

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360117

研究課題名(和文) 風力と水素を核とするエネルギークラスターの構築

研究課題名(英文) Design of energy cluster based on wind power and hydrogen

研究代表者

田村 淳二 (Tamura, Junji)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：40171897

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,900,000円

研究成果の概要(和文)：独立系統と離島を対象として風力発電機と水素電解槽から成るシステムを検討した。前者では風力機を並列接続してその出力を電解槽に供給するため、直流出力並列回路に対するDC-DCコンバータ制御法を導出し、次に複数の風力機から成る実験システムを構築し、発電機がそれぞれMPPT制御されかつ電解槽に電力を供給できることを確認した。後者ではディーゼル発電機と負荷から成る小規模モデルを構成し、風力機出力を電解槽に供給し、発生水素を燃料電池に入力して電力と熱を発生し、それを負荷に供給するシステムを設計した。このシステムを小規模系統に導入することにより周波数変動が減少し、CO2排出量も低減できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：A system with wind generator and electrolyzer was analyzed for stand-alone system and isolated island. In the former, controller for DC-DC converter for parallel DC circuit was derived for delivering output from parallel wind generators to electrolyzer, and then, it was confirmed in the experimental study that each wind generator can be operated in MPPT mode and the output can be supplied to electrolyzer. In the latter, small scale model system with diesel generator and load was designed, in which, wind generator output is supplied to electrolyzer, the generated hydrogen is supplied to fuel cell generating power and heat, and then they are supplied to the load. It was confirmed that frequency variation of the small system can be decreased and its CO2 emission can also be decreased by introducing the proposed system into the small power system.

研究分野：電力工学・電気機器学

キーワード：風力発電 電気分解 水素製造 独立系統 周波数変動解析

1. 研究開始当初の背景

炭酸ガス排出抑制等の観点から自然エネルギーによる発電は近年急速に拡大しており、中でも風力発電の増加が著しい。しかし、出力変動による電力系統周波数変動等の問題があり、電力会社側の受入れが困難になりつつある。風力発電の適地はまだ多く存在するが、電力系統へ連系した運用を前提とする限り、周波数変動の問題や近傍に送電線が無い等の理由により、風力発電の導入が困難になりつつある。一方、離島の電力系統においては一般にディーゼル発電が主電源であるが、離島は周囲を海に囲まれ、一般に風況が良く、風力発電に適している場合が多い。従って、風力発電を大規模に導入することが可能となれば、多くの離島を有する我が国においては大幅に温暖化ガスを削減することが可能となる。しかしながら、風力発電の出力変動に起因する系統側での周波数変動に対するディーゼル発電機による調整能力には限界があるので、大規模に風力発電を導入することは困難である。

一方、次世代エネルギー源の本命と目されている水素を導入することが検討されており、CO₂を排出しない風力などの自然エネルギーを利用した水素製造は非常に有力な方法として期待されている。従って、上記の背景に鑑み、系統に接続されない単独システムや離島へ風力発電による水素製造システムを導入することは温暖化ガス削減の観点からも非常に有効な方法である。

このような状況を背景として、本研究では風力発電機、水素製造電解槽、蓄電装置から構成されるエネルギークラスターの構成法に関して検討する。

2. 研究の目的

前述の背景から、送電線の有無に関係なく単独(非系統連系)で風力発電機と水素製造装置から成るシステムを構築できれば、風力発電の推進、炭酸ガスの排出抑制の観点から有益である。同様に離島において、風力発電機、水素製造装置、蓄電池から成るシステムを構築し、ディーゼル発電による発電量を減らしながら、系統周波数変動も抑制することができれば、多くの離島を擁する我が国においては、風力発電の推進、炭酸ガスの排出抑制の観点から有益である。以上のことから、次の二つの場合を対象として、風力発電機、水素製造装置、蓄電池から構成されるエネルギークラスターの構築を目的として、その構成法、制御方法、炭酸ガス排出量に関して検討し、システム的设计手法を構築する。

(1) 完全なスタンドアロンシステム：電力系統に接続しないスタンドアロン形システムを想定し、風力発電機、水素製造電解槽から構成されるエネルギークラスターにより水素製造を効率的に行うシステムを検討する。本システムは系統連系の制約なしに風況の良い地点に容易に導入が可能となり、風

力発電の更なる増加に寄与できる。

(2) 離島：離島に風力発電機、水素製造電解槽、蓄電装置から構成されるエネルギークラスターを導入し、これらの協調制御によって安定的に水素を製造すると同時に、系統の周波数変動も抑制できるシステムを検討し、結果として島全体で発生する炭酸ガスの削減を達成するシステムを設計する。

3. 研究の方法

研究目的(1)に関しては、基本的に複数の風力発電機が並列に接続・運転され、その合計電力が水素電解槽に供給される形となる。また、水素電解槽は基本的に直流電力で動作するので、風力発電機交流出力を整流し、電解槽に供給することになるが、複数の直流出力を制御しながら電解槽に供給しなければならない。また、それぞれの発電機は風速に基づいて最適出力状態(MPPT, Maximum Power Point Tracking)に制御する必要がある。そこで初めに、複数の直流出力が並列に接続されている回路の直流電力をそれぞれ独立に制御するための DC-DC コンバータの制御理論に関して検討する。

続いて、上記の検討結果を基にして、実際に複数の風力発電機から成る小型実験システムを構築し、並列接続された発電機がそれぞれ MPPT 制御され、かつ電解槽に安定して電力が供給されるかを実験的に確認する。

最後に、研究目的(2)を対象として、ディーゼル発電機と負荷から構成される離島を想定した小規模モデルシステムを構成し、それに風力発電機、水素電解槽、燃料電池を導入したシステムを構築する。続いて、風力発電機出力をそのまま系統に供給した場合を比較対象として、風力発電機出力を電解槽に供給し、発生した水素を燃料電池に入力して電力と熱を発生し、それらを負荷の一部として供給するシステムを設計する。これら二つのシステムに関して、風力発電機に変動風速を入力して解析を行い、設計した水素をベースとするシステムの系統周波数変動抑制効果、炭酸ガス排出量抑制効果を検証する。

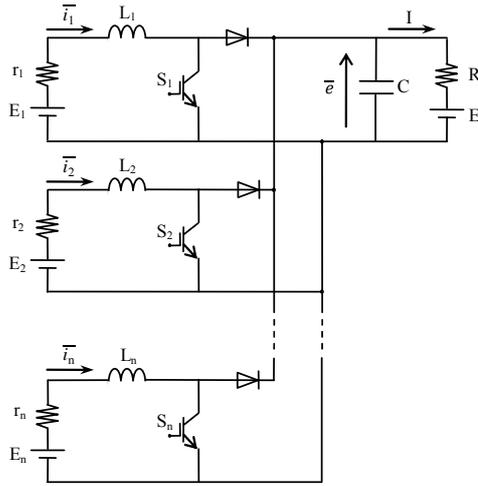
以上の検討から、風力発電機、水素製造電解槽から構成される完全なスタンドアロンシステムとしてのエネルギークラスター、並びに離島を対象とした風力発電機、水素電解槽、燃料電池から構成されるエネルギークラスターの二つの場合におけるシステム構成法の妥当性を確認する。

4. 研究成果

(4-1) 並列接続された DC-DC コンバータの制御方法の構築

複数台の風力発電機の出力を昇圧チョッパから成る DC-DC コンバータにより制御するための方法を導出する。発電機出力は交流であり、これをダイオード整流器で直流に変換して水素電解槽に供給するが、それぞれの風力発電機を風速に応じて最大出力制御

(MPPT)する必要がある。これを DC-DC コンバータにより行う。理論展開を可能とするためにシステムを簡略化し、発電機及びダイオード整流器は直流電圧源 E_n と内部抵抗 r_n に置き換える。水素電解槽は抵抗 R と電圧源 E で模擬する。図 1 に直流電圧源を複数台(n 台)の昇圧チョッパを用いて並列接続した回路



を示す。

図 1. 昇圧チョッパを通して複数台の直流電圧源が並列接続された回路

ここで回路のインダクタ L_n 及びコンデンサ C の値は十分大きく、リアクトル電流とコンデンサ電圧に含まれるリップル成分は無視できるとして理論展開を行うと、各電源からみた平均値等価回路として図 2 が得られる。

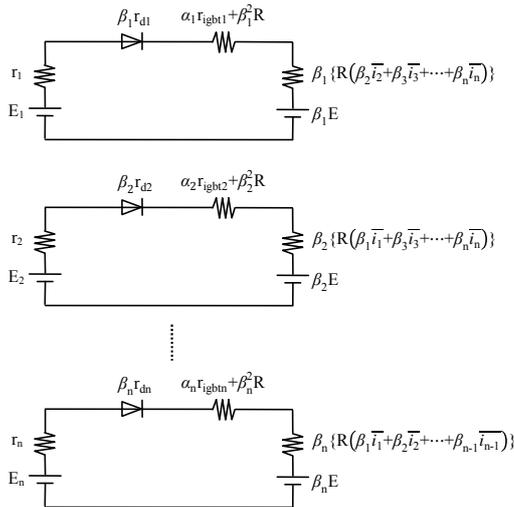


図 2. 各電源からみた平均値等価回路

ここで、それぞれのチョッパのオン時間を $T_{on1}, T_{on2}, \dots, T_{onn}$, オフ時間を $T_{off1}, T_{off2}, \dots, T_{offn}$ とし、 $T_{on1}/T_p = a_1, T_{on2}/T_p = a_2, \dots, T_{onn}/T_p = a_n$, $T_{off1}/T_p = \beta_1 = 1 - a_1, T_{off2}/T_p = \beta_2 = 1 - a_2, \dots, T_{offn}/T_p = \beta_n = 1 - a_n$ である。 a_1, a_2, \dots, a_n がそれぞれのチョッパのデューティ比であり、 $i_{igbt1}, i_{igbt2}, \dots, i_{igbtn}$ は各チョッパ IGBT のオン抵抗である。図 2 より、各チョッパの電流が個々のチ

ョッパの電流に影響を与えるが、各チョッパのデューティ比が決まれば各電源から流出する電流が決定されることが分かる。つまり、チョッパのデューティ比を制御することによりチョッパ間で干渉が起きるが、各電源の出力を制御できることがわかる。

(4-2) 小型風力発電実験システムによる検証

(4-1)での理論展開の有効性を 2 台の小型風力発電機から成る実験システムにより検証した。実験システムを図 3、その中の昇圧チョッパ回路を図 4 に示す。

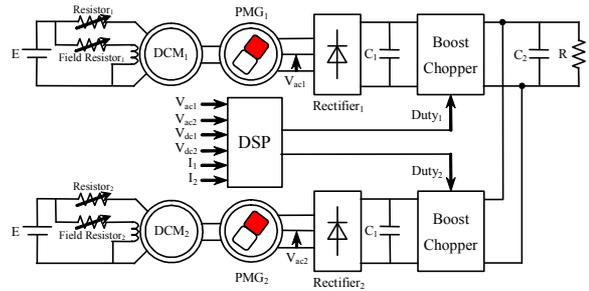


図 3. 小型風力発電実験システム

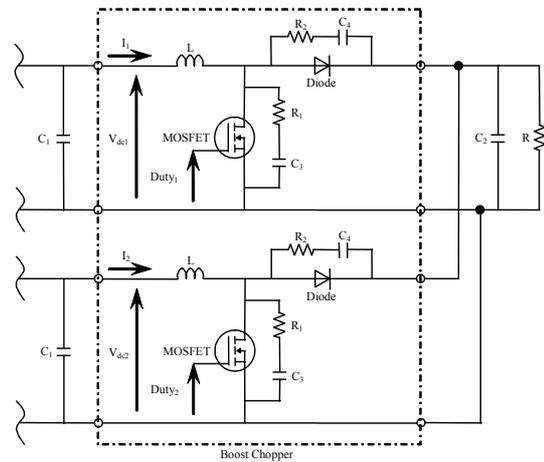


図 4. 昇圧チョッパ回路

風力発電機を模擬した PMG (Permanent Magnet Generator) と風車を模擬した DCM (Direct Current Motor) で構成され、DCM により可変速制御を行う。DSP (Digital Signal Processor) により各発電機の整流後の電圧・電流を読み取り、(4-1)で説明した方法で昇圧チョッパの Duty 比を可変にすることで発電機の回転速度に応じた MPPT 運転を行う。実験では水素製造装置を内部起電力 0 の負荷抵抗で模擬した。

2 台の PMG において MPPT 制御を行うため、各 PMG の特性を測定して回転数に対する発電機出力の目標値関数(1) (2)式を算出した。なお PMG₁ の発電機出力目標値を P_{ref1} , 回転数を N_1 [rpm], PMG₂ の発電機出力目標値を P_{ref2} , 回転数を N_2 [rpm] とする。

$$P_{ref1} = 7 \times 10^{-5} N_1^2 + 0.08 N_1 \quad (1)$$

$$P_{ref2} = 9 \times 10^{-5} N_2^2 + 0.05 N_2 \quad (2)$$

図5に昇圧チョッパの制御系ブロック図を示す。DSPで各PMGの整流後の電流と電圧読み取り、これらに乗じて電力とする。その電力と目標値関数(1),(2)式で算出された最大電力点の差を求め、PI制御器を通すことでDutyを算出し、その値で昇圧チョッパを制御することによりPMGをMPPT運転させる。なお、Dutyを生成する信号のキャリア周波数は20[kHz]とした。

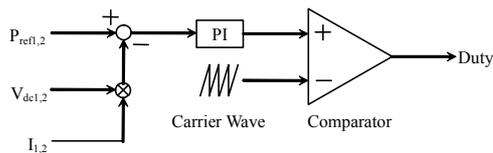


図5. 昇圧チョッパ制御系

各風力発電機にそれぞれ異なる変動風が入力されると想定し、PMGの回転数を図6のように変動させたときの目標値への追随性を実験的に検討した。図7にDuty比、図8,9に整流後の各PMGの発電機出力を示す。PMGの回転数に応じてDutyが変化し、発電機出力が目標値関数から算出された値に追随し、各々の発電機出力を適切に制御できることが確認された。発電機出力での振動分は整流後の電圧・電流の振動によるものである。

以上により、複数台の独立設置型風力発電機を昇圧チョッパにより並列接続し、各々の発電機出力をMPPT特性に一致させ、水素製造装置に電力を送ることが可能であることを明らかにした。

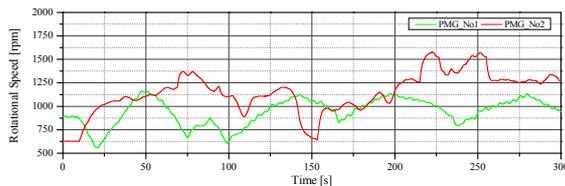


図6. 各発電機回転数

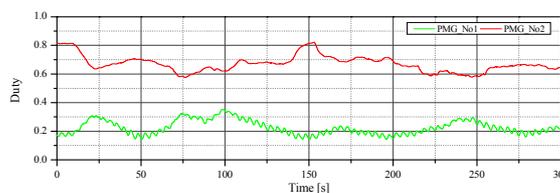


図7. Duty比

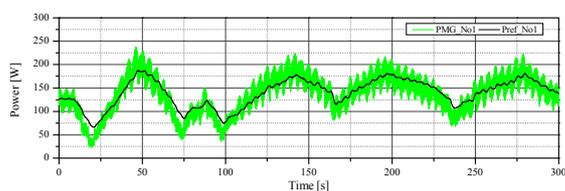


図8. PMG1出力

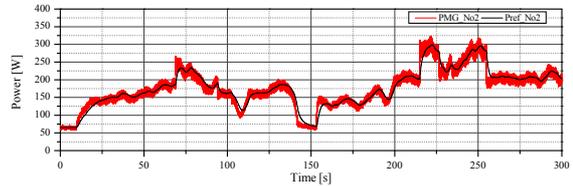


図8. PMG1出力

(4-3) 小規模モデル系統への風力発電機と水素電解槽の導入解析

検討に用いたモデルシステムを図9に、このシステムのエネルギーフローを図10に示す。本モデルでは、永久磁石形同期発電機(PMSG)による風力発電機は系統と独立で、電力変換器を介して水素製造装置に接続され、生成水素は水素貯蔵タンクを介して燃料電池に送られ、燃料電池で発生した電力と熱はそれぞれ負荷に供給される。また、システムモデルは簡易的にディーゼル発電機一台と負荷(電力負荷と熱負荷)としている。

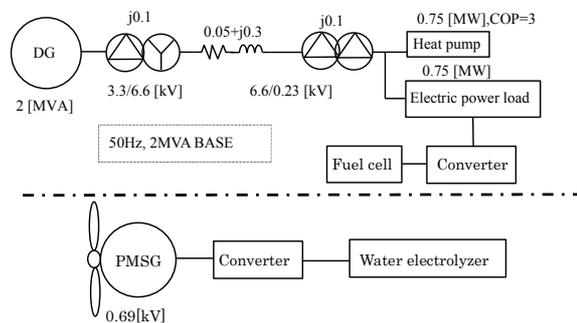


図9. モデルシステム

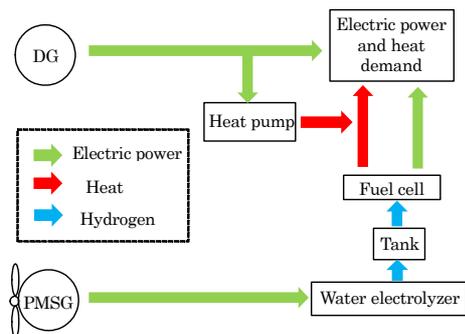


図10. エネルギーフロー

PMSG型風力発電機の定格は400KVAであり、固定子回路に昇圧チョッパが接続され、この制御によりMPPT運転する。回転数範囲は0.4pu~1.0puであり、風速が強まり、回転数が1puを超えようとした際に風車ピッチ制御系が動作するようになっている。ディーゼル発電機には通常のカバー制御系があり、回転数(周波数)変動を制御するようになっている。負荷は有効・無効電力が電圧と周波数で変化するモデルを採用した。更に、熱

負荷については、ヒートポンプ給湯機を想定し、有効電力に成績係数を乗じて決定している。水素電解槽モデルは等価抵抗と等価内部電圧源で模擬している。燃料電池は固体高分子型を想定し、I-V 特性は直線で表されるとした。燃料電池の出力電力は昇圧チョッパとインバータを介して負荷に供給される。

風力発電機の変動出力 P_G は水素製造装置へ供給し、発生した水素を燃料電池に供給して負荷には平滑化された電力を供給するよう制御する。この際、燃料電池の出力目標値 P_{fc_ref} は P_G の単純移動平均(Simple Moving Average, SMA)を取ることで算出する。この際の時定数は $T=120[s]$ とした。

本システムの有用性を確認するため、PSCAD/EMTDC を用いたシミュレーション解析を行った。計算に用いた3種の風速データを図 11 に示す。Wind1 は高風速、Wind2 は中風速、Wind3 は低風速を想定している。

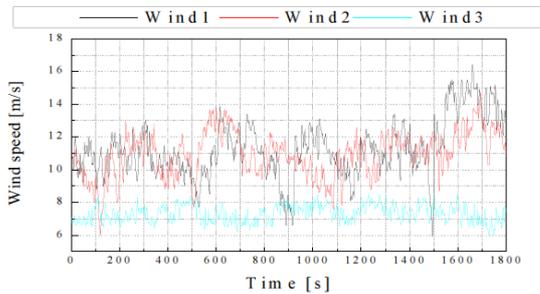


図 11. 風速データ

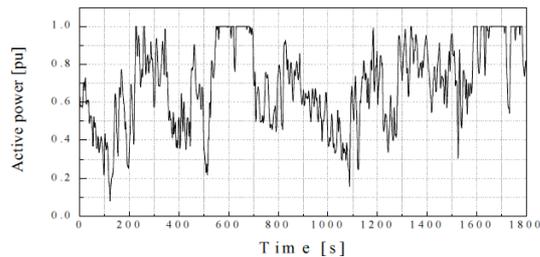


図 12. 風力発電機出力

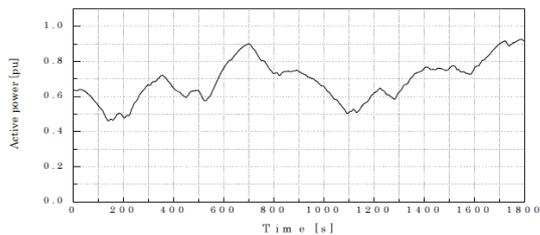


図 13. 燃料電池出力

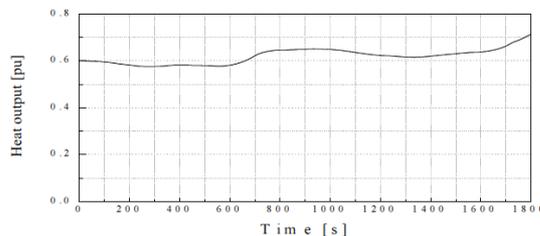


図 14. 燃料電池熱出力

Wind2の時の風力発電機出力、燃料電池出力、燃料電池熱出力をそれぞれ図 12~14 に示す。

続いて、以下に示す各ケースのシステムの周波数応答と CO_2 排出量を評価する。Case 1 の構成を図 15 に示す。Case 2 は図 10 に示した提案システムである。

- Case 0: ディーゼル発電機と負荷のみとした基本システムモデル
- Case 1: 風力発電機を単純に系統に接続したシステム
- Case 2: 風力発電駆動水素製造システムと燃料電池を導入したシステム

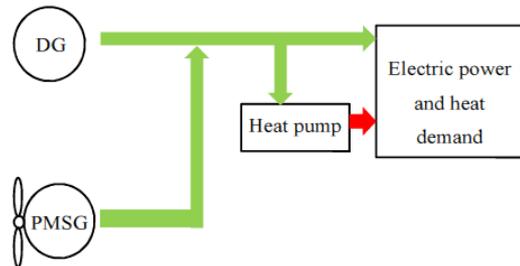


図 15. 風力発電機を単純に系統に接続したシステム

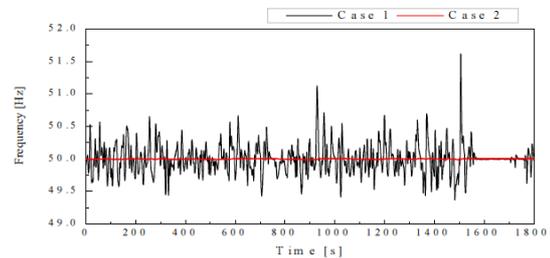


図 16. 系統周波数(Wind1)

図 16 に Wind1 の時の周波数応答を示す。これより提案システムにおいて格段に周波数変動が低減していることが明らかである。

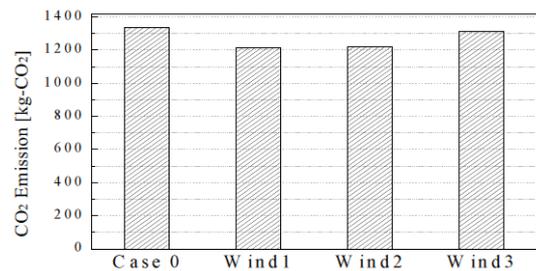


図 17. CO_2 排出量(Case 1)

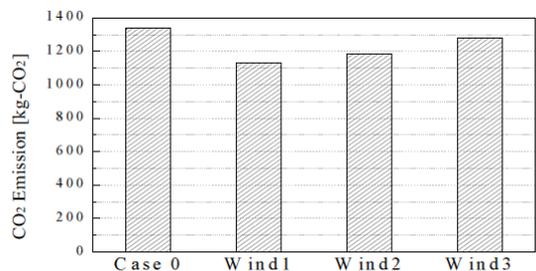


図 18. CO_2 排出量(Case 2)

次に、図 17-18 は Case 1 と Case 2 における CO₂ 排出量を示している。ここでは、風力発電機が導入されていない Case 0 も示してある。これより、風速に応じて差に若干違いはあるものの提案システムの Case 2 における排出量が一番低いことが見て取れる。

以上により、風力発電駆動水素製造システムと燃料電池から成る提案システムを小規模システムに導入することにより、周波数変動が抑えられ、CO₂ 排出量も低減できることが確認できた。

よって、以上の検討結果より、複数台のスタンドアロン風力発電機を DC-DC コンバータにより MPPT 制御しながら水素電解槽に電力を供給し、その水素と燃料電池により負荷に電力と熱を供給するシステムを離島のような小規模システムに導入することにより、環境負荷の高い CO₂ 排出量の削減に貢献できることが期待できる。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- 1) Kyouhei Nakajima, Atsushi Umemura, Rion Takahashi, Junji Tamura : Design of Battery System for Smoothing Wind Power Variations in Power System based on Frequency Response Analysis, Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems, Vol. 2, No. 3, pp. 342-348, 2013/09.
- 2) Kenta Koiwa, Rion Takahashi, Junji Tamura : A Study of Hydrogen Production in Stand-alone Wind Farm, International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), Vol.3, No.2, pp.372-378, 2013/06.

〔学会発表〕(計 7 件)

- 1) Yuta Yoshida, Atsushi Umemura, Rion Takahashi, Junji Tamura : Experimental Study of Hydrogen Production System with Stand-alone Wind Power Generators, Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER2015), #EVER15-78 (5 pages), 2015/03.
- 2) 高橋 渉, 梅村 敦史, 高橋 理音, 田村 淳二 : 小規模システムにおける風力発電駆動水素製造システムと燃料電池導入効果の基礎的検討, 電気学会回転機研究会資料 RM-14-140, 2014/10.
- 3) S Tahara, K Koiwa, A Umemura, R Takahashi, J Tamura : A New Method to Control Frequency Fluctuation of Power System with Wind Farm by using Hydrogen Generating System, Proc. of IET Renewable Power Generation Conference 2014, 2014/09.
- 4) Kenta Koiwa, Atsushi Umemura, Rion Takahashi, Junji Tamura : Stand-alone

Hydrogen Production System Composed of Wind Generators and Electrolyzer, The 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013), (6 pages), 2013/11.

- 5) Kenta Koiwa, Atsushi Umemura, Rion Takahashi, Junji Tamura : A Consideration on DC-DC Converter Control in Stand-Along Hydrogen Production System Using Wind Power, 平成 25 年電気学会電子・情報・システム部門大会, No.OS4-1, 2013/09.
- 6) Kenta Koiwa, Rion Takahashi, Junji Tamura : A Study of Hydrogen Production in Stand-alone Wind Farm, Proc. International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) 2012, (6 pages), 2012/11.
- 7) Daichi Watanabe, Rion Takahashi, Junji Tamura, Tomomichi Ito, Mamoru Kimura, and Akiyoshi Komura : Efficient Output Power Control Scheme for Stand-Along Wind Generator in Weak Wind Condition, 2012 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2012), #DS2G5-10 (6 pages), 2012/10.

〔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〕

なし

6 . 研究組織

(1)研究代表者

田村 淳二 (TAMURA JUNJI)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号 : 40171897

(2)研究分担者

高橋 理音 (TAKAHASHI RION)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号 : 60301975

(3)連携研究者

なし