論文誌テンプレート^{消さないでください} Ver, 2011, 02, 22

論

文

複数台並列運転を想定した

小型・汎用フライホイール電力平準化システムの実機検証

正員伊東 淳一*a) 学生員田中 賢太* 非会員 松尾 宗哉* 非会員 山田 昇*

Experimental Verification of General-Purpose Flywheel Energy System for Multiple Parallel Operations

Jun-ichi Itoh*a), Member, Kenta Tanaka*, Student Member, Soya Matsuo*, Non-member, Noboru Yamada*, Non-member

(20XX 年●月●日受付, 20XX 年●月●日再受付)

This paper describes the performance of a power-leveling system with a 3.0-MJ, 9500-r/min flywheel energy storage. For the purpose of cost reduction, this system uses low-cost structures for the flywheel and the components used in the general-purpose products. Time delay of the measurement circuit limits the power control performance. To overcome this problem, a time delay compensation scheme based on the Smith predictor is used in the power control to improve the control performance of power regeneration. Consequently, the setting time is reduced by 40% as compared to the case when the compensator is not used. In addition, the effectiveness of power-leveling control in a prototype is evaluated experimentally. From the harmonics analysis, it was confirmed that power fluctuation was suppressed up to 84.6%. Furthermore, analysis of the vibrations during the power-leveling operation is carried out using an acceleration sensor. From the results, it was confirmed that the vibration levels of the prototype are sufficiently low.

キーワード:フライホイール,電力平準化,無駄時間補償,振動解析 **Keywords**: Flywheel, Power leveling, Time delay compensation, Vibration analysis

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り,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

a) Correspondence to: Jun-ichi Itoh. E-mail: itoh@vos.nagaokaut.ac.jp * 長岡技術科学大学 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 Nagaoka University of Technology, 1603-1, Kamitomioka, Nagaoka, Niigata 940-2188 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 特性劣化もほぼなく,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、高いエネルギー貯蔵 量を実現するために磁気浮上を用いた軸受による超高速回 転型のフライホイールが研究されている。しかし、磁気軸 受を適用するために必要なバランス取りが非常に難しく、 制御システムが複雑になるという問題がある。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⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。また、発電源に 応じた貯蔵エネルギー及び補償電力を設計するため、補償 電力量の異なる発電源には対応し難いという欠点がある。

そこで、本研究では電力変動の補償を想定する発電源に 対して、小容量のフライホイールを複数台並列に組み合わ せる電力平準化システムを想定し,これに適したフライホ イールシステムを提案する。

表1に提案フライホイールシステムと従来の専用設計が 必要なシステムの比較を示す。提案システムは,汎用モー タやボールベアリング,汎用インバータを採用しているた め,専用設計が必要な従来システムと比較して簡単かつ汎 用的なシステムを構成可能である。また,小容量のフライ ホイールを複数台組み合わせる場合,様々な補償電力,貯 蔵エネルギーを実現できるため従来の専用設計が必要なシ ステムと比較して拡張性が非常に高い。また,ベースとな る小容量のフライホイールを組み合わせるだけであるた め,発電源の容量に応じた専用設計が不要であり設計コス トの削減が可能である。

本論文では、次の3つの評価を行い、提案システムの有 用性を示す。

(1)応答性能の評価

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デ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,安価なトランデューサ 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 スミスの無駄時間補償を適用し制御性能の改善を試みる。

(2)電力平準化効果の評価

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。

(3)振動特性の評価

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2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, 10,000 r/min 以下の回転数領域で電力補償に十分な 3MJ のエ 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。 本提案システムは, 数百 kW 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数秒から数百秒 程度の短周期電力変動の補償を想定しており,この場合, 複数台の並列運転で運用する。提案システム 1 台あたりの 補償能力は 30kW, 100 秒であり, 複数台のフライホイール を並列に接続することにより自然エネルギー発電システム の発電容量に応じた補償能力を実現することが可能であ 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

| Evaluation item | | Specially designed | Proposed Flywheel |
|-----------------|-------------------|--|---|
| | Bearing | Magnetic Bearing | General purpose Ball bearing |
| | Motor | Special high speed motor | General purpose motor |
| Equipment | Inverter | Exclusive design is essential | Exclusive design is not required |
| | Controller | Exclusive design is essential | It is possible to use inexpensive microcontrollers |
| Performance | Expandability | × (Change of specification is impossible) | O (Specification can be changed by number of parallel) |
| | Energy Density | 0 | △ (Rotation speed is limited by bearing) |

Table 1. Comparison of the proposed sytem and conventional system.



Fig.1. Photograph of the prototype Flywheel System. This system adopts general purpose ball bearings in order to reduce costs and improve performance because the rotational speed is suppressed within 9500 r/min.

| Table 2. S | pecification | of the | Flywhee | l system |
|------------|--------------|--------|---------|----------|
| | | | | |

| 1 | <i>.</i> | |
|-------------------------|-------------------------|--|
| 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 | 17.2 kJ/dm ³ | |



Fig.2. Configuration of the Flywheel system including the accessories parts.

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 TL 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。現在,一般的な組み込みシステムでは 32bit 構 成, CPU クロックの最大値 200MHz 程度の高速処理が可能 なマイコンを使用しており, AD 変換の分解能も 12bit 程度 と高性能である。一方,提案システムで採用する PIC マイ コンは 8bit 構成, CPU クロックの最大値は 20MHz, AD 変 換の分解能は10bitであり処理性能は一般的なマイコンと比 較して劣っている。しかしながら、価格は一般的な組み込 みシステムのマイコンと比較して 1/10 程度である。本提案 システムでは汎用インバータの V/f 制御によりモータを駆 動しており、コントローラで処理すべき演算は電力検出値 から速度指令値への変換のみである。したがって、本提案 システムでは演算能力は低いが非常に安価なマイコンが採 用可能である。

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,提案システム で想定する複数台の並列運用では,真空ポンプやオイルク ーラを共用できるため,大きなコストアップ要因にはなら 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。

 $E = \frac{1}{2}J\omega^2 \tag{1}$

ただし, 慣性モーメント J[kgm²], 回転体の角速度 ω[rad/s] である。

ー方,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。

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

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。したがって,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。ここで、一制御周期中に変化するフライ ホイールの回転速度は微小であると考え、一定値 ω。として 扱う。

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

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。

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

〈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 トランデ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,高速応答化するために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。

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

このように無駄時間要素が含まれる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⁽⁶⁾。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。









(b)With smith predictor.

Fig.3. Block diagram of time delay compensation scheme based on Smith predictor. This compensation eliminates the effect of delay time by estimating the output of the controlled object G(s) after the lapse of delay time.

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2kW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。また、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 に無駄時間を補償しない場合と、スミス法による無 駄時間補償を適用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 おり、整定時間 Ts は 18.7 秒であることがわかる。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せず、整定時間は 11.2 秒となり、 スミス補償器を適用しない場合と比較して 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⁽⁷⁾。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パを使用 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 パ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。

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 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。図 7(b)において,系統電力を P_{grid},フラ イホイールによって補償される系統電力の理論値を P_{grid_ref} とする。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。



Fig.4. Step response of the regeneration power on the experimental results. The experimental conditions are as follows; the steady rotation speed is 6000 r/min and the load is changed from 0.0 kW to 2.0 kW.



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



Fig.6. Configuration of the experimental system for the power fluctuation compensation. By using the step down chopper, this system simulates the power fluctuations which caused PV.



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

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



Fig.8. Harmonic analysis during the power fluctuation compensation control. The experimental conditions are similar to Fig. 9.

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 に変動補償前後の周波数解析結果を示す。変動補償 前は 0.004 Hz~0.02 Hz 付近に大きな周波数成分が生じてい るが,平準化動作後は周波数成分が最大で 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 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 ャ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 転が可能な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⁽⁸⁾。

回転子軸心まわりの質量分布の不平衡による振動
 軸継手で接続された回転軸の中心線のずれによる振動
 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⁽⁹⁾。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⁽¹⁰⁾。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 こで周波数解析を行うことで, これらの要因を分析する。

図11に振動速度の周波数解析結果を示す。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 に振動加速度の周波数解析結果を示す。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,振動加速度の周波数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⁽¹¹⁾。

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

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。

周波数解析結果より、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



Fig.9. Mounting position of the accelerometer.



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

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⁽¹²⁾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



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



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

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を行い,電力変動補償装置 としての特性を明らかにしていく。

| 文 | 献 |
|---|---|
| | |

- 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)
- (2) 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)
- (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) F.N.Werfel, U.Floegel-Delor, T.Riedel, R.Rothfeld, D.Wippich, B.Goebel, G.Reiner, N.Wehlau : "A Compact HTS 5 kWh/250 kW Flywheel Energy Storage System", IEEE Transactions on Applied Superconductivity,

Vol.17, No.2, pp.2138-2141(2007)

- (5) M. Strasik, P. E. Johnson, A. C. Day, J. Mittleider, M. D. Higgins, J. Edwards, J. R. Schindler, K. E. McCrary, C. R. McIver, D. Carlson, J. F. Gonder, and J. R. Hull: "Design, Fabrication, and Test of a 5-kWh/100-kW Flywheel Energy Storage Utilizing a High-Temperature Superconducting Bearing", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.17, No.2, pp.2133-2137(2007)
- (6) 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)
- (7) Bingchang Ni, C.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)
- K.Izawa, S.Ichikawa : "Development Report for High Speed Flywheel", JAXA Research and Development Report(2008)
- (9) H.Kanki, K.Adachi, M.Uratani, T.Kawada: "Study of influence of misalignment to rotor vibration", The Japan Society of Mechanical Engineers Kansai Branch, Vol.84, pp.12-24(2009)(in Japanese) 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, Vol.84, pp.12-24(2009)
 (10) H.Hiroki, T.Sato, M.Taguchi, J.Okamoto, K.Nagahashi: "Measuament
- (10) H.Hroki, I.Sato, M. Iaguchi, J.Okamoto, K.Naganashi: Measuament method and calculation method of motor exciting force", Dynamics and Design Conference 2000, pp.217-221(2000)(in Japanese) 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)
- (11) A.Igarashi, "Noise of Rolling Bearings and Countermeasures", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.80, pp. 1167-1171(1977)(in Japanese) 五十嵐昭男:「ころがり軸受の騒音とその対策」,日本機械学会誌, Vol.80, pp. 1167-1171(1977)
- (12) S.Ishizu, E.Uchida, K.Omori, R.Shimada, I.Takahashi, K.Tanaka, M.Tanimoto, Y.Jifuku, H.Yatsuboshi: "Energy storage system for Industrial Application", *IEEJ Trans. 1A*, Vol.109, No.10, pp.705-716(1989)(in Japanese) 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

学論 D, Vol.109, No.10, pp.705-716(1989)



 (正員) 1972年1月6日生まれ。1996年3月, 長岡技術科学大学大学院工学研究科修士課程
 修了。同年4月,富士電機(株)入社。2004年4月,長岡技術科学大学電気系准教授。現在に至る。主に電力変換回路,電動機制御の研究に従事。博士(工学)(長岡技術科学大学)。2007年第63回電気学術振興賞進歩賞受賞。IEEE 会員。

田中賢太



(学生員) 1989年7月7日生まれ。2012年3 月,長岡技術科学大学卒業。同年4月同大学大 学院工学研究科修士課程電気電子情報工学専 攻に進学。現在に至る。主に電力変換回路に関 する研究に従事。

松尾宗哉



(非会員) 1988 年7月25日生まれ。2013年3 月,長岡技術科学大学大学院工学研究科修士 課程機械創造工学専攻修了。現在に至る。主 にフライホイールに関する研究に従事。

山田昇



(非会員) 1972 年 10 月 18 日生まれ。1999 年 9 月,東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学 専攻博士後期課程修了。同年 11 月,同専攻助 手。2005 年 4 月,長岡技術科学大学機械系准 教授。現在に至る。主にエネルギー変換,再 生可能エネルギー利用の研究に従事。博士(工 学)(東北大学)。IEEE 会員。