

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21686026

研究課題名（和文） 交流直接形電力変換器による一体型交流エネルギーキャッシュシステムの開発

研究課題名（英文） Development of Integrated flywheel energy chase system using AC to AC direct power converter

研究代表者

伊東淳一（ITOH JUNICHI）

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：90377218

研究成果の概要（和文）：

本研究は、一体型交流エネルギーキャッシュシステムの開発をめざして、①交流直接形電力変換器の開発、②フライホイールの高速設計法と磁気軸受制御法の確立、③電気実装の問題点を取り扱う解析技術の開発を行った。その結果、①では、同期 PWM 方式を適用することで、交流直接形電力変換器の高速化が達成できた。また、交流直接形電力変換器の入力を単相に接続する場合、コンデンサの電圧を制御することで、電力脈動を補償できることを確認した。②では、フライホイールの小型、高効率化を目的に使用する磁気軸受では、軸の支持位置により収束応答が異なることを確認し、軸振動を高速に制御すること軸支持ができることがわかった。③では、高密度化および高効率化を実現するため、交流直接形電力変換器と同様の構造を持つアクティブ中性点クランプ回路を用いて損失解析を行い、定式化した。その結果、1kW 定格運転時の理論損失と実機の損失の誤差率 2%であり、理論式の妥当性を確認した。

以上の研究成果より、交流直接形電力変換器とフライホイールを用いた一体型交流エネルギーキャッシュシステムが実現できることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

This report describes the outcomes of the study on energy chase system using flywheel and direct converter. The main contents are as follows, (i) developing the direct AC to AC converter, (ii) establishing the design method of high speed flywheel and control strategy using the magnetic bearings (iii) establishing the analyzed technique for the electrical circuit and packaging. The main results are as follows; (i) a PWM method for the direct AC to AC converter synchronous was developed. Additionally, the power ripple can be compensated by controlling the capacitor voltage in case that the direct AC converter is connected one-phase grids. According to (ii), it was confirmed that the convergent response of position error depended on the support position of axis in the magnetic bearing. Note that the aim for applying the magnetic bearing is to become high-efficiency and down-sizing. Thus, it is necessary to compensate the axis oscillation. On the other hand, in (iii), the converter loss was analyzed by numerical equation in order to achieve high power density and high-efficiency. As a result, error rate between the theoretical loss and the measurement loss is 2%.

As these results, it is confirmed that all-in-one AC energy cash system by direct AC to AC converter and Flywheel can be accomplish.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2010 年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2011 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総計	20,400,000	6,120,000	26,520,000

研究分野：電力変換

科研費の分科・細目：

キーワード：フライホイール，マトリックスコンバータ，エネルギーキャッシュシステム，同期 PWM 方式，アクティブバッファ，磁気軸受，損失解析，高速制御，電力平準化

### 1. 研究背景

現在，我が国の電気消費割合は一次エネルギーを含めた全エネルギー消費量の23%(約1兆 kWh)である。さらに，2050年では電気消費割合が50%に達すると予想され，さらなる省エネやエネルギーの有効利用が強く望まれている。しかし，電力需要側で需要量が急に変化すると，電力供給量も大きく変化し，発電所の利用効率は悪化する。そこで，エネルギー貯蔵要素を組み合わせ，電力需要と電力供給の差を自動的にうめる高速なエネルギーキャッシュシステム(ECS)が必要である(図1参照)。

エネルギーを貯蔵するには，バッテリー，フライホイール(FW)などが挙げられるが，それぞれ異なる特徴を持つ。バッテリーは，エネルギー密度が高く電力補償量は大きい，充放電に化学反応を伴うため，高サイクルの充放電に制約があり寿命も短い。一方，FWは，消耗部品がFWとモータ/発電機の軸受のみであるため長寿命であり，短時間の充放電の繰り返しにも強い。また，電力補償時間は短い，応答が高速であるため変動周期の速い微小変動成分の抑制に適している。

### 2. 研究の目的

これまで国内外で貯蔵要素のエネルギー密度，電力変換器のパワー密度，変換回路構成は個別に議論されている。しかし，以上をまとめて議論している研究はなく，システムの最適な設計を行っていない。そこで，本研究では，電力変換器とエネルギー貯蔵要素を統合し，一体型高密度ECSを開発することを目的とする。ここで，エネルギー貯蔵要素は上述の利点を持っているFWを用いる。したがって，本研究では高効率な電力変換器，高速FWおよび制御方法の開発を行い，一体型高密度ECSの妥当性を確認する。

### 3. 研究の方法

具体的には，以下のように分割して研究を行なった。①単相三相系統と無効電力補償に対応する交流直接形電力変換方式の開発，②FWの高速設計法と磁気軸受制御法の確立，③電気実装と機械実装の双方の問題点を取り扱う解析技術の開発である。最後に，④一体化設計を行い，高密度化の視点から最適設計を行う。以上より，一体型ECSの妥当性を評価し，課題点を抽出する。

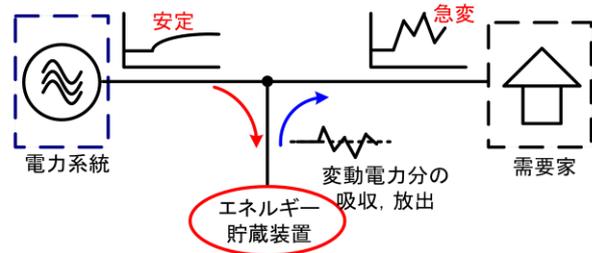


図1 エネルギーキャッシュシステム

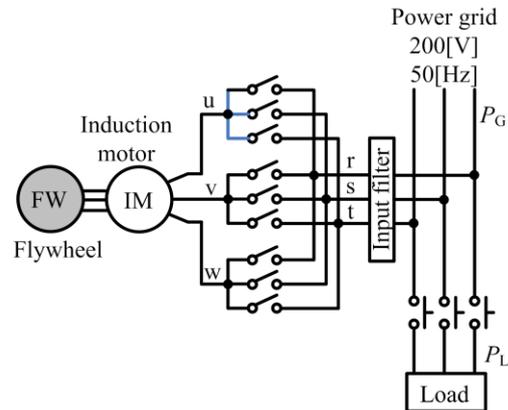


図2 交流直接形電力変換器

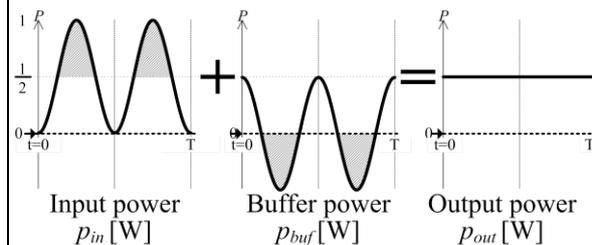


図3 単相の場合の脈動抑制原理

#### (1)交流直接形電力変換方式の開発(図1)

従来のインバータでは電解コンデンサを有するため，寿命，耐熱性，大きさに問題があり，FWと一体化できない。そこで，本研究では，交流直接形電力変換方式の一つであるマトリックスコンバータ(MC)を開発する。

図2にMCの回路構成図を示す。従来，MCは1kHz以下の出力周波数しか検討されておらず，高速化は困難である。本研究では，MCを高速化するため，同期PWM方式を開発する。

一般に，MCの入力は三相であるが，家庭に設置することを考えると，単相にも対応可能な制御方式を開発する必要がある。単相の場合，電圧ゼロ点が存在するため，電力に脈動が発生する。したがって，その対策を講じる必要がある。

図3に単相接続の場合に発生する脈動の抑制原理を示す。出力側は三相平衡負荷であれば，負荷電力が一定であり，入力電力の脈動を打ち消すためには，バッファ瞬時電力  $p_{buf}$

を制御する。つまり、バッファとして用いるフィルタコンデンサの電圧を制御して、電圧ゼロ点を補償する制御法を開発する。

一方、FWは短時間の充放電の繰り返しに強いが、バッテリーと比較すると、パワー密度が低い。そこで、高密度を実現するためには、バッテリーと組み合わせて電力補償を行う。さらに、具体的には、電力補償を高速帯域と低速帯域に分離し、低速分の電力変動をバッテリーが、高速帯域をFWが補償する。これにより、電力を自動的にキャッシュする制御法を開発する。

### (2) FWの高速設計法と磁気軸受制御法の確立

FWを小型化、高速化するためには、軸受けが問題となる。そこで、磁気軸受を適用する必要があるが、軸振動が発生するため、適用できない。よって、磁気軸受を適用した際の軸振動をリアルタイムで検出し、補償する。具体的には、FPGAを用いて高速制御を行う。

図4に1軸の磁気軸受を採用したFWの構成図を示す。本研究ではまず、1軸の磁気軸受を用いて軸振動を解析する。

また、ECS用のFWを試作し、性能評価を行う。さらに、課題を抽出し、FWの最適仕様検討および試作を行う。

### (3) 電気実装の問題点を取り扱う解析技術の開発

高密度化および高効率化を実現するには、損失の発生特性をよく把握しなくてはならない。そこで、変換器やFWの損失特性を検討する手段として損失シミュレーションと数式による損失解析があげられる。損失シミュレーションの場合、ある特定条件での損失は確認できるが、損失最小点の検討をする場合には何度もカットアンドトライが必要である。よって、変換器の最適設計の観点から考えると非常に煩雑である。一方、数式を用いた理論解析の場合、式が導出できれば、デバイスパラメータや回路パラメータに応じて、容易に損失が求められるため、最適化の検討がしやすくなる。これによって、例えば、体積の検討や、高効率・高パワー密度等の要求を満たす変換器やFWを設計する際に非常に有用と考える。そこで本研究では、MCと同様の構造を持つアクティブ中性点クランプ回路(ANPC)を例に取り損失解析技術を確立した。

図5に5レベルANPC(単相)の回路構成を示す。5レベルANPCインバータ回路は一相あたり8つの素子と3つのキャパシタで構成される。ANPC回路の特徴は、①電源側のスイッチング素子群Cell2( $S_5 \sim S_8$ )はCell1( $S_1 \sim S_4$ )のスイッチに比べ2倍の耐圧が必要となるが、Cell2のスイッチング周波数は出力周波数と同じ周波数であるのでCell2のスイッチング損失はほとんど発生しないこと、

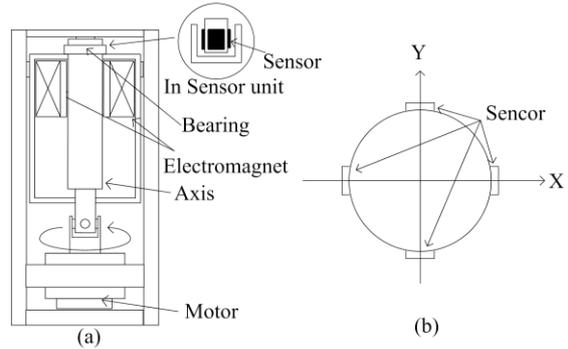


図4 磁気軸受けを採用したFWの開発

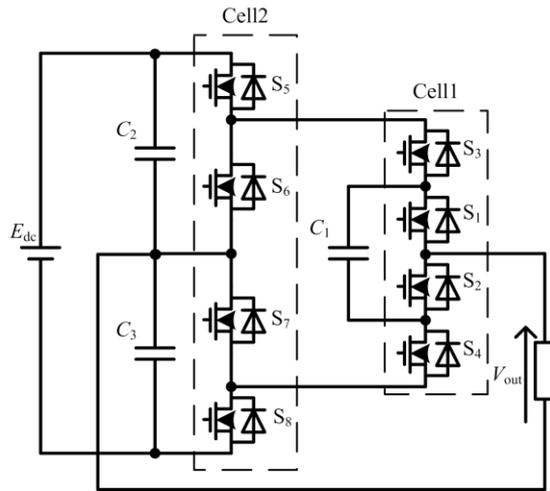


図5 ANPCの回路構成

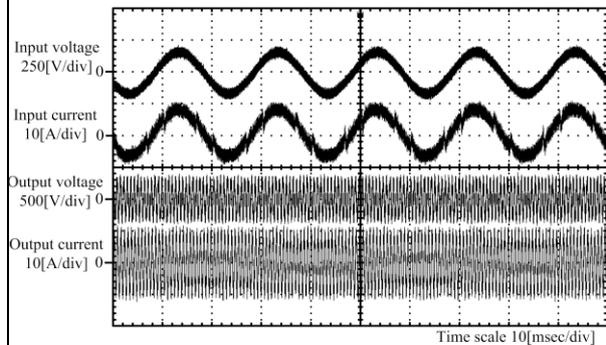


図6 MCの高周波動作波形

②直流平滑キャパシタ $C_2$ 、 $C_3$ およびフライングキャパシタ $C_1$ の電圧が制御可能なので電圧バランス回路が不要であることがあげられる。

## 4. 研究成果

### (1) 交流直接形電力変換方式の開発

#### (1.1) マトリックスコンバータを用いたモータの駆動特性評価

図6にMCの高周波動作波形を示す。ここで、実験条件は、入力電圧200V、入力周波数 $f_{in}=50$ Hz、出力周波数 $f_{out}=1432$ Hz、R-L負荷12.5W、1mH(49%)、入力フィルタカット

オフ 1 kHz, 制動係数 0.2 とした。図 5 より, 入力電流が力率 1 の正弦波に制御できていることがわかる。入力電流の三相不平衡が改善されている。以上より, 同期 PWM 方式を適用することで, MC の高速化が達成できた。

### (1.2) 単相電力脈動を補償する方法の確立

図 7(a)に従来回路において直流中間コンデンサを小容量の 50  $\mu$ F とした場合の実験結果を示す。波形は上から入力電圧  $v_{in}$ , 入力電流  $i_{in}$ , U-V 間出力線間電圧  $v_{uv}$ , U 相出力電流  $i_u$  である。実験結果より, 入力電圧がゼロクロス時に出力電圧, 電流波形が大きく歪み, 電力脈動の影響が発生していることがわかる。

図 7(b)に, 提案回路で, 同様にコンデンサ容量 50  $\mu$ F を使い, コンデンサ電圧を変動させた場合の実験結果を示す。実験結果より, 従来回路で発生していた出力波形のひずみは, 提案方式によりバッファで補償され, 電力脈動の影響が現れていない。また, 入力側は力率 1 の正弦波の電流が得られている。以上より, 本補償法を用いれば, MC は単相にも対応可能である。

### (1.3) 電力変動を補償する FW の動作検討

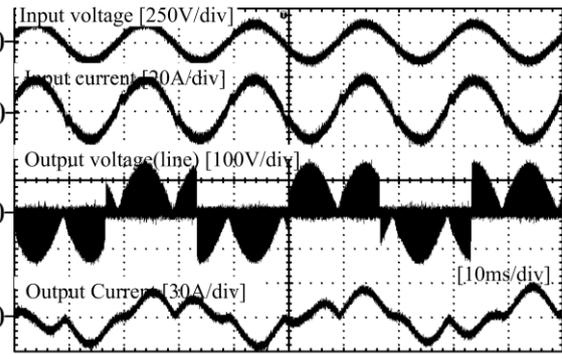
図 8 に FW およびバッテリーが自動的に電力をキャッシュする様子(実験結果)を示す。ここで, 系統の電力変動を模擬するために, 太陽電池の 1 日の発電電力パターンを使用した。結果より, 太陽電池の電力変動  $P_{solar}$  に対して, 電力変動制御により電力平準化後の発電電力  $P'_{solar}$  が一定に制御されていることがわかる。また,  $P_{bat}$  に長周期の変動が見られ,  $P_{FW}$  に短周期の変動が見られる。したがって, 発電電力の低周波成分がバッテリーで補償され, 高周波成分が FW で補償されていることが確認できる。これにより, 大容量のバッテリーと高速応答が可能な FW を組み合わせると ECS の高密度化が可能となる。

以上の結果より, 交流直接形電力変換器と FW を組み合わせると, 高密度一体型 ECS は実現可能であることを確認した。

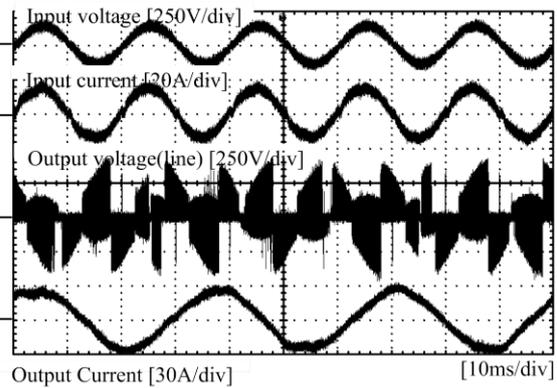
## (2) FW の高速設計法と磁気軸受制御法の確立

### (2.1) 磁気軸受 FW の開発

図 9 に 1 軸磁気軸受を用いた軸振動安定解析結果を示す。ここで, 支持位置による制御の安定度は以下のように評価する。まず, 停止中の軸の支持位置を X 軸, Y 軸独立で目標値を定め, ステップ応答を観察する。次に, そのときの行過ぎ量と, 振幅が目標値ステップ応答の 5 分の 1 になるまでの時間 (収束時間) を用い評価を行う。収束時間は偏差が 0.02pu 以下となる時間とする。図 9 より X 軸では中心値(0,0)から離れるに従い, 行き過ぎ量, 収束時間共に増加し, 安定度が悪化している。また, Y 軸では -0.4  $\rightarrow$  -0.5 付近で行き過ぎ量, 収束時間ともに短く, 最も安定するが,



(a) 従来回路を用いた実験結果



(b) 提案回路を用いた実験結果

図 7 単相脈動補償

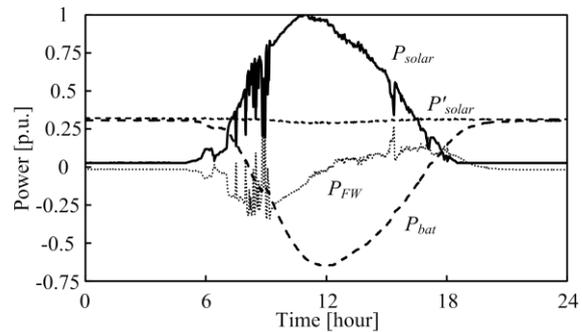


図 8 FW の高速帯域補償

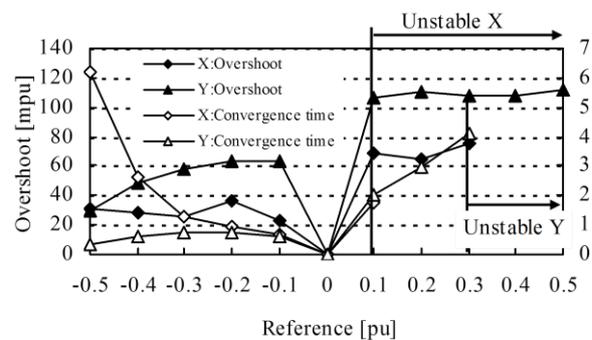


図 9 磁気軸受の軸振動解析

正方向に位置が変化するにつれ悪化している。これらの結果から、軸の支持位置により応答が異なることが確認できた。これは、ベアリングと電磁石の中心位置とのずれ（寸法誤差）やセンサの非線形性により生じている。したがって、寸法誤差は安価な装置を実現するためには避けられないので、軸振動を高速に補償する方法が必要なことが確認できる。

### (2.2) FPGA による高速制御応答の実現

図 10 に FPGA を用いた制御における理論限界応答を示す。制御系はハードウェアの制限により応答に限界がある。指令値周波数の理論限界は 3dB 低下した点だと仮定すると、指令値周波数  $f_{ref}$  とサンプリング周波数  $f_s$  の比は 1/3.15 となる。したがって、サンプリング周波数は指令値周波数の 3.15 倍に設計すればよい。

以上、磁気軸受適用に伴い発生する軸振動を抑制するためには、高速な制御応答が必要である。高速制御応答の実現には、FPGA で実現でき、FW の高速化が達成される。

### (2.3) FW の一次評価

図 11 に一次試作した FW の損失解析結果を示す。ここで、本機の軸受には、被膜処理を行ったボールベアリングを採用している。これより、15000r/min 定常回転時における全損失 4.8kW のうち、33.5% が FW 風損、54.8% が誘導機の鉄損であった。したがって、FW 高速回転時において、FW 風損と誘導機の鉄損が支配的となる。FW 風損は、FW 密閉容器内の真空度が低いことにより発生する。試作一号機では、密閉容器内が絶対圧力で 30kPa であり、風損を低減するには密閉容器内の真空度をさらに向上させる必要がある。また、誘導機の鉄損は一次周波数の増加に伴い増加する。したがって、鉄損を低減するためには現在よりも低い回転速度で同等のエネルギーを貯蔵する設計に変更する必要がある。

### (3) 電気実装の問題点を取り扱う解析技術の開発

次式に ANPC 回路の損失を定式化した式の例を示す。

$$P_{On\_sw1} = I_m \left( \frac{v_0}{2\pi} - \frac{1}{2} v_0 \cos\phi + \frac{1}{8\pi} I_m r_{on} \sin 2\phi - \frac{1}{4\pi} I_m r_{on} \phi - \frac{2}{3\pi} I_m a r_{on} \cos\phi - \frac{1}{4} a v_0 \cos\phi \right) \quad (1)$$

ここで、(1)式は Cell1 のスイッチに発生する IGBT 導通損失である。

図 12 に ANPC を用いて実験により測定した損失と(1)式等を用いて導出した理論値の損失を比較した結果を示す。結果より、1kW 定格運転時の理論損失と実機の損失の誤差率 2% であり、理論式の妥当性を確認した。

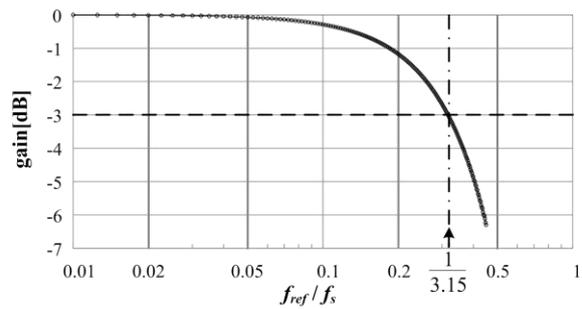


図 10 FPGA を用いた制御の理論限界応答

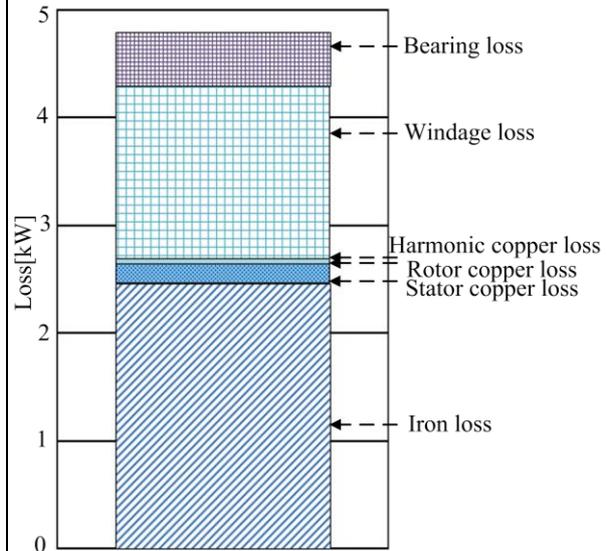


図 11 1 次試作した FW の特性評価

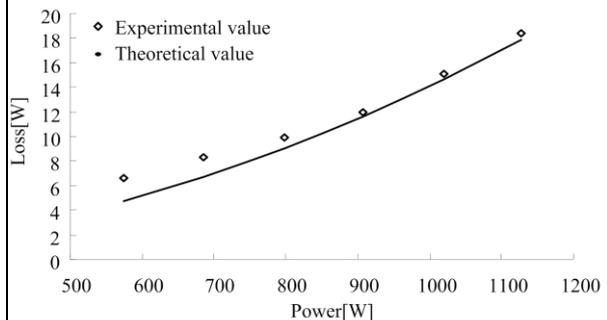


図 12 ANPC 回路の損失解析結果

以上より、損失計算のためにシミュレーションによるカットアンドトライを行う必要がなく、理論式を用いることで、容易に最適設計可能である。したがって、以上の技術を用いて、仕様に応じた MC の高密度化および高効率化が実現できる。

### (4) 結論

以上の回路設計、機械設計、制御、解析技術を組み合わせることで、交流直接形電力変換器とフライホイールを用いた一体型交流エネルギーキャッシュシステムが実現可能である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学術雑誌論文] (計 9 件)

- ①大沼喜也, 伊東淳一, アクティブバッファを利用した降圧型高効率単相三相電力変換器の開発, IEEJ Trans. D, 査読有, Vol. 130, No. 4, pp. 526-535 (2010)
- ②樫原有吾, 伊東淳一, 5 レベルアクティブ NPC インバータのパラメータ設計, IEEJ Trans. D, 査読有 Vol. 131, No. 12, pp. 1383-1392 (2011)
- ③小岩一広, 伊東淳一, V 結線チョップを用いた昇圧形マトリックスコンバータの実機検証, IEEJ Trans. D, Vol. 132, No. 1, pp. 1-8 (2012)
- ④伊東淳一, 日向敏文, ゼロ電圧スイッチング制御法を適用したインダイレクトマトリックスコンバータの波形改善法, IEEJ Trans. IA, Vol. 131, No. 1, pp. 24-31 (2011)
- ⑤加藤康司, 伊東淳一: 「インダイレクトマトリックスコンバータの回生スナバを利用したマルチ電源連系システムの制御法」, IEEJ Trans. IA, Vol. 130, No. 4, pp. 518-525 (2010)
- ⑥星野哲馬, 伊東淳一: 「誘導機の世界速度センサレスベクトル制御における外乱オブザーバを用いた出力電圧誤差補償」, IEEJ Trans. IA, Vol. 129, No. 9, pp. 945-946 (2009)
- ⑦Goh Teck Chiang, Jun-ichi Itoh: "DC/DC Boost Converter Functionality in a Three-phase Indirect Matrix Converter", IEEE Trans. on, Vol. 26, No. 5, pp. 1599-1607 (2011)
- ⑧Goh Teck Chiang, Jun-ichi Itoh: "Motor Performance Investigation of an Indirect Matrix Converter with a Reactor Free Boost Converter", IEEJ Transactions on IES, Vol. 124, No. 1 (2010)
- ⑨Tetsuma Hoshino, Jun-ichi Itoh: "Output Voltage Correction for a Voltage Source Type Inverter of an Induction Motor Drive", IEEE Trans. on, Vol. 25, No. 9, pp. 2440-2449 (2010)

[学会発表] (計 10 件)

- ①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, 半導体電力変換研究会, SPC-11-006, MD-11-032, (2011)
- ②五十嵐寿勝, 伊東淳一, 太陽光発電におけるバッテリーとフライホイールを用いた電力平準化制御の検証と考察, 電気学会全国大会, Vol. 6, pp. 327-328 (2012)
- ③渋谷貴之, 伊東淳一, 制御応答の高速化による直列コンデンサ容量の最小化の検討, 半導体電力変換研究会, SPC-12-026, (2012)
- ④樫原有吾, 伊東淳一: 「3 相 5 レベル ANPC インバータの理論体積と実験機の体積に対する一考察」, 電気学会全国大会, Vol. 4, pp.

69-70 (2012)

- ⑤樫原有吾, 伊東淳一: 「5 レベルアクティブ NPC インバータの PC システムへの応用と従来の電力変換器との比較」, IEEJ JIASC2011, No. 1-44, (2011)
- ⑥武良匠, 伊東淳一: 「空間ベクトル変調を用いた仮想 AC/DC/AC 変換方式におけるマトリックスコンバータのスイッチング損失の最小化の検討」, IEEJ JIASC2011, No. 1-142, (2011)
- ⑦五十嵐寿勝, 日下佳祐, 伊東淳一: 「リアルタイムパワーネットワークシミュレータの開発」, IEEJ JIASC2011, No. Y-34, (2011)
- ⑧小岩一広, 伊東淳一: 「マトリックスコンバータに適用するダンピング制御のゲイン設計法」, 電気学会全国大会, Vol. , No. 4-020 (2011)
- ⑨加藤康司, 伊東淳一: 「インダイレクトマトリックスコンバータの損失解析手法」, 電気学会全国大会, Vol. , No. 4-023, pp. (2011)
- ⑩大沼喜也, 伊東淳一: 「単相三相変換器における昇圧チョップ回路とアクティブバッファ回路の比較」, , Vol. , No. 4-042, pp. (2011)

[図書] (計 0 件)

なし

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

なし

○取得状況 (計 0 件)

なし

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

伊東 淳一 (ITOH JUNICHI)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号: 90377218

(2)研究分担者

なし ( )

研究者番号:

(3)連携研究者

なし

研究者番号: