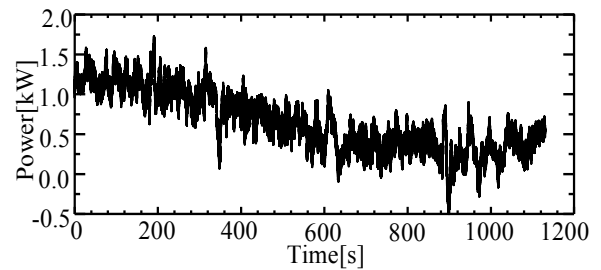


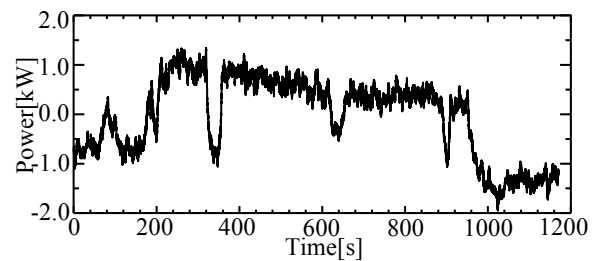
Fig.6. Configuration of the experimental system for the power fluctuation compensation.



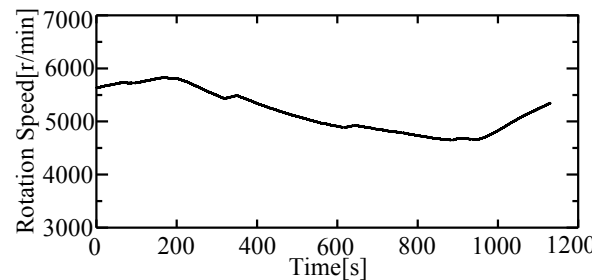
(a) Fluctuation pattern



(b) Grid power



(c) Output power of the Flywheel



(d) Rotation speed

Fig.7. Experimental results of the power fluctuation compensation control when applying Smith predictor. (Rotation speed is 5500r/min)

す。本試験ではフライホイールの軸に対して平行なアキシヤル方向と軸に対して垂直なラジアル方向の 2 方向につい

て加速度の測定を行う。また、加速度センサのデータ収録及び解析には小野測器製 DS-3000 を使用し、JIS 規格 B0906 で定められた振動速度によって振動レベルを評価する。振動解析では、加速度センサより測定した加速度を時間積分し振動速度を算出している。

図 10(a)にラジアル方向の振動速度、(b)にアキシャル方向の振動速度を示す。ここで、実験条件は図 7 の短周期電力変動補償の結果取得時と同一である。これより、フライホイールのラジアル方向よりもアキシャル方向で振動速度が大きくなっており、最大で 2.4 mm/s となることがわかる。JIS 規格によれば、試作システムは振動速度が 1.12 mm/s ~2.8 mm/s のゾーン B に分類される。これは制限なく長期間の運転が可能ゾーンと認定されているため、試作システムが実用上問題ない振動レベルであることがわかる。また、アキシャル方向では回転速度が 5200 r/min 程度で急激に振動が大きくなっている。これは電力変動パターンを変更した場合も同様の回転数で振動が大きくなることから、システムの固有周波数による共振現象であると考えられる。

次に振動の発生原因の検討を行う。フライホイールで発生する振動として以下の 4 点を検討する⁽⁶⁾。

- 1) 回転子軸心まわりの質量分布の不平衡による振動
- 2) 軸継手で接続された回転軸の中心線のずれによる振動
- 3) 誘導機の電磁力による振動
- 4) 軸受の転動体による振動

これらのうち、1)~3)の要素は振動速度に顕著に現れることがわかっている。回転子軸心周りの質量分布の不平衡による振動はラジアル方向に回転周波数成分として現れ、軸継手の中心ずれによる振動はアキシャル方向に回転周波数および高次成分として大きく現れる⁽⁷⁾。モータで発生する振動は回転子と固定子のエアギャップの不均一や空間高調波によって磁気吸引力が不平衡になり発生する。この振動は主に電源周波数の 2 倍の周波数成分として現れる⁽⁸⁾。また、モータをインバータで駆動するためキャリア周波数成分付近にトルクリプルによる振動が発生すると考えられる。そこで高調波解析を行うことで、これらの要因を分析する。

図 11 に振動速度の高調波解析結果を示す。これより、ラジアル方向は回転周波数成分の軸心周りの質量不平衡による振動が支配的であることがわかる。13 kHz のキャリア周波数成分の振動はトルクリプルによるものであり、550 Hz 成分はシステムの固有振動成分である。アキシャル方向も同様に回転周波数成分が支配的となっており、軸継手の中心ずれによる振動であると考えられる。また、両方向とも電源周波数の 2 倍成分は 0.2 mm/s 以下であるため、モータの電磁力による振動は小さいことがわかる。

図 12 に振動加速度の高調波解析結果を示す。衝撃力など力の大きさが問題となる軸受の振動は加速度に顕著に現れる。そこで、振動加速度の高調波解析よりアキシャル方向の振動速度解析で発生している 1 kHz 以上の振動の要因を検討する。軸の回転により発生する振動として、軸受の転動体の通過による軸受外輪の弾性変位から発生する振動がある。軸受の転動体で発生する振動は保持器の回転周波数 f_c に転動体の個数 Z をかけた周波数成分として現れ、 f_c は(7)式で表される⁽⁹⁾。

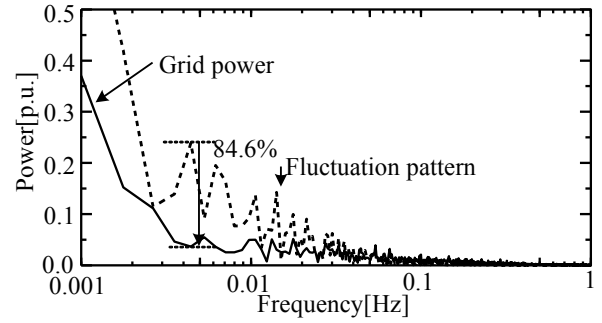


Fig. 8. Harmonic analysis during the power fluctuation compensation control.

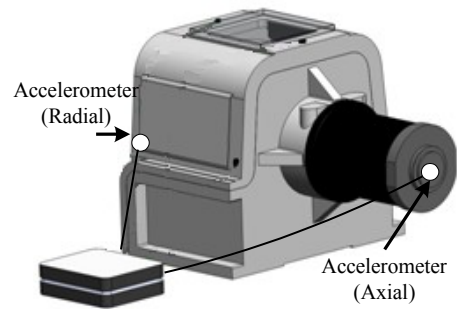
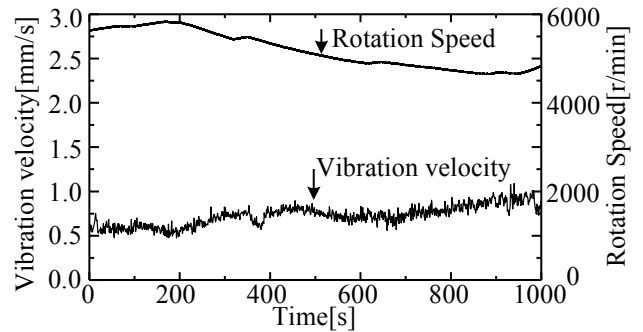
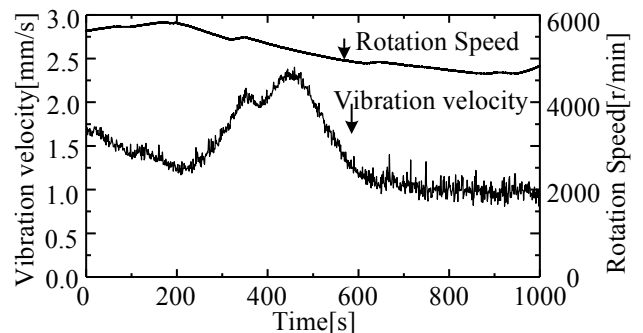


Fig. 9. Mounting position of the accelerometer.



(a) Radial direction



(b) Axial direction

Fig. 10. Analysis of the vibration velocity during the power fluctuation compensation control.

$$f_c = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 f_r : 軸の回転周波数、 d : 転動体の直径、 D : 軸受のピッチ円直径、 α : 接触角とする。試作システムで採用して

いる軸受に(7)式および Z を適用すると、転動体の通過による振動成分は回転周波数 f_r の 10.57 倍, 12.43 倍, 14.92 倍成分などに大きく現れる。

高調波解析結果より、回転周波数成分の 11.88 倍である 1040 Hz, 12.90 倍の 1130 Hz, 15.50 倍の 1356 Hz 成分およびこれらの高次成分が現れており、1 kHz 以上の振動成分が軸受によるものであることがわかる。また、高次成分の振幅の方が基本成分より大きくなっているが、これはシステムの固有周波数と振動周波数が共振しているためであると考えられる。

以上の結果と考察より、振動はフライホイールの軸心周りの不平衡と軸受が主な要因であることがわかった。したがって、加工および組立て精度の向上、機械的接触を低減するピボット軸受⁽¹⁰⁾を採用することで振動をさらに抑制可能であると考えられる。

6. 結論

本研究では、汎用インバータと市販のトランスデューサ、PIC マイコンを組み合わせた安価で構造が簡単なフライホイール電力貯蔵装置の試作を行った。本システムでは、大きな検出遅れ時間を持つシステムを想定し、スミス法による無駄時間補償を適用することで制御性能の改善を行った。実験結果より、補償器を適用することで整定時間が 40 % 低減し、無駄時間補償による制御性能の改善を確認できた。さらに、試作システムを用いて電力変動補償制御の実証試験を行い、フライホイールの充放電により変動が最大で 84.6 % 抑制できることを確認した。また、電力変動補償動作時の振動解析を行い、試作システムが長期間の運転が可能な振動レベルであることを明らかにした。今後は風損の評価やシステム全体の損失の評価などを行い、フライホイールの短周期電力変動補償装置としての詳細な特性を明らかにしていく。

文 献

[1] B.H.Kenny, P.E.Kasecak, 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)

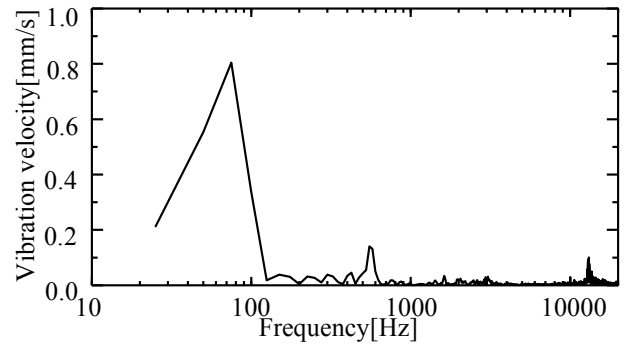
[2] Z.Kohari, Z.Nadudvari, L.Szlama, M.Keresztesi, I.Csaki, "Test Results of a Compact Disk-Type Motor/Generator Unit With Superconducting Bearings for Flywheel Energy Storage Systems With Ultra-Low Idling Losses", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 21, No. 3, pp. 1497-1501(2011)

[3] 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)

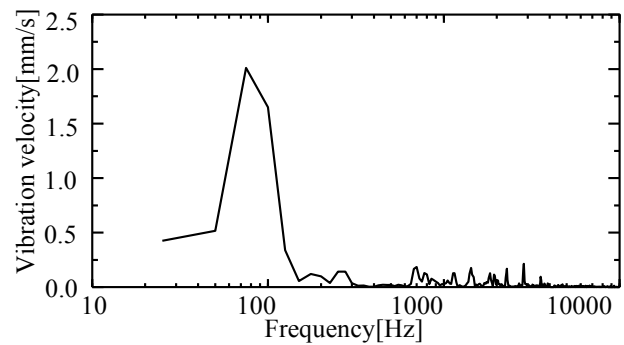
[4] J.Shibata, K.Ohishi, I.Ando, M.Ogawa, "Fine output voltage control for inverter system having nonlinear load and time-delay", IPEC-Sapporo, pp. 1541-1546(2010)

[5] Bingchang Ni, Constantinos Sourkounis, "Energy Yield and Power Fluctuation of Different Control Methods for Wind Energy Converters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.47, No.3, pp.973-978(2011)

[6] K.Izawa, S.Ichikawa, 'Development Report for High Speed Flywheel', JAXA Research and Development Report(2008)



(a) Radial direction



(b) Axial direction

Fig.11. Harmonic analysis results at maximum vibration velocity in each direction.

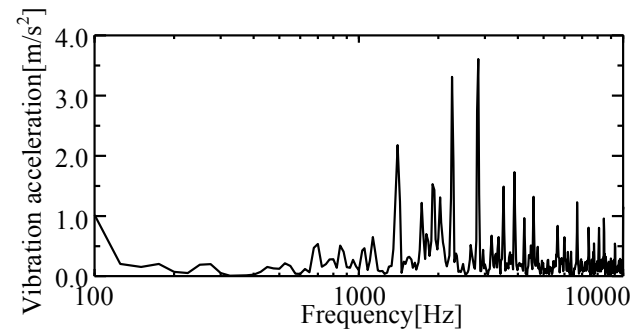


Fig.12. Harmonic analysis result at maximum vibration acceleration. (Axial direction)

[7] 神吉博, 安達和彦, 浦谷正史, 川田哲平, "ロータのミスアライメントが振動に及ぼす影響に関する研究", 日本機械学会関西支部講演会論文集, pp.12-24(2009)

[8] 太田裕樹, 佐藤太一, 田口真之, 岡本譲治, 長橋克章 "モータ加振力の計測法および計算法の検討", 日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集, pp.217-221(2000)

[9] 五十嵐 昭男, "ころがり軸受をもつ軸系の振動", 日本機械学会関西支部第 70 会講習会(1976)

[10] 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)