

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560326

研究課題名(和文) 複合型自然エネルギー利用発電システムのスマートグリッド化に関する研究

研究課題名(英文) Study on smart-grid system using combined renewable energy

研究代表者

石田 宗秋 (Ishida, Muneaki)

三重大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70135317

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、複合型自然エネルギー利用発電システムのスマートグリッド化に関する研究と題し、以下の研究を行った。まず燃料電池システムの模擬装置の構築を行い、燃料電池システムを利用したスマートグリッド構築の為に実際の燃料電池を用いる必要をなくすことで、開発コストの削減を行った。次に電力補償装置であるフライホイールについて補償性能の向上を図る制御法を提案した。また、電気二重層キャパシタを用いたシステムでは補償特性を解析モデルにより求める事を可能にし、システムの設計に役立てた。最後にバッテリーを用いた電力補償システムにおいて補償性能とバッテリー容量の関係を示し、システム構築時の容量選定に関する知見を得た。

研究成果の概要(英文)：This study is to solve the problems to construct the smart-grid system by using renewable energy. First, we constructed the method to make fuel cell emulator to reduce the system development cost. Second, we proposed the method for improving the performance of fly-wheel energy storage system to improve the characteristics of compensating fluctuating power in smart-grid. Third, we proposed the method to analyze power compensating system using EDLC (Electric double-layer capacitor) and got a certain knowledge on how to design the control parameter. Finally, showing relationship between compensation performance and battery capacity in battery power compensating system, obtained the findings on capacity when building a system.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力変換・電気機器

キーワード：スマートグリッド 燃料電池模擬装置 電気二重層キャパシタ フライホイール 容量算定

### 1. 研究開始当初の背景

近年配電システムには、さまざまな分散電源が接続されてきており、今後その傾向は増すばかりである。特に、CO<sub>2</sub>問題の深刻化により、太陽光・風力などの自然エネルギー利用発電の増加が強力に進められる可能性が高くなっている。

自然エネルギー利用発電システムは、電力脈動が大きいかかわらず、配電システムの末端に設置されることが多いため、系統インピーダンスにより電圧変動を引き起こす。そのため、設置には電力品質を重要視する電力会社から規制されるケースが多いと予想され、負荷や他の発電装置と情報を共有し発電量を制御するための分散的電圧制御システムの設置が望まれる。

しかし、自然エネルギー利用発電システムのみでは電力脈動を制御することは非常に困難なため、ベース電力となる制御可能な発電装置や電力補償装置が必要不可欠である。

一般的にはベース電力を発生する装置にはコンバインドディーゼル発電機やガスタービン発電機が用いられるが、自然エネルギーからの電力が得られないときの補助電源として位置づけられており、脈動電力の補償にはフライホイールやバッテリーなどの電力脈動補償装置を用いている。しかし、この方式では補償装置の容量が非常に大きなものになってしまう。

現在、各発電機、電力変換器が互いに情報を共有し合い、安定な電力供給システムを目指す「スマートグリッド」という考え方が注目を浴びている。そこで、従来研究では通常ベース電力として用いられるマイクロガスタービン発電システムを積極的に電力脈動の補償に用いることで、フライホイールの容量の低減が可能であることを実機システムを用いた実証試験により示した。

しかし、マイクロガスタービンはバルブにより入力ガスを制御しているため、電力補償装置として用いようとすると出力が段階的に変動し、新たな電力脈動の原因となることがある。また、応答遅れが存在するため、補償できる帯域に制限があり、効果的に容量低減ができないといった問題がある。さらに、出力を下げるとエネルギー変換効率が下がってしまうことが問題であった。

### 2. 研究の目的

従来研究成果により、風力発電等の非周期性の高い電力脈動については、周波数帯域の分離のみで、各装置の補償電力分担を決めることは不十分であることを示し、マイクログリッド内の補償装置間で電力をコントロールすることでスマートグリッド化し、脈動電力を補償する協調制御法を提案した。

また、電力補償装置の役割を兼ね備えるベース電力装置としては、効率が出力にあまり依存せず出力応答速度の速い、燃料電池+電力変換装置の方が、より高い効果が期待で

きる。しかし燃料電池は非常に高価であり、時間推移による劣化も他の発電機に比べ早いことから、実証試験が困難なものとされてきた。そのため、燃料電池の詳細な等価回路を提案し、これを元にした数 kW 出力の燃料電池模擬装置を実現すれば、提案するスマートグリッドシステムにおいて実証試験が可能になる。

本研究の目的は以下の通りである。

- ・ 数 10W 出力の小型燃料電池を基本とした燃料電池模擬装置の等価回路パラメータを物理的背景を元に導出し、数 kW 以上出力の大型の燃料電池に適用の可能性を探る。
- ・ 燃料電池を電力補償装置として併用した場合、従来の装置に比べフライホイール電力補償装置の容量をどこまで低減することが可能かをエネルギー効率の点から定量的に明らかにする。
- ・ 本提案手法によって構成されたスマートグリッドシステムが系統に連系されたときの、系統に与える影響が現在のシステムに比べ少ないことを実証試験により明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 燃料電池模擬装置の構築

燃料電池には 100W の出力を持つものを使用し、測定結果及び物理モデルから等価回路を構築し、各パラメータをシステムティックに導出する方法を構築する。そして求められた等価モデルを使った回路の妥当性をシミュレーションにより検証する。

#### (2) スマートグリッドシステムの構築と検証

最初に、提案システムの元となったマイクロガスタービンとフライホイールを用いた協調制御法において、フライホイールの制御性能工場のための方策を提案し、その動作を検証する。

次に、電力補償装置として電気二重層コンデンサ (EDLC) を用いたシステムを提案し、その補償特性について検討を行う。

最後に図 1 に示すスマートグリッドをシミュレーション回路で模擬し、災害時などの単独運転時に必要な補償容量についての検討を行う。

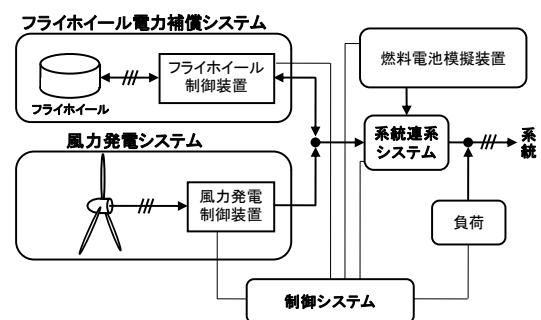


図 1 提案システム

#### 4. 研究成果

##### (1) 燃料電池模擬装置の提案

図2に提案する燃料電池模擬装置の概略図を示す。本装置はソフトウェアとハードウェアにより構成されており、1mHz から 10kHz 程度までの広い周波数帯域において利用可能な模擬装置を構築している。

本装置において、model Aは主にソフトウェアで制御された電源および低周波数領域におけるインピーダンスを模擬している。Model BはR, L, C等の線形素子により構成され、主に高周波数領域におけるインピーダンス特性を模擬している。

燃料電池の端子電圧は次式で表されることが知られている。

$$V(i, T) = E - r_0 i - \frac{RT}{2\alpha F} \ln \left( \frac{i + i_n}{i_0(T)} \right)$$

ここで、各パラメータの意味及び値は表1に示すとおりである。このうち、 $r_0 i$ の項は高応答が要求されるため model Bに含めることとする。結果、model Aの電源は次に示すような式となる。

$$v_a = E - \frac{RT}{2\alpha F} \ln \left( \frac{i + i_n}{i_0(T)} \right)$$

図3に定常状態における電流、電圧特性を示す。この結果より定常状態においては電圧、電流の関係は実機と良く一致していることがわかる。

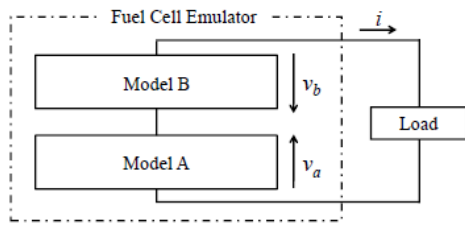


図2 提案する燃料電池模擬装置

表1 パラメーター一覧表

Symbol	Meaning	Value
$E$	Theoretical value of open circuit	29.52[V]
$r_0$	Resistance of the cell components	17.19[Ωcm <sup>2</sup> ] (0.573Ω)
$\alpha$	Coefficient of mass transfer	0.4
$R$	Gas constant	8.314[J/K/mol]
$F$	Faraday constant	96485[C/mol]
$i_n$	Exchange current density	1.434 × 10 <sup>-3</sup> [A/cm <sup>2</sup> ]

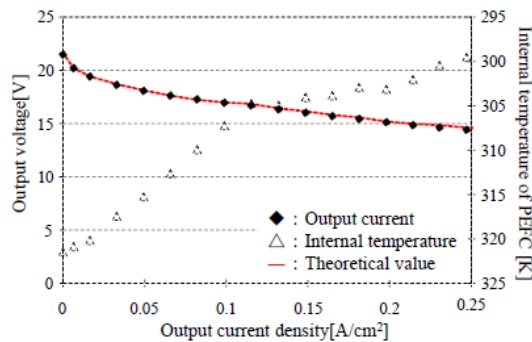


図3 燃料電池の定常特性と理論値の比較

次に図4に model Bの回路構成を示す。

回路パラメータを導出するために、まず、図5に示す周波数特性を用いる。

図5より、以下のステップで抵抗値を決定する。

Step 1

定常状態から  $r_0$  を高周波数領域で  $R_0$  を求める。

Step 2

図5の共振周波数(実部=0)のインピーダンスより  $R_0 + R_1 + R_2$  が求められる。ここで、 $R_1$  と  $R_2$  の比は実験結果からは求められないため、文献より一般的な割合を求める。

Step 3

周波数 = 0 の領域では以下の式が成り立つため、この式より  $R_a$  を求める。

$$R_0 + R_2 + \frac{R_1 R_a}{R_1 + R_a} = r_0$$

Step 4

残りのパラメータを試行錯誤的に求める。

現段階ではL及びCについては試行錯誤的にパラメータを導出しているが、これらについては、現在ステップ応答を用いた特性から求める方法を現在検討中である。

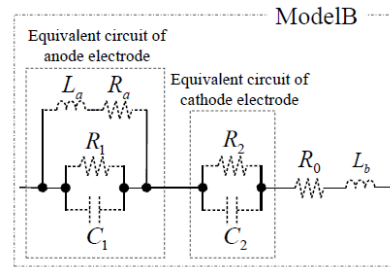


図4 Model Bの構成

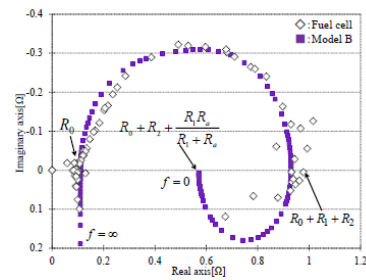
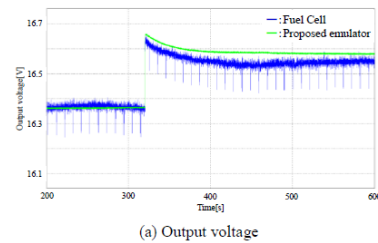
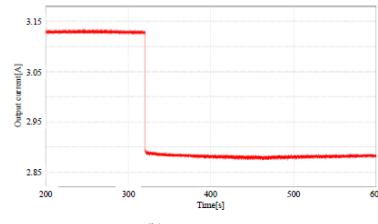


図5 燃料電池の周波数特性



(a) Output voltage



(b) Input current

図6 シミュレーション結果

以上の結果求められた等価回路モデルを用いてシミュレーションを行った結果を図6に示す。なお、入力電流については実機の測定結果を入力として、燃料電池モデルに入力している。

この結果より、ステップ応答において、燃料電池モデルは実機とほぼ同等の特性を持つことが確認できる。このことは周波数特性と、定常特性があれば、燃料電池の容量に拘わらず、モデルが構築できる可能性があることを示している。

## (2) スマートグリッドシステムの構築と検証

本研究ではスマートグリッドに用いられる電力補償装置とフライホイール、電気二重層キャパシタおよびバッテリーを想定している。図7にフライホイールを用いたスマートグリッドシステムのモデルを示す。

協調制御とは電力補償装置(フライホイール:FWES)のみならず、発電装置(マイクロガスタービン:MTG)が脈動電力の補償に積極的に関与する方式であり、反応の遅いMGTシステムが低周波成分を補償し、FWESがより高い周波数成分を補償する方式である。

その補償ブロック図を図8に示す。ここで点線に囲まれた部分が協調制御ブロックである。ここで、補償性能を向上するにはFWESシステムの性能向上が不可欠である。

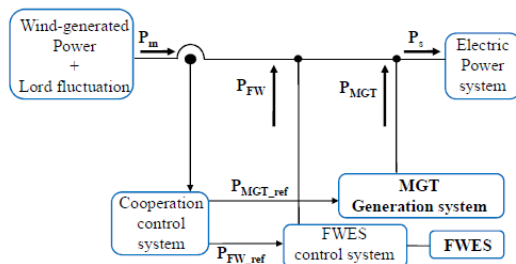


図7 マイクログリッドシステムのモデル図

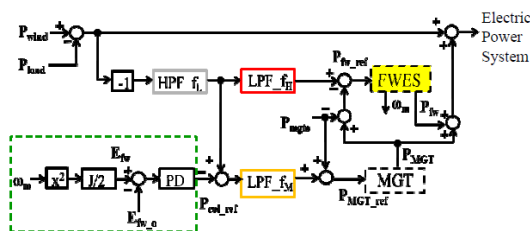


図8 協調制御のブロック図

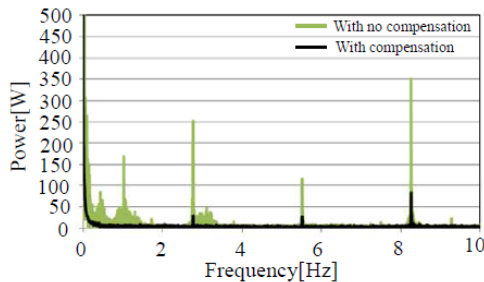


図9 シミュレーション結果

従来 FWES の制御には速度センサを取り付けることが構造的に困難であったため、速度センサを用いないV/f一定制御が用いられていたが、この制御はオープンループ制御であり、高応答の電力補償は困難であった。そこでオブザーバを用いた速度センサレスベクトル制御をFWESに用いることを提案した。

シミュレーション結果を図9に示す。本方式を用いることにより脈動電力のほとんどを抑制できることを確認した。

次に電気二重層キャパシタを用いた電力平準化システムの概略図を図10に示す。本装置は発電機や負荷を含むマイクログリッドと基幹系統との間に位置し、マイクログリッド内で発生した脈動電力が系統側に流れるのを緩和する役割を持つ。なお、EDLCは高価なため、容量は比較的少なく、主に高周波の脈動成分を補償する役割を持つ。また、系統内の無効電力や高調波を抑制する働きも併せ持っている。

制御ブロックを図11に示す。

本制御では系統インピーダンスは非常に小さいものとして無視し、系統内の電流脈動を抑制することで電力脈動を補償している。

系統電流を座標変換を用いて有効成分(d軸成分)と無効成分(q軸成分)に分離し、ハイパスフィルタ(HPF)を用いて有効電力の脈動分を検出し、これを0になるよう制御することで、脈動の補償を行う。又これにより高調波電流の補償も同時に行っている。またq軸成分も同様0に制御することで無効電力の補償も行っている。なお、電力脈動の様相によってはEDLCに出し入れする電力の平均値が0にならず、EDLCが飽和してしまう恐れがあるため、系統に影響を及ぼさない範囲でEDLCの電圧を一定に保つ制御(EDLC Voltage Control Block)も付加されている。

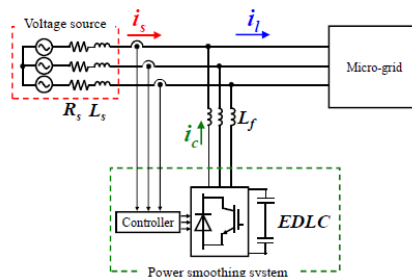


図10 EDLCを用いた電力補償システム

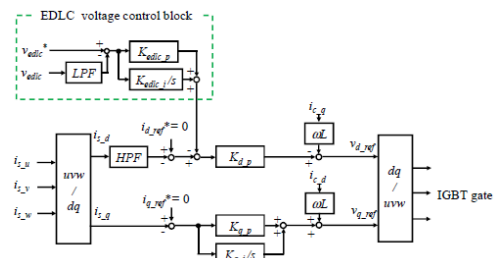


図11 制御ブロック図

補償結果を図 12 に示す。同図は負荷電流  $i_L$  を 1s 周期で変動させたときの電源電流  $i_s$  である。負荷電流の変動に対し、電源電流の脈動が大幅に抑制されていることがわかる。

また、電圧電流波形の詳細を図 13 に示す。負荷変動時、負荷電流は大きさと位相が大きく変化しているが、電源電流は振幅一定かつ力率 1 の電流となっている事がわかる。

図 14 は補償システムのコントローラゲインを変化させたときの補償特性をモデルを用いた解析結果とシミュレーション結果を比較したものである。若干の差はあるが、概ね解析通りの結果が得られていることがわかる。このこととはシステム構成から予め解析的にコントローラのゲインを求める事ができるため、試行錯誤的でない制御系の設計を行う事が可能であることを示している。

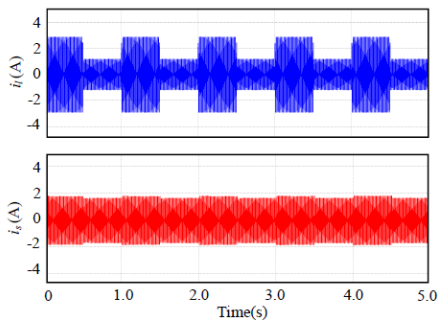


図 12 シミュレーション結果

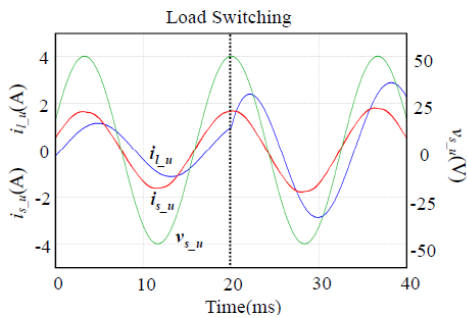


図 13 電流波形

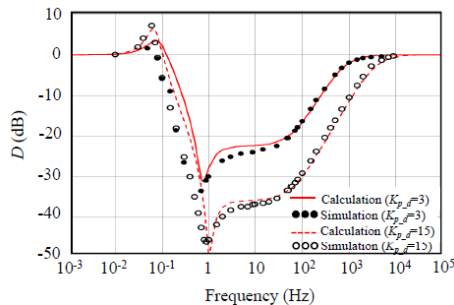


図 14 補償特性の解析結果

最後にスマートグリッドが災害時などに非常用電源として独立電源運転することを想定し、補償容量が脈動電力に与える影響について検討を行った。

図 15 に対象とするスマートグリッドの構成を示す。ここでは電力補償装置としては密

閉型の制御弁式バッテリー (VRLA) 及び EDLC を用いているが、本検討においては VRLA のみで補償することとした。また、解析の簡単化のためガソリン発電機は一定出力しているととし、風力発電機のみが脈動電力を発生しているものとして、解析を行っている。

バッテリーを補償装置として利用する場合、補償容量を選定するためにはバッテリーの充放電のモデル化が必要不可欠である。そこで、バッテリーのパラメータを元に図 16 に示すバッテリーモデルを構築した。

ここで SOC (State of Charge) は電流の時間積分より充電電荷量を求め、これが 90% を超えないようバッテリー容量を選定することにした。

補償電力を求めるブロック図を図 17 に示す。風力発電機の出力を平準化するように、補償装置に電力指令を与え、フィードバック制御にて補償を行っている。

なお、補償の程度は積分時定数  $T$  を変更することで変えることができ、 $T$  を大きくすることで、より大きな平準化の効果が期待出来るが、その分バッテリーの容量が増大することになる。

風力発電機による入力の一例を図 18 に示す。これを入力として、積分時定数が  $T = 5$  [s] と  $T = 20$  [s] の補償結果を図 19 及

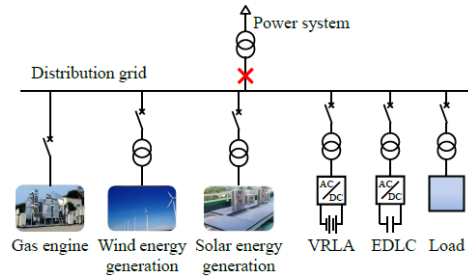


図 15 対象とするスマートグリッド

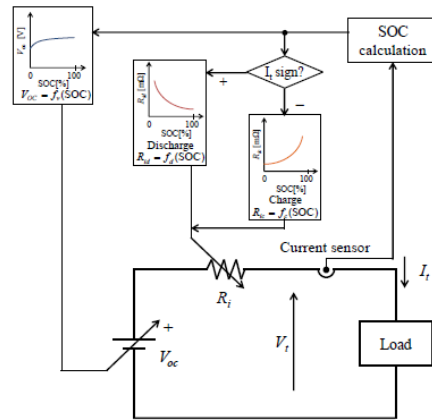


図 16 バッテリーの等価回路モデル

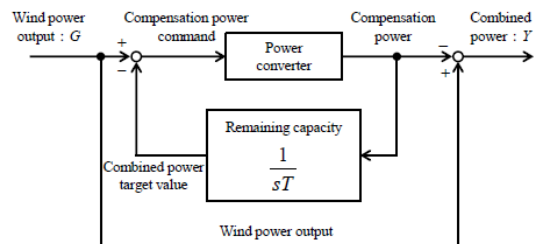


図 17 補償電力の演算ブロック



び図 20 に示す。このとき最低限必要なバッテリー容量は5[s]の時74kAh, 20[s]の時110kAhとなった。このように時定数と容量の関係を求める事で、脈動電力に合わせた補償容量の選定が可能になるものと考えられる。

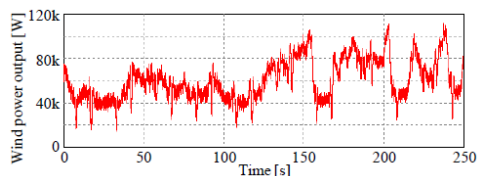


図 18 風力発電機からの入力電力

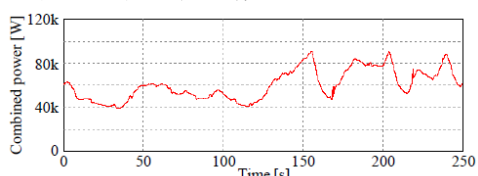


図 19 補償された電力の一例 ( $T = 5$  [s])

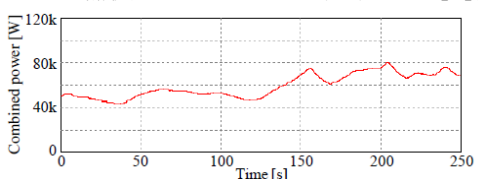


図 20 補償された電力の一例 ( $T = 20$  [s])

以上のことより、スマートグリッド構築のための補償装置についてフライホイール、EDLC、バッテリーの3種類についてそれぞれの補償特性を活かした補償システムを提案し、その効果を検証した。

今後はこれらのシステムを総合的に管理し、運用していくことで、高機能かつ実用的なスマートグリッドシステムが構築できるものと考えている。

## 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)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 相星亮, 山村直紀, 石田宗秋 “A basic study on construction of the emulator of fuel cell”, Proceedings of 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems, Oct. 26-29, 2013, Busan, Korea (ICEMS 2013), OT-0960, pp. 1421-1424, 査読あり
- ② 林秀俊, 山村直紀, 石田宗秋 “Study on development of Power Smoothing System using Electric Double Layer Capacitor”, Proceedings of The 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2012), DS3G4-9, pp. 4001-4006, 査読あり
- ③ 百々直輝, 山村直紀, 石田宗秋 “Study on the Cooperative Control of the Power Generation System and an Electric Power Compensatory System in Micro

Grid”, Proceedings of 2012 International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2012), P5268, pp.1-6, 査読あり

[学会発表] (計5件)

- ① 金森泰樹, 山村直紀, 石田宗秋 “A Study on capacity calculation method of power compensation equipment required by introduced distributed system”, International Symposium on Engineering 2013 Mie University, 2013/12/3-5, 三重県
- ② 相星亮, 山村直紀, 石田宗秋 “A basic study on construction of the emulator of fuel cell”, 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2013/10/26-29, 韓国
- ③ 相星亮, 山村直紀, 石田宗秋 「燃料電池模擬装置の開発に向けた電氣的等価モデルの構築に関する基礎研究」, 平成 25 年電気学会産業応用部門大会, 2013/8/28-30, 山口県
- ④ 林秀俊, 山村直紀, 石田宗秋 “Study on development of Power Smoothing System using Electric Double Layer Capacitor”, The 15th International Conference on Electrical Machines and Systems, 2012/10/21-24, 北海道
- ⑤ 百々直輝, 山村直紀, 石田宗秋 “Study on the Cooperative Control of the Power Generation System and an Electric Power Compensatory System in Micro Grid”, 2012 International Conference on Energy and Environmental Protection, 2012/6/23-24, 中国
- ⑥ 百々直輝, 山村直紀, 石田宗秋 「複合型自然エネルギー発電システムにおけるフライホイール電力補償装置の応答性の向上」, 平成 23 年電気関係学会東海支部連合大会, 2012/9/26-27, 三重県

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.esl.elec.mie-u.ac.jp/enesys/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石田 宗秋 (ISHIDA Muneaki)

三重大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70135317

### (2) 研究分担者

山村 直紀 (YAMAMURA Naoki)

三重大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80252310