交流励磁フライホイール発電機による 高速変動負荷の補償

正員 力石 浩孝 (東工大)

正員 有満 稔 (東工大)

非会員 王 毅 (東工大)

学生員 上村 敏 (東工大)

正員 嶋田 隆一 (東工大)

Fast Response Power Stabilizer using the AC-Excited Flywheel Generator

Hiroataka Chikaraishi, Member, Minoru Arimitu, Member, Yi Wang, Non-member, Satoshi Uemura, Student Member, Ryuichi Shimada, Member (Tokyo Institute of Technology)

The flywheel generator in use as a power source for fusion experimental device is enough large to generate the electric power to make it suitable for application in wide range of industries.

The authors propose an AC-excited variable speed flywheel generator for short-period load leveling device and utility line power stabilizing device such as power factor, unbalanced load, flicker etc. In this paper, the validity of the flywheel for this purpose are described. And the new control method which applies the voltage control of Vector Control scheme are proposed.

Compared to a conventional generator with flywheel, the following advantages are offered: (1) The necessary converter capacity is small; (2) It is possible to accumulate and yield electricity rapidly with large power; (3) Reactive power can be supplied through phase-modified operation of generator, making it possible to reduce in capacity of static power factor compensator.

The experiments using the M-G set simulator with 4 kW wound type induction motor with flywheel are carried out to demonstrate the control ability. It is reported that the system proposed here controls the active and reactive power with so fast step response of less than 5 ms that the power-input attains the perfect leveling of even in unbalanced loads.

キーワード：可変速同期発電機，フライホイール，電力障害除去，エネルギー蓄積，電力平準化

1. ま え が き

電力エネルギーは、利用する段階で炭酸ガスなどの有害ガスを出さないため環境に優しく、高速に伝送可能かつ高精度の制御性があることから、その利用はますます進むと考えられる。しかし、現在の電力システムはそのなかにエネルギーの蓄積要素が特別に設置していないために、電力の発生とその消費が常時つりあわなければならない。電力システムでは需要量と発電量のアンバランスが続くと、短時間のうちに周波数と電圧が

大きく変化して、電力システムは連携して電力の融通を図る役目を失う。電力需要は人間活動の周期で変化するが、これを予想または追従して、発電して周波数の安定を得ている。従来、電力システムのもつパルス電力需要の許容量はシステムの総発電量の数%以内と考えられている。この程度であれば、システム内の発電機などの回転慣性力によって緩和されるため、電力システムの崩壊に至るような周波数の変動は起こらない。しかし、近年、産業界のパルスの電力需要は産業規模の拡大や、核融合実験装置、磁気浮上式鉄道のように、新しい電

力応用分野が生まれるに伴い大きくなってきており、問題になっている。更に目を開発途上国向ければ、世界の電力系統の平均容量は 100 万 kW 程度であり、ここに最新鋭の電力多消費型のプラントを設置することは困難を伴い、これが工業化へ向かう最大のネックとなっている。

従来、負荷側で電力障害を系統に出さない努力は行われてきた。例えば、力率の改善、更にそれを負荷に応じて行う SVC や、電気炉のフリッカ障害を考慮したフィルタ設備、電動機の起動突入電流を抑える各種の起動装置がある。また日本では既に撤去されてしまったが、鉄鋼産業分野ではイルグナー法など機械的蓄勢を利用してきたものもある⁽¹⁾。

これらの変動電力利用の根本的問題を解決することが最近の電力技術の進歩、特に半導体電力変換素子の応用と制御技術の進歩により可能となった。

フライホイールによる電力蓄積は従来から特殊な分野で利用されてきた。そして鉄鋼技術の進歩によりフライホイールはその規模を拡大し、日本原子力研究所で開発された核融合実験施設には磁界コイル電源用の世界最大の規模である蓄積エネルギー 8 GJ (うち充放電 4 GJ) のフライホイール発電機が建設された⁽²⁾。ここでは既に 10,000 回以上の運転回数と 6 年間の運転実績がある。また、鉄道分野での実用例も報告されており⁽³⁾、フライホイールに関しては、必要な規模、建設技術、運転保守技術など産業用の応用に関して問題はなくなっている。

本論文では、この規模のフライホイールが産業用のエネルギー蓄積装置、力率、不平衡負荷、フリッカなどの電力障害に対して、有効無効電力、逆相電力あるいは基本波、高調波の区別なく補償可能な理想的な電力障害除去装置となることを示す。第 2 章ではフライホイールのエネルギー蓄積装置としての性質、制限について述べる。第 3 章ではフライホイール可変速発電機について制御法の提案、第 4 章では小型の電磁シミュレータによる電力コントロールおよび電力障害除去の実験結果を報告する。第 5 章では結果と実機への適用について考察している。

2. フライホイールによるエネルギー蓄積の特徴

〈2・1〉 他の蓄積要素との比較 ここでは、エネルギー蓄積要素に要求される事項を産業用を中心に考察する。検討の対象となる項目は以下のとおりである。

(1) 蓄積エネルギー量およびエネルギー蓄積密度

- (2) エネルギー蓄積効率またはエネルギーの損失
- (3) ピーク電力およびその制御性
- (4) 保守性および装置寿命
- (5) 周囲環境に与える影響、安全性および材料の無公害性
- (6) 建設コストおよび維持コスト

まず最初に蓄積装置で重要なのは、単位体積当たりのエネルギー蓄積密度である。この値が小さいと必要なエネルギー量を実現するための空間が大きくなり、実現が困難になる。フライホイールによる蓄積密度は材料の抗張力によって決まり、超高張力鋼を用いれば 100 J/cm^3 が得られる。これは 7 T の磁気エネルギー、20 気圧の圧縮空気の 5 倍に相当する。すなわち、フライホイールによれば同容量のエネルギー蓄積に要する蓄積要素の体積は 20% で済むこととなる。また、消耗する部品がないため寿命は最大応力と疲労で決まり、半永久的と考えられる。

〈2・2〉 エネルギー効率 次にエネルギー蓄積装置で重要なのは、電気と蓄積形態とのエネルギー変換効率およびエネルギー蓄積中の損失である。ここで、エネルギー効率 η_e を蓄積装置への入力エネルギーと出力エネルギーとの比と定義すると次式が得られる。

$$\eta_e = \frac{\eta_{in}}{\eta_{out}^{-1} + (TE_s/\tau_s E_{out})} \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau_s = E_s/P_{loss} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 τ_s は蓄積エネルギー E_s と蓄積装置の維持電力も含めた損失 P_{loss} との比であり、エネルギー蓄積時定数と呼ぶ。 E_{out} は出力エネルギー、 T は運転周期、 η_{in} 、 η_{out} はそれぞれ電気エネルギーから蓄積形態へおよび蓄積形態から電気エネルギーへの変換効率である。

(1) 式より、エネルギー蓄積効率 80% 以上を得るための最低限必要な条件は以下のとおりである。

(1) エネルギーの変換効率は充放電の 2 回かかるために 90% 以上であること。

(2) 規格化された運転周期 T/τ_s は 0.25 以下であること。

〈2・3〉 大形フライホイール 日本原子力研究所で核融合実験装置用に開発された大形フライホイールは 8 GJ の蓄積エネルギー量をもつ世界最大のフライホイールである。直径 6.6 m 100 t の円板が 6 枚結合され、600 rpm で回転する。そのときの発電機の主な損失は発電機風損、スラスト軸受け損など 5,500 kW もあるが、蓄積エネルギーが大きいためにエネルギー時定数は 1,450 s である。JT-60 の運転における運転効率の実測値は 10 分の運転周期において 60% であると報告されている⁽⁴⁾。この効率の低さは運転周期が規

格化された運転周期 (T/r_s) で 0.4 と大きいことによる。

〈2・4〉 鉄鋼分野への適用 フライホイールを鉄鋼分野に使用した場合にパルス電力の平準化を例にして検討する。熱間圧延の場合、運転周期は約 100 s、ピーク 85 MW、変動幅 100 % の電力が必要で、これを完全平準化するには 500 MJ 程度のエネルギー蓄積量を持つ電力平準化装置が必要とされる⁽⁶⁾。これにフライホイールを適用すると、運転周期が短いためエネルギー効率は大きく上がり、95 % のエネルギー効率が得られると試算される⁽⁶⁾。

3. 交流励磁の可変速フライホイール発電機

〈3・1〉 可変速フライホイール発電機 フライホイール発電機においてエネルギーの充放電を行うと、その蓄積エネルギーの変化に伴い発電機回転数が変動する。このため、通常の同期発電機を使用した場合、発電電圧の周波数変化は避けられない。さきに挙げた核融合装置用フライホイールの場合は、発電機出力がすべて整流器により直流に変換されるため周波数の変化は問題にならなかった。しかし、産業用として使用するには、フライホイールのエネルギー充放電により回転数が変化しても出力電圧、周波数が一定であると都合がよい。ここにきて、近年、揚水発電設備の高機能化を目的としてサイクロコンバータを使用した交流励磁の交流可変速同期発電電動機が製作され実用運転に入っている。東京電力・東芝は、矢木沢発電所に 85 MVA の可変速揚水施設を平成 2 年に実用化し⁽⁷⁾、関西電力・日立は大河内発電所に 395 MVA の可変速揚水発電設備を建設中である。

図 1 に交流可変速フライホイール発電機の基本構成を示す。いま、固定子に周波数 ω_1 の周波数の電力系統が接続され、回転子が電気軸速度 (等価 2 極機の軸速度) ω_r で回転する場合を考える。ここで図のように、回転子上に三相巻線をし、これに滑り周波数 $\omega_s (= \omega_1 - \omega_r)$ の電源を接続する。これより、回転子座標上で ω_s で回転する磁束ができる。いま、この磁束を固定子座標上から観測すれば、 ω_1 で回転する磁束となり、あたかも直流励磁された回転子が ω_r で回転しているのと同様な運転が行える。この構成で、励磁電源の周波数を軸速度の変化に従って調節すれば、固定子に現れる電圧は軸速度のいかにかわらず、一定となる。これが可変速交流励磁機の原理である。

〈3・2〉 交流励磁の可変速発電機のベクトル制御

この交流励磁機を電力系統と接続し、所定の固定子電流を流すには固定子座標からみた磁束の方向を、電

図 1 交流励磁可変速同期発電機システム
Fig. 1. AC-excited synchronous generator system.

図 2 交流可変速フライホイール発電機の構成
Fig. 2. Configuration of the variable speed flywheel generator.

源電圧ベクトルに対して 90 度に負荷角あるいは発電機内部位相角だけ移動した位置に維持する必要がある。図 2 に交流可変速フライホイール発電機の構成を示す。

発電機軸に取り付けられた角度検出器出力および電源電圧位相検出器出力を使用して、回転子座標上での磁束の基準位置、すなわち ds 軸を決定する。次に、この電圧位相で所定の有効電流が固定子に流れるように励磁変換器出力を制御し、磁束の大きさおよび角度を制御する。これにより、任意の軸速度での瞬時電力制御が実現できる。この発電機制御を電流制御型半導体変換器により行った例⁽⁸⁾はあるが、本研究では次の理由により電圧制御型励磁器とする。

- (1) 二次電圧を制御系の操作量とすれば、励磁器であるサイクロコンバータあるいは電圧形インバータの二次電流制御マイナーループが不要となる。これにより制御構成が簡単となり、二次電

流制御による応答の遅れ、一次二次制御系の干渉による不安定性の危険がなくなり、一次電流誤差を抑えるために高い帰還利得の設定が容易となる。

(2) 励磁変換器の制御が一次側の電圧電流で決定でき、二次側のセンサが不要。

ここで、励磁器には出力電圧・電流に含まれる高調波が少ないのが望ましい。また、短時間変動電力の平準化を行うためにはフライホイール発電機を負荷電力の急激な変動に追従させる必要があり、更に不平衡負荷に伴う逆相電力の補償、負荷から発生する高調波電力の吸収を要求する場合には、電源周期より十分短い時間で出力電力を制御する必要がある。

このため、励磁器出力の電圧の大きさ・位相が高速で制御可能である必要がある。例えば、フリッカのような急変する電力の平準化をするために、数 ms 以下の制御遅れで電力を制御すべきである。そこで、誘導電動機などの制御に使用されているベクトル制御を適用する。

交流励磁の可変速同期機に関しては、次の d - q 電圧方程式が成立する。

$$\begin{pmatrix} v_{1d} \\ v_{1q} \\ v_{2d} \\ v_{2q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 + pL_1 & -\omega_1 L_1 \\ \omega_1 L_1 & r_1 + pL_1 \\ pM & -\omega_s M \\ \omega_s M & pM \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ i_{2d} \\ i_{2q} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_1 M & pM \\ r_2 + pL_2 & -\omega_s L_2 \\ \omega_s L_2 & r_2 + pL_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ i_{2d} \\ i_{2q} \end{pmatrix} \quad (3)$$

ただし、 L_1, L_2, M はそれぞれ一次、二次の自己インダクタンスおよび相互インダクタンス、 r_1, r_2 は一次、二次の巻線抵抗である。また、 $v_{1d}, v_{1q}, v_{2d}, v_{2q}$ はそれぞれ一次および二次電圧の d 軸および q 軸成分、 $i_{1d}, i_{1q}, i_{2d}, i_{2q}$ はそれぞれ一次および二次電流の d 軸および q 軸成分である。

また、発電機の固定子有効電力 P_1 、無効電力 Q_1 および励磁巻線に供給される有効電力 P_2 、無効電力 Q_2 は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= 3/2(v_{1d}i_{1d} + v_{1q}i_{1q}) \\ Q_1 &= 3/2(v_{1q}i_{1d} - v_{1d}i_{1q}) \\ P_2 &= 3/2(v_{2d}i_{2d} + v_{2q}i_{2q}) \\ Q_2 &= 3/2(v_{2q}i_{2d} - v_{2d}i_{2q}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

本制御で要求されるのは高速な固定子電力の制御であり、軸トルクの制御ではない。そこで、用いる状態変数として一次鎖交磁束および一次電流を使用する。これにより、一次漏れインダクタンスの影響が除去されるばかりではなく、固定子に一定周波数、一定電圧の母線が接続されたときに、磁束がほぼ一定になるという利点がある。本同期機では一次鎖交磁束 $\lambda_{1d}, \lambda_{1q}$ は次式になる。

$$\begin{pmatrix} \lambda_{1d} \\ \lambda_{1q} \end{pmatrix} = L_1 \begin{pmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{pmatrix} + M \begin{pmatrix} i_{2d} \\ i_{2q} \end{pmatrix} \quad (5)$$

上式と(3)式から二次電流を消去すれば、制御解析に必要な電圧方程式が得られる。

$$\begin{pmatrix} v_{1d} \\ v_{1q} \\ v_{2d} \\ v_{2q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_1 \\ -\frac{L_1}{M}r_2 - pI_m & \omega_s I_m \\ -\omega_s I_m & -\frac{L_1}{M}r_2 - pI_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ \lambda_{1d} \\ \lambda_{1q} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} P & -\omega_1 \\ \omega_1 & P \\ * & \frac{r_2}{M} + p\frac{L_2}{M} \\ \omega_s \frac{L_2}{M} & \frac{r_2}{M} + p\frac{L_2}{M} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ \lambda_{1d} \\ \lambda_{1q} \end{pmatrix} \quad (6)$$

ただし、 I_m は $(L_1 L_2 - M^2)/M$ で表される漏れインダクタンスである。(5)、(6)式より準定常状態 ($P=0$) における二次等価回路を導出すると図3となる。図中、 e_{1q} および e_{1d} は一次誘起電圧 $j\omega_1(\lambda_{1q} - j\lambda_{1d})$ であり、 s は滑りである。ここで、基準軸である d 軸を一次鎖交磁束上に置き、 $\lambda_{1q}=0$ とする。また、一次抵抗による電圧降下が十分小さいと近似すれば、 $v_{1d}=0$ である。ここで、母線電圧 v_{1q} および周波数 ω_1 が一定であるとすれば $\lambda_{1d}=\text{const}$ であり、 $p\lambda_{1d}=0, p\lambda_{1q}=0$ となる。以上の近似を導入し、発電機出力および励磁器出力電圧を一次電圧、電流で表すと次式となり、励磁器出力電圧の基準値が得られる。

図3 交流励磁ベクトル制御同期機の等価回路
Fig. 3. Equivalent circuit of the AC-excited generator.

$$\begin{pmatrix} v_{2d} \\ v_{2q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r_2}{\omega_1 M} v_{1q} \\ \frac{\omega_s L_2}{\omega_1 M} v_{1q} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{L_1}{M} r_2 & \omega_s l_m \\ -\omega_s l_m & -\frac{L_1}{M} r_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (8)$$

上式より、目的とする電力 P_i, Q_i から固定子電流 i_{1d}, i_{1q} を求め、励磁器出力電圧を制御し、発電機出力を制御する。ただし、制御対象が一次電流のため、等価回路内電流は一次電流、および一次側換算二次電流 ($i_{2q} - j i_{2d}$) とした。ただし、上式の電圧を励磁器から出力しただけでは、さきの近似およびパラメータの変動、制御誤差のため必要とする一次電流が得られない。このため、何らかの帰還制御が必要である。

4. 交流励磁フライホイール発電機実験装置による実験

＜4・1＞ 実験装置の構成 実験装置の構成を図4に示す。また、使用した巻線形誘導機の定格および定数は表1に概観を図5に示す。励磁器として簡単のためダイオード整流器+IGBTインバータを使用し、回転機からの再生電力を処理するための直流抵抗を設けた。

〈4・2〉 フライホイール発電機制御回路 発電機

一次電圧を PT により検出し、その位相角 θ_1 を演算によって求める。また、電動発電機の軸に取り付けた角度センサ（レゾルバ）から軸角度 θ_r および軸速度

図 4 実験装置の構成

Fig. 4. Configuration of experimental system.

ω_r を得る。これから、滑り角速度 ω_s および回転子からみた d 軸の角度 θ_s を得る。

入力された有効電力指令値 P^* ，無効電力指令値 Q^* から一次電流指令値 $i_{iq}^* - ji_{id}^*$ を求める。これに待機中の軸速度 ω_{r0} を維持するために空転損の計算値 G_r および帰還項 K_r を付加して最終電流指令値 $i_{iq0}^* - ji_{id0}^*$ を得る。その後，図 3 に従って一次抵抗降下の補正，滑りによる一次二次換算を行い，二次回路励磁電流の考慮，二次インピーダンス降下補正により二次電圧のフィードフォワード項を得る。これに，一次電流検出値 $i_{iq} - ji_{id}$ による PD 制御項 $K_c + sT_c$ および滑りを考慮した比例制御 K_i を加え励磁器出力電圧指令値を得る。この電圧指令値に基づき IGBT インバータをキャリア周波数 3 kHz で PWM 制御する。

＜4・3＞ 発電機のステップ応答 まず、発電機の有効電力および無効電力の制御性を調べるために、それぞれに関してステップ応答を調べた。図6は軸速度が1,500 rpmのときに有効電力指令値を周期1秒で

表 1 巻線型誘導機の定数

Table 1. Specifications of wound rotor IM.

定数
容量：4 kW，一次電圧：200 V，一次電流：15 A 二次電圧：600 V，巻線比：2.88，周波数：50 Hz 極数：4，回転数：1,200～1,800 rpm
定数
一次抵抗 r_1 ：0.353 Ω ，二次抵抗 r_2 ：4.15 Ω 一次自己インダクタンス L_1 ：136 mH 二次自己インダクタンス L_2 ：1,040 mH 相互インダクタンス M ：352 mH 等価漏れインダクタンス l_m ：8.2 mH 慣性質量：0.17 kgm ² 蓄積エネルギー：12.2 kJ (at 1,800 rpm) 放出可能エネルギー：6.8 kJ

図 5 実験装置概観

Fig. 5. Overview of experimental system.

図 6 有効電力のステップ応答
Fig. 6. Step response of active power.

図 7 有効電力のステップ応答の拡大図
Fig. 7. Fast sweep of step response (Fig. 6).

±4 kW にステップ的に変化させた。そのときの有効電力の応答である。また変化付近を拡大したのが図 7 である。

図 6 において、有効電力は指令値と 300 W の差を保ちつつ高速に追従している。両者の差 300 W は、回転数 1,500 rpm 付近を維持するために制御回路が付加した電力である。また図 7 から、有効電力の指令値のステップ変化に対して 3 ms で追従している。有効電力の変化直後に 5% のオーバシュートが認められるが、非振動的であり問題ない。図において無効電力には変化が見られない。これによりベクトル制御による有効無効電力の独立制御が実現していることが確かめられた。

図 8 無効電力のステップ応答
Fig. 8. Step response of reactive power.

図 9 無効電力のステップ応答の拡大図
Fig. 9. Fast sweep of step response (Fig. 8).

次に、無効電力指令値を周期 1 秒で±4 kVar 変化させて制御性を調べた。結果を図 8 に、変化の拡大を図 9 に示す。無効電力制御は同期機界磁制御に相当し励磁器出力最大電圧の制約を強く受ける。このため、有効電力制御より若干応答が劣化するものの、5 ms 以下で追従している。

更に、これらの実験を通してここで提案された制御法によって有効電力と無効電力を全運転速度範囲で独立かつ高速に制御できることが確かめられた。

〈4・4〉 フライホイール発電機による負荷平準化の実験 この実験のために、前述のフライホイール発電機に変動負荷として 4 kW 三相白熱電球負荷を使用した。図 10 にその回路図を示す。

負荷電力 P_L および、電力 P_S をそれぞれ検出し、LPF (低域フィルタ) および差動アンプを通して各

図 10 ランプ負荷の実験回路
Fig. 10. Experimental circuit of lamp load.

電力の変動値を計算する。そして負荷電力変動を電動発電機の電力指令値のフィードフォワード項とし、電源電力の変動量を微分比例要素を通して負帰還項とした。ここで、LPFの時定数はフライホイール発電機の慣性定数(蓄積エネルギー/定格出力)が3.1秒であることから十分長い20秒とした。図11に電球負荷を2秒周期、デューティ50%で点灯、消灯を繰返したときの負荷電力、電源電力および回転数を示す。図において、発電機は点灯時には白熱灯負荷であるために突入電流があり、このため負荷電力は定常値の2倍である10kWに達している。このような過渡電力は母線電圧の低下やフリッカを起こす原因である。これに対して補償後の電力は、負荷の平均電力である2kWと発電機の空転損失分300Wの2.3kW一定に保たれている。このときフライホイールの充放電エネルギーは2kJであり、これに伴う回転数の変化は100rpmと少ない。

〈4・5〉 不平衡負荷の平準化実験 最後に、このフライホイール発電機システムによる電力障害除去装置としての有効性を示すために、白熱電灯の1相分を切り離し、不平衡負荷電力を発生させ、その電力変動を平滑化させた。

図12に不平衡負荷を1秒周期で点灯消灯したときの負荷電力、電源電力を示す。負荷電力には、点灯時に負荷の不平衡に起因する100Hzの脈動が見えるが、電源電力では、フライホイール発電機システムにより電力脈動が吸収、平滑化され100Hzの負荷変動は完全に消すことができた。以上の実験から、ベクトル制御を適用したフライホイール可変速発電機によれば、負荷の急激な有効無効の変動はもちろん、負荷の不平衡に起因する高調波電力にいたるまで補償可能な極めて高性能な電力平準化装置を得ることができることがわかった。このフライホイール装置は負荷側から見れば系統側から入る電力障害、例えば高調波あるい

図 11 負荷、電源電力および回転数の変化
Fig. 11. Variations of load, input power and rotating speed.

(a) 負荷電力、電源電力の変化

(b) 点灯時の負荷電力、電源電力の変化

図 12 不平衡負荷の平準化実験
Fig. 12. Experimental results of load leveling for unbalanced load.

はフリッカを負荷側に侵入させないフィルタとして利用することができる。

5. ま と め

本論文では、フライホイール可変速電動発電機システムについて、ベクトル制御を適用して次の結果を得た。

(1) フライホイールの回転数を制御しながら発電機電力制御が可能になった。

(2) 電力制御が有効・無効独立に 5 ms 以下の応答で可能になった。

(3) ランプ負荷を ON/OFF させての負荷変動を平準化させることができた。

(4) 不平衡負荷のような高速電力変動も平滑化できることを示した。

このようなエネルギー蓄積装置の導入効果は、無停電電源装置の導入効果と通ずるところがある。無停電電源が停電のないところでは不必要であるのと同様に、容量の大きな電力システムでは不要である。しかし、産業応用分野では、より信頼性のある電力システムを求めると同時に、電力パワーのより大きな変動をとまなう利用が計画されている。このフライホイール可変速システムを供給側で用意するか、利用側で用意するかは議論のあるところであるが、いずれにしても 21 世紀の電力システムは電力の発生から消費までを一括管理される合理的運用が不可欠である。

最後に、本論文をまとめるにあたり、日本原子力研究所 JT-60 第一試験室 大森憲一郎氏、新日本製鉄(株)技術研究所電子制御研 谷本光生氏に有益なデータや議論をいただきました。この場を借りて感謝いたします。

(平成 4 年 10 月 21 日受付, 同 5 年 5 月 21 日再受付)

文 献

- (1) 後藤：電機概論 (昭 56) 丸善
- (2) T. Matukawa, M. Kanke, R. Shimada, et al.: "A 215MVA Flywheel Motor-generator with 4GJ Discharge Energy for JT-60 Toroidal Field Coil Power Supply System": *IEEE Trans. Energy Conv.*, EC-2, 262 (1987)
- (3) K. Ikeda, Y. Yonehata, T. Asada, Y. Hosokawa, S. Murakami: "VVVF Drive of a Large Capacity Flywheel Generator-Motor for a DC Railway Substation", *Proc of IPEC-Tokyo*, Vol. 1, 577 (1990)
- (4) 大森, 他: 「JT-60 トロイダル磁場コイル電源用フライホイール付き発電機の運転効率」, 昭 60 プラズマ・核融合学会 全大
- (5) 石津・内田・大森・嶋田他: 「産業用エネルギー蓄積装置」, 電学論 D, 109, 705 (平成-10)
- (6) 嶋田・谷本・大森・松川: 「核融合電源用フライホイール付電動発電機の短周期ロードレベリング装置への適用」, 平成電気学会全大, No 1505
- (7) 勝家・阿部・柳沢・向井: 「可変速揚水発電システムの開発

研究」, 東芝レビュー, 42, 11 (昭 62)

- (8) 高橋・西島羽: 「回転二次励磁方式を用いた万能障害電力補償装置」, 電学論 B, 107, 73 (昭 62-2)

力 石 浩 孝 (正員)

昭和 39 年 3 月 20 日生。平成 4 年東京工業大学大学院博士過程修了。同年文部省核融合科学研究所に入所, 現在に至る。核融合装置用超伝導コイルおよび駆動用直流電源の開発に従事。

有 満 稔 (正員)

平成 3 年 3 月千葉大学工学部電気電子工学科卒業。5 年 3 月東京工業大学大学院修士課程修了。同年 4 月ソニー国分(株)入社。現在, 同社 CCD 開発センタ一勤務。

王 毅 (非会員)

平成 4 年 3 月東京工業大学大学院電気工学修士課程修了。同年 4 月古河電気工業(株)入社。電力事業部被覆線製造部生産技術課に配属, 現在に至る。

上 村 敏 (学生員)

平成 4 年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業。同年同大学院修士課程進学, 現在に至る。主として, 移相器を用いた電力制御装置の研究に従事。

嶋 田 隆 一 (正員)

昭和 23 年 1 月 31 日生。50 年東京工業大学大学院博士課程修了。同年日本原子力研究所入所, 核融合の研究に従事。63 年 4 月東京工業大学電気電子工学科助教授, 平成 2 年 3 月教授, 同年 5 月原子炉工学研究所入所, 現在に至る。工学博士。大電流工学, 核融合プラズマの制御, 大電力システムの研究に従事。