

# 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回生電力制御法

学生員 田中 賢太 正員 伊東 淳一

非会員 松尾 宗哉 非会員 山田 昇 (長岡技術科学大学)

## Regenerative Power Control Method of Flywheel Power Leveling System Using Smith Dead Time Compensation Method

Kenta Tanaka, Student Member, Jun-ichi Itoh, Member

Soya Matsuo, Non-member, Noboru Yamada, Non-member (Nagaoka University of Technology)

This paper, manufactured a flywheel system of 9000r/min, 3.0MJ, for an energy cache system. This system aims to achieve the low cost by combining the general-purpose products. We attempted to control the regenerative power of the prototype flywheel system. And we applied smith method to compensate for the dead time with the system. As a result, overshoot was reduced and we confirmed the effectiveness of the compensation method.

キーワード：フライホイール、エネルギーキャッシュシステム、回生電力制御、無駄時間補償

Keywords : Flywheel, Energy Cache System, Regeneration Power Control, Dead Time Compensation Method

### 1. はじめに

近年、太陽光や風力などの再生可能エネルギーを用いた発電システムの導入が進められている。これらの発電システムは、発電時に二酸化炭素を排出しないことや比較的小規模なシステム構成で発電可能であるという利点を持っている。しかし、日射量や風向、風速などの気象条件によって発電電力が大きく変動するという欠点があり、合計発電電力と消費電力の均衡が崩れることで商用系統に周波数変動や電圧変動が発生してしまう。したがって、このようなシステムには電力変動を抑制し平準化するために鉛バッテリーや電気二重層キャパシタ、フライホイールなどのエネルギー貯蔵装置が必須となる。バッテリーはエネルギー密度が高くコストも低いという利点を持つが、高サイクルの充放電に制限があり、使用温度による特性の劣化や寿命が短いという欠点を持つ。一方、フライホイールは消耗部品がモータ/発電機の軸受のみであるため長寿命であり、高サイクルの充放電にも強いという特徴を持っている。

本研究では、耐環境性、メンテナンス性の観点からフライホイールをエネルギーキャッシュシステムに適用することを目指している。本研究では、汎用品を組み合わせることによりシステムの低コスト化を実現する。試作システムではモータの駆動に汎用インバータを採用し、PICマイコンを用いたコントローラによりフライホイールの回転数を制御する。瞬時電力を制御する場合は、電流を制御するため

高性能な検出デバイスを用いることや高度な処理能力が必要であり、専用のカスタムインバータが必須である。電力検出を市販のトランスデューサなどの装置を用いることで、カスタムインバータは不要となり安価なマイコンで制御が可能となる。しかし、安価な電力検出デバイスは大きな遅れ時間を伴うため、制御が不安定になる場合がある。そこで、本研究では無駄時間の大きなシステムに対してスミス法によるむだ時間補償を適用することで回生電力の応答性能を改善することを目的とする。

### 2. 試作フライホイールシステム

図1に試作したフライホイールの写真、表1にシステムの仕様を示す。フライホイールシステムは誘導機と回転体を組み合わせて構成する。本システムでは、縦形に比べて構造が簡単な横型を採用した。また、磁気浮上を用いた軸受は低損失を実現できるが、複雑な制御、装置が必要となる。そこで、本システムでは軸受に特殊な皮膜処理を施したボールベアリングを採用し、コストの削減と性能の両立を図っている。

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図を示す。フライホイールを駆動するモータには簡単化のために誘導機を使用し、電力変換器として汎用インバータを採用した。また、フライホイール回生動作時の電力を系統に回生するため、電力回生用のコンバータを取り付けている。本システムでは、回生電力の検出に大きな無駄時

間があるパワーメータを用いており、フライホイールの回転数指令値は安価な PIC マイコンを用いたコントローラで生成し、汎用インバータに速度指令として入力する。また、真空ポンプを用いてフライホイール密閉容器内の真空度を高めることにより風損を低減し、オイルクーラを用いてモータとベアリングの温度過上昇を防止している。

図 3 に試作フライホイールシステムの定常損失の解析結果を示す。ここで、解析条件は定常回転速度 9000rpm、貯蔵エネルギー 3.0MJ とする。これより、FW 密閉容器内の真空度が 800Pa の場合は定常回転状態で発生する全損失のうち軸受の損失が 19%、モータの鉄損が 76%を占めることが分かる。試作システムではモータ鉄損が全損失の約 70%と非常に大きな割合を占めており、さらなる高効率化に向けて電氣的損失の改善が必須である。

### 3. 電力制御方式

#### (3・1) 速度指令式

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。一般に汎用インバータは速度指令を与えることから、速度指令を制御して、回生エネルギーを制御する。

(1)式に回転体の運動エネルギーを示す。ここで、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。(2)式にフライホイールの出力を示す。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フライホイールの出力電力が得られる。(2)式より、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ことが分かる。

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

$$P = J \omega \frac{d\omega}{dt} [\text{W}] \dots\dots\dots (2)$$

(3)式に負荷指令値  $P_{load}$  を回生するための速度指令値  $\omega^*$  を示す。この式を実機に実装するために離散化したものが(4)式となる<sup>(2)</sup>。

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

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

#### (3・2) スミス補償器を用いた制御器の構成

本システムでは、回生電力の検出をパワーメータにより行っており、この検出値には 400ms の無駄時間が発生する。安価なトランジェンサを用いる場合も同様の無駄時間

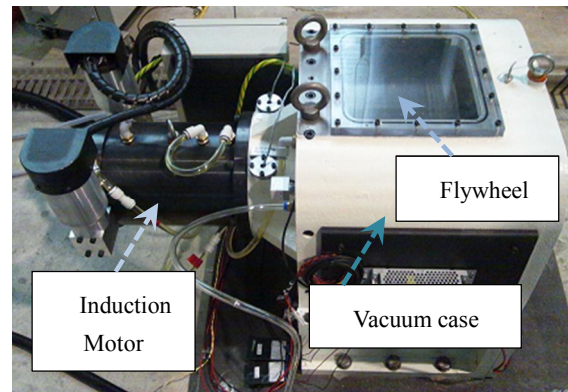


Fig.1. Flywheel System.

Table 1 Specification of Flywheel unit.

Rated voltage	200V
Rated current	126A
Rated speed of rotation	9000rpm
Accumulated energy	3.0MJ
Weight of FW	241kg
Diameter of FW	45cm

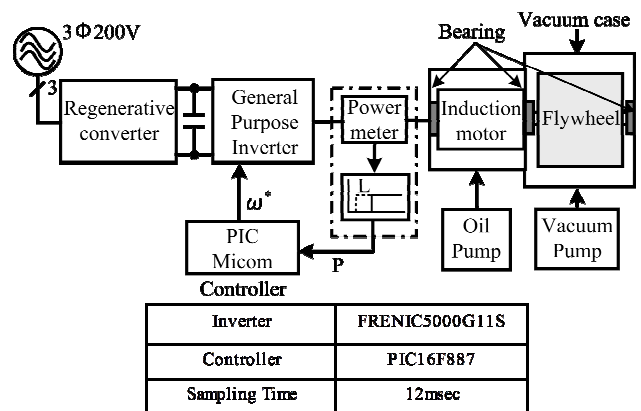


Fig.2. Configuration of the Flywheel system.

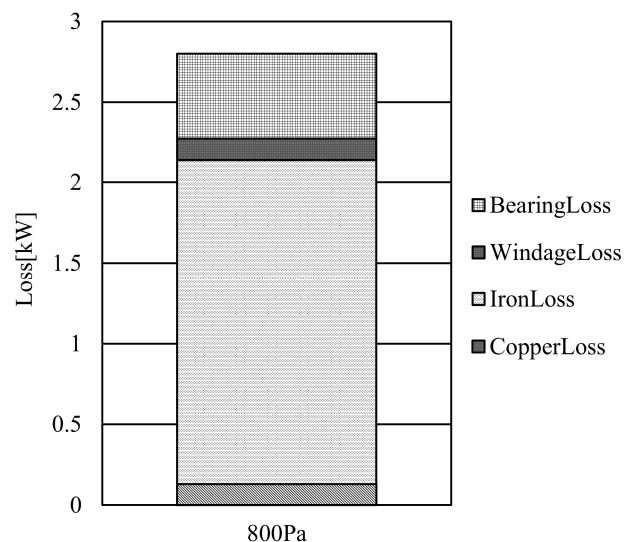


Fig.3. Loss analysis results.

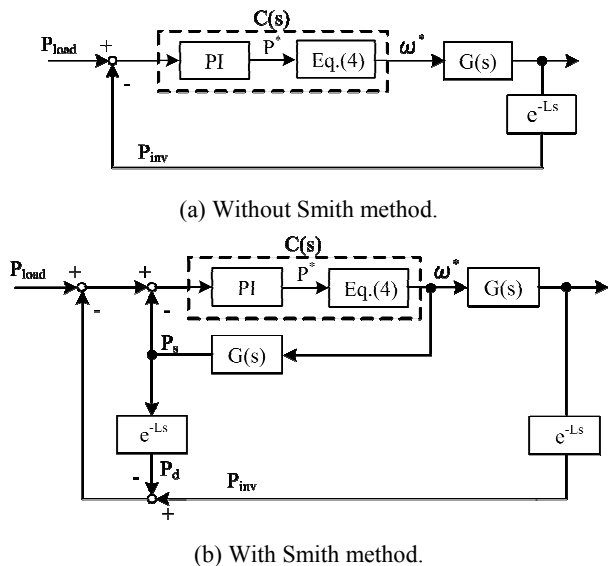


Fig.4. Block diagram of the smith compensation method.

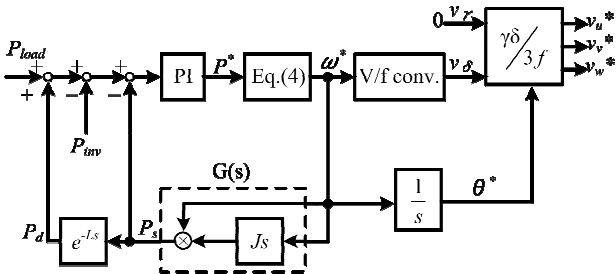


Fig. 5. Block diagram of the control method.

が発生することが想定される。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試みる。

図4(a)に通常のフィードバック制御系を示す。このシステムでは制御対象の出力検出に遅れ時間  $L$  が発生する場合を考える。(5)式に図4(a)に示すシステムの特性格方程式を示す。これより、特性格方程式に制御対象に含まれるむだ時間要素が現れることが分かる。このような制御対象に対して通常のフィードバック制御を行った場合、操作出力の結果を確認できないまま次の操作出力を更新することになる。この結果、オーバーシュート量が大きくなり、制御性能が劣化する。

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

図4(b)にスミス法による補償器を適用したブロック図を示す。これは、制御対象の無駄時間経過後の出力をフィードバックすることで、無駄時間の影響を特性格方程式から取り除く方法である<sup>(3)</sup>。(6)式にスミス補償器を適用した場合の特性格方程式を示す。これより、特性格方程式からむだ時間要素の影響が除去されているため、制御性能の改善が期待できる。

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

〈3・3〉 シミュレーション結果

図5に制御ブロック図を示す。本システムでは、モータの駆動にV/f制御を採用し、パワーメータの検出値  $P_{inv}$  とス

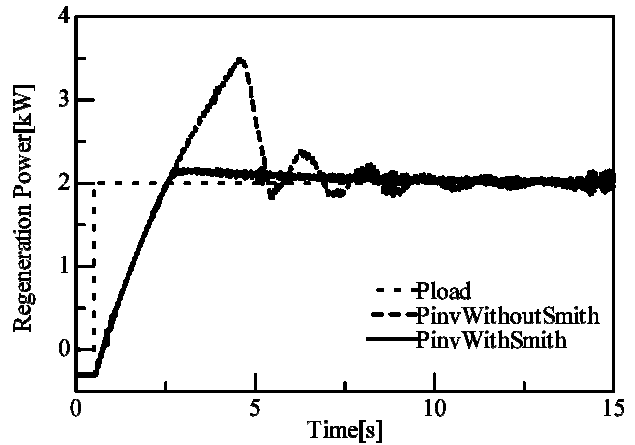


Fig.6. Simulation result. (Step load)

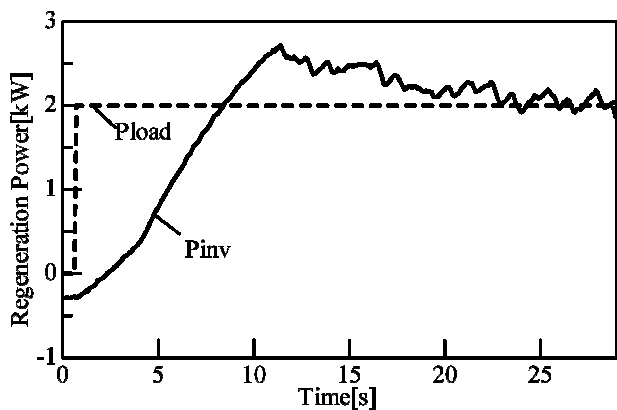
ミス補償器の出力  $P_s$ 、無駄時間経過後の出力  $P_d$  を用いてPICマイコンにより速度指令値  $\omega^*$  を生成する。また、スミス補償器に用いる制御対象のモデル  $G(s)$  は、回転角速度の指令値  $\omega^*$  とフライホイールの慣性モーメント  $J$  から算出する。

図6にスミス補償器の有無によるシミュレーション結果の比較を示す。ここで、シミュレーション条件は定常回転速度 6000rpm、2kW のステップ負荷、ゲインの等しい制御器とする。これより、スミス補償器を適用しない場合は、無駄時間の影響によって再生電力波形のオーバーシュート量が大きくなり、応答波形が振動的になっている。一方、スミス補償器を適用した場合はオーバーシュート量が低減しており、無駄時間補償により制御性能が改善することが確認できる。

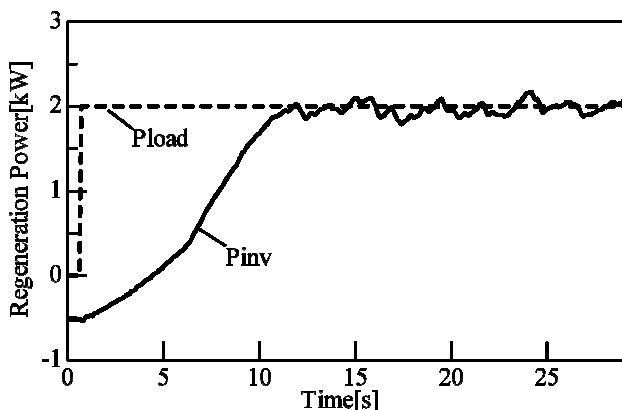
4. 実験結果

図7にステップ状の指令値を与えた場合の再生電力の応答を示す。ここで、実験条件は定常回転速度 6000rpm、負荷指令値 2kW とする。また、実験に使用したインバータは富士電機製の FRENIC5000G11S、マイコンは PIC16F887 であり、サンプリング時間を 12ms とする。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7(a)より、スミス補償器を適用しない場合はシミュレーション結果と同様にオーバーシュートが発生していることが分かる。一方、図7(b)に示すようにスミス補償器を適用した場合は再生電力にオーバーシュートが発生していない。これらの結果より、無駄時間の大きなシステムに対してスミス補償器を適用することで再生電力の応答性が改善することが確認できる。

図8に負荷の電力脈動を模擬して、正弦波状の指令値を与えた場合の再生電力の応答を示す。本制御方式は、パワーメータより得られた再生電力の平均値をフィードバックして制御に用いるため、瞬時電力を算出して制御する方式と比較して制御性能が悪化することが予想される。そこで、時間的に変動する指令値を与え、再生電力の応答を観測した。ここで、実験条件は定常回転速度 6000rpm、負荷指令値



(a) Without smith method.



(b) With smith method.

Fig.7. Experimental results. (Step load)

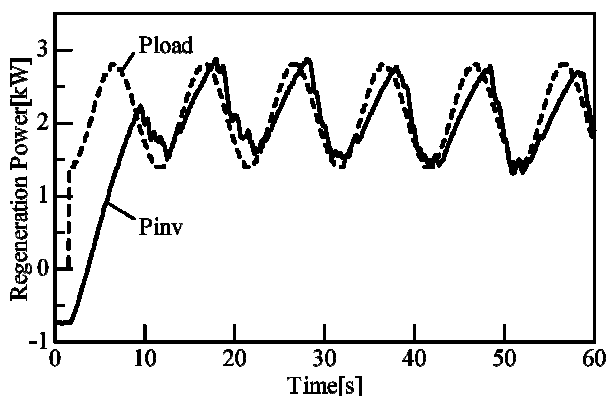
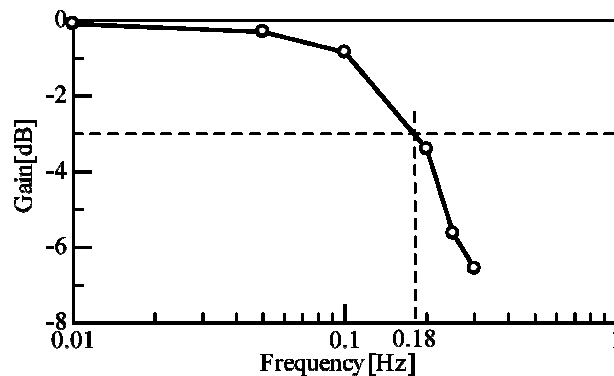


Fig.8. Experimental result. (Sine wave load, 0.1Hz)

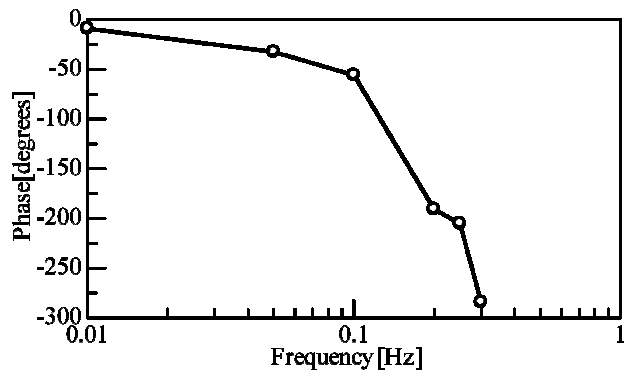
の周波数 0.1Hz, 振幅 1.4kW-2.8kW とする。実験結果より、回生電力が指令値によく追従できていることが分かる。

図 9 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カットオフ周波数は 0.18Hz(周期 5.56sec)となった。

風力発電の出力電力は風速の三乗に比例するため、わずかな風速の変動が大きな発電電力変動につながる。この出力変動は、風速や風向の変化に伴い数十秒単位の短周期の電力変動、数分～数十分の長周期の電力変動がランダムに組み合わされている<sup>(4)</sup>。したがって、数十秒単位の短周期電力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、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。



(a) Gain characteristic.



(b) Phase characteristic.

Fig.9. Frequency characteristics.

## 5. まとめ

本論文では、風力発電の短周期電力変動を抑制する用途向けに 9000rpm, 3.0MJ のフライホイールシステムを試作した。回生電力制御では、汎用インバータと安価な PIC マイコンを組み合わせた本システムに対して、スミス法による補償器を適用することで制御性能が改善されることを確認した。回生電力の応答周波数は 0.18Hz となり、風力発電の短周期電力変動を抑制する用途に十分適用可能であることが分かった。今後は実際の風力発電の発電データを用いて電力変動の抑制効果を検証していく。

なお、本研究の一部は NEDO 平成 23 年度 課題設定型産業技術開発費助成事業の支援を受けており、関係者各位に感謝の意を表します。

## 文 献

- (1) Kenta Tanaka, Yoshiya Ohnuma, Takayuki Fujimori, Itoh Junichi, Noboru Yamada : "Loss analysis of a Flywheel Energy Storage System for an Energy Cache Operation", SPC-11-116,MD-11-032 (2011)  
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-11-116,MD-11-032 (2011)
- (2) 田中賢太, 大沼喜也, 伊東淳一: "エネルギーキャッシュ向けフライホイールの回生電力制御",平成 23 年度電気関係学会北陸支部連合大会, A61 (2011)
- (3) 渡辺慶二: "むだ時間システムの制御", コロナ社(1993)
- (4) 矢後賢次, 腰一昭: "風力発電の系統連系システム", 富士時報, Vol.78, No.6(2005)