

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04099

研究課題名(和文) 離島・非電化地域における自然エネルギー利用導入に向けたマイクログリッド技術の開発

研究課題名(英文) A designing of micro grid control for installation of renewable energy source in an isolated area

研究代表者

高橋 理音 (Takahashi, Rion)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：60301975

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、主に離島を想定した小規模独立電力システムにおいて再生可能エネルギー電源の導入拡大を図るための系統設計法および制御手法開発を目的として、主電源であるディーゼル発電の一部に可変速制御を導入することに加え、再エネ電源である風力発電も自ら部分的な出力制御を行うこと、さらに需要家に設置されている蓄電池の電力の一部を利用可能として、これらが協調的に変動電力抑制に参画する系統運用・制御手法を提案し、この有用性を検証するための解析モデルを構築した。解析の結果、何も対策を講じない従来の系統制御の場合に比べて、系統周波数変動を大きく抑制できるという成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国にも数多く存在する有人島のほとんどでは重油を燃料とするディーゼル発電でほぼ全ての電力がまかなわれており排ガス等の環境負荷が大きいため、マイクログリッド技術を活用した風力発電等の自然エネルギーを積極的に導入することは大いにメリットがある。本研究はマイクログリッド制御の一手法を提案し、風力発電などの変動電源が含まれていても主電源の高速な電力調整と風力発電との協調制御により変動抑制が可能であることを示した。また、本研究の成果は住宅用などの小規模なシステムへも応用可能であり、自然エネルギーを自宅に導入するような利用形態などを様々な条件で解析・提供することも可能としている。

研究成果の概要(英文)：In this study, the adjustable speed generator (ASG) is proposed for diesel engine-driven power plants to stabilize the fluctuating power from the renewable energy source (the wind power is specified in this study) in a micro grid, and its performance is evaluated through simulation analyses by using natural wind conditions. In addition to the employment of the ASG in the diesel power plant, the battery energy storage system (BESS) and the wind power are also proposed to support the frequency control of the ASG.

In the results, the proposed ASG can regulate the fluctuating power of the micro grid efficaciously, and its control ability can be enhanced by adding the cooperative power regulation of the BESS and the wind power. Consequently, it can be concluded that wind power utilization in an isolated micro grid can be augmented by employing the proposed coordinating control system of the ASG based diesel engine-driven power plant and the cooperation of the wind power and the BESS.

研究分野：電力工学・電気機器工学

キーワード：マイクログリッド ディーゼル発電 可変速発電機 風力発電 周波数安定化 系統制御 二重給電形 誘導発電機 蓄電池制御

1. 研究開始当初の背景

近い将来、枯渇する恐れがある化石燃料への依存からの脱却と、地球温暖化の主な原因であるCO₂の削減に向けて、さまざまな自然エネルギー利用技術が開発されており、その中で風力・太陽光発電の導入が最も顕著に進められている。しかし、現在は導入量の増大にともない連系する電力系統の負荷調整能力が限界に達しつつあるため、一部の地域ではこれら自然エネルギー発電の導入に制限が設けられていること(例えば[1])や、変動電力対策用として非常に高価な蓄電池設備の併設が発電事業者に求められている(例えば[2])など、化石燃料に代わるエネルギー源としての存在に至るまでの課題は多い。

一方で、風力・太陽光発電は大規模電力系統に連系する運用法だけでなく、マイクログリッドと呼ばれる独立した電力系統内で電力潮流を統括的に制御するシステムに導入することで電力系統運用上の制約に縛られない柔軟な運用も可能である。実際に実用規模での実証試験が行なわれている例[3][4]もあり、風力、太陽光、蓄電池ならびにガスエンジン発電を有する独立系統で安定な需給バランスを維持継続できるといった成果が得られていることから、自然エネルギー発電を分散電源として位置付ける手段として非常に有望なシステムである。

このようなマイクログリッドは、特に電力を全てディーゼル発電に頼っている離島において極めて有用である。我が国にも有人島が数多く存在するが、それらのほとんどでは重油を燃料とするディーゼル発電でほぼ全ての電力がまかなわれており、高コストな燃料の船舶輸送に加えて排ガス等の環境負荷も大きい。一方で離島は風況に恵まれているため、環境負荷および化石燃料依存の低減を図るためにもマイクログリッド技術を活用した風力発電等の自然エネルギーを積極的に導入することは非常にメリットが大きいと言える。また、離島に限らず、自然エネルギーに恵まれている地域であれば、その中でマイクログリッドを構成して電力の地産地消を行いながら大規模電力系統との協調的連系を行い、近年増加しつつある自然災害などにより大規模電力系統で発生する障害の影響を大きく低減させ、かつ復旧をバックアップする役割を担うことも可能である。

電力系統の設計においては実験的検証が非常に困難なため電子計算機を用いたシミュレーションによる設計と検証が中心となり、このために用いられる市販のシミュレーションソフトウェアでは設計の万能性を持たせるため様々な異なる機能を持つモジュールを数多く内蔵している。マイクログリッドの設計もシミュレーションに基づき行うが、マイクログリッドの構成は個々に異なり、必要なモジュールを選択してそれぞれ専用のモデルを作成しなければならず熟練した技術が要求されるため、系統設計者にとって大きな負担であり、時間とコストを要する。電力系統解析の分野では、大規模電力系統をごく簡易的にモデル化している標準モデルと呼ばれるものがあるが、その種類はわずかであり、マイクログリッドに関しては標準モデルは現在のところ見当たらない状況である。

(引用文献)

- [1] 経済産業省 資源エネルギー庁、「なぜ、太陽光などの「出力制御」が必要になるのか? ~再エネを大量に導入するために」、
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/qa_syuturyokuseigyo.html
- [2] 東北電力株式会社、「周波数変動対策に関する技術要件」、
https://www.tohoku-epco.co.jp/pastnews/normal/_icsFiles/afieldfile/2011/11/16/11111601_wp09t.pdf
- [3] 高野,他「八戸市マイクログリッドにおける自立運転の実証」, 電気学会論文誌 B, Vol.129, No.4, pp.499-506, 2009.
- [4] 山下, 他「小規模離島への風力発電導入時の系統周波数安定化方式の開発」, 電気学会論文誌 B, Vol.131, No.5, pp.437-446, 2011.

2. 研究の目的

マイクログリッドを構成するために必要な要素を包括している解析モデルの開発ならびにこれを用いた柔軟かつ効率的なマイクログリッド設計の実現を念頭に置き、主電源であるディーゼル発電、自然エネルギー電源としての風力発電ならびに需要家設置の蓄電池を擁するマイクログリッドモデルを開発する。これには、各電力設備の制御特性が互いに相反せず、系統安定化に相乗的に寄与するような制御パラメータの調整が含まれる。次いで、各電力設備の出力定格および様々な想定される風況の組み合わせを定め、それぞれのシミュレーション結果に基づいて、設備投資コストを抑制しながら安定な自然エネルギー発電利用を実現するためのマイクログリッド設計手法を導出する。本手法は、住宅などの小規模な配電系統へも適用できることを想定しており、自然エネルギーを自宅に導入した場合の利用形態を様々な条件で解析・提供することで、一般市民の関心をさらに高めてゆくことも視野に含めている。

3. 研究の方法

マイクログリッドへ供給される風力発電由来の電力は秒オーダーで変動するため、これに十分追従可能な制御系が要求される。また、これらの制御系はミリ秒オーダーの時定数を持つため、その応答特性も含めたマイクログリッドの動特性を高精度に模擬するために、本研究では瞬時値ベース実時間シミュレーションモデルを開発する。この条件に適合する解析プラットフォームの例として、電力系統解析ソフトウェア PSCAD/EMTDC を採用した。

初めに、マイクログリッドを構成するディーゼル発電モデル、風車の空力特性を考慮した風力発電モデル、蓄電池を備えた需要家モデルならびにこれらを連系する配電系統などの基本的な要素のモデリングを行った。次いで、ディーゼル発電に高速な電力調整能力を付加するために二重給電形誘導機を用いた可変速システムを導入し、制御系定数の調定を行って変動電力への高速な追従を可能とする環境を整備した。また 1 秒サンプリングで記録された 1 ヶ月分の風速測定値を用いて風力発電出力の応答を模擬した結果を蓄積することで、様々な想定される変動風速の下でも本研究の有用性を評価できる環境を整えた。

4. 研究成果

(1) 可変速システムを導入したディーゼル発電による変動電力追従性能の評価

可変速ディーゼル発電システムによる小規模電力系統における周波数変動抑制性能を評価するために、図 1 に示す 2 台のディーゼル発電システム DG1 および DG2 のうち、DG2 が従来の固定速同期発電機 (Synchronous Generator, SG) である場合と、本研究で提案する可変速二重給電形誘導発電機 (Doubly-Fed Induction Generator, DFIG) とした場合の系統応答を比較した。このとき、DG1 および DG2 の定格容量の比を表 1 に示す組み合わせとし、可変速 DFIG の主電源に占める割合に対する周波数変動抑制効果を検証した。系統における主な外乱として、ウィンドファームから自然風速に由来する変動電力が系統へ供給されるものとし、様々な変動パターンを持つウィンドファーム出力に対する可変速ディーゼル発電システムの有効性を評価するために、一ヶ月間の自然風速実測値からウィンドファーム出力の平均値および乱れ度に相当する標準偏差がそれぞれ異なる 9 種類の風速パターン (1 時間, 1 秒サンプル) を抽出して解析に用いた。図 2 にこれらの風速の下で得られるウィンドファーム出力の平均値と標準偏差を示す。ウィンドファームは定格出力 625kW のかご型誘導発電機 1 台構成としており、図 2 はこの定格出力をベース値としている。なお、この定格出力は、表 1 に示す条件のうち DFIG の主電源に占める割合が最も少ない Case 1A での DFIG 定格容量 (2.5MVA) に基づき定めた。すなわち、本研究で想定するディーゼル機関の最低出力は 50% (一般的に発電用ディーゼル機関では出力が 50% 以下になると燃費が非常に悪くなるため、出力 50% 以下の連続運転は好ましくないとされている) としているため、Case 1A における DFIG の出力可変幅は 1.25MW から 2.5MW となり、かつ本解析例では系統の周波数上昇、下降のどちらにも最大限対応するために出力基準値を 75% とすることより、 $\pm 25\%$ の幅で出力を可変できる状態としている。この 25% に相当する容量すなわち 625kW をウィンドファームの定格容量とした。なお、このウィンドファーム定格容量は表 1 に示すすべてのケースで同じとした。

需要家の電力に相当する Load A および B は系統の発電容量 (10MVA) に対して 75% の消費電力すなわち定格電圧 (6.6kV) のときそれぞれ 3.75MW の消費

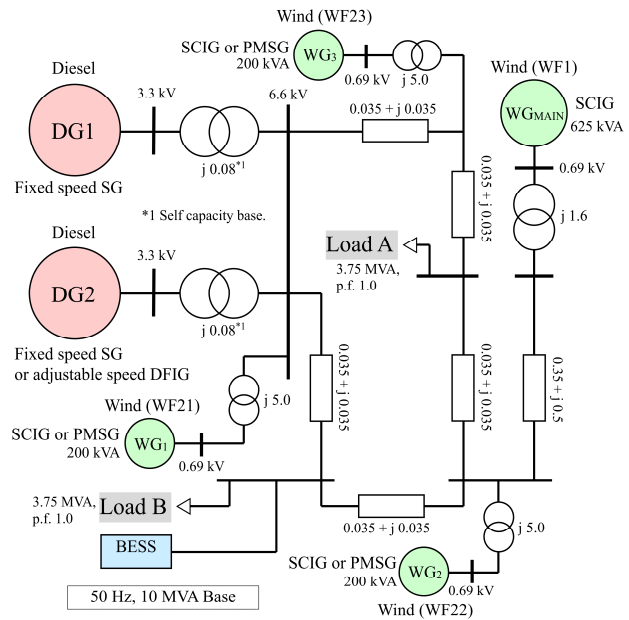


図 1 マイクログリッドモデル

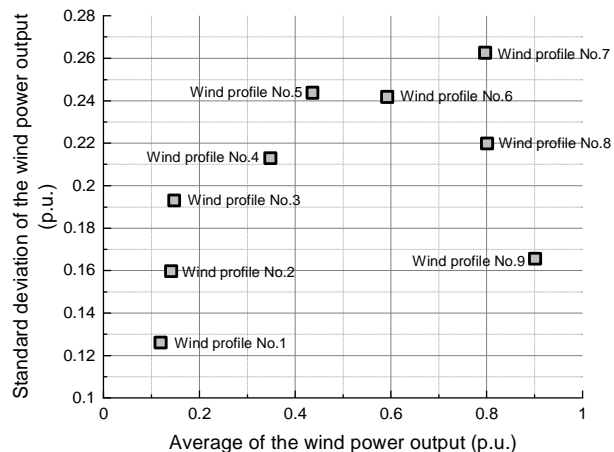


図 2 ウィンドファーム出力の平均値と標準偏差

電力とした。

これらの条件の下でシミュレーションにより得られた系統周波数変動の大きさを、基準周波数(50Hz)に対する変動の標準偏差として図3に示す。また、DFIGの速度変動の大きさも、基準速度(1.044p.u.)に対する変動の標準偏差として図4に、上昇・下降方向それぞれの最大・最小値として図5に示す。これより、2台のディーゼル発電システムとも固定速同期発電機であるときに比べて1台を導入容量比25%の可変速運転のDFIGにした場合でも周波数変動は大きく低減できることが分かり、9種類いずれのウィンドファーム出力変動パターンの下でもDFIGの導入容量比が大きいほど周波数変動が抑えられることが分かる。また、DFIGの速度変動は、Wind Profile No.6において導入比が25%の場合に許容可変速幅(上限1.3p.u., 下限0.7p.u.)の上限を超える瞬間があるが、その他の変動パターンでは許容可変速幅内に収められており、かつDFIGの導入容量比が大きいほど変動は小さくなることがわかる。なお、固定速同期発電機は速度変動はDFIGの速度変動とは形態が異なるため図には示していない。以上より、可変速ディーゼル発電システムが系統周波数変動に対して効果的な抑制性能を持つと言える。

(2) 風力発電の変動電力抑制への寄与と蓄電池の削減効果

本研究で初めて採用した風力発電システムはコストの低い固定速誘導発電機であるが、固定速のため風速変動に伴う出力変動が大きい課題もある。一方、現在ではエネルギー変換効率を高めるための可変速運転を行う風力発電システムが主流である。しかしながら、今後導入が進むと予想される洋上風力発電では、比較的安定した風が得られることから固定速誘導発電機が採用される可能性も高い。このことより、本研究では図1に示すように、(1)節で述べた固定速誘導発電機(WG_{MAIN})1台からなるウィンドファーム(Wind Farm 1, WF1)に加えて複数のウィンドファーム(WF21, WF22, WF23)を導入した場合の系統応答を解析した。WF21, WF22, WF23のウィンドファームはWF1と同様に1台の風力発電機からなるが、これらが可変速運転を行うものであることも想定し、さらに一般的な可変速運転方法である最大電力追従制御(MPPT)に加えて、系統周波数変動の抑制に寄与する出力制御を行う場合の効果も検証した。表2に解析条件を示す。各ウィンドファームに使用した風速パターンとして、図2に示すものの中から高風速であるものを選び、WF1ではWind Profile 9を、WF21~WF23ではそれぞれWind profile 6, 7, 8を用いた。また、本検討では、需要家に併設されている蓄電池の電力を一部制御可能であると想定し、この場合の周波数変動抑制に寄与する効果を合わせて検証した。図1において、3か所のウィンドファーム(WF21, WF22, WF23)および蓄電池設備(Battery

表1 DG1およびDG2の容量比

Case No.	DG1	DG2
Case 1A	SG 50% (5 MVA)	SG 50% (5 MVA)
Case 1B	SG 75% (7.5 MVA)	DFIG 25% (2.5 MVA)
Case 1C	SG 50% (5 MVA)	DFIG 50% (5 MVA)
Case 1D	SG 25% (2.5 MVA)	DFIG 75% (7.5 MVA)

* SG : Synchronous Generator

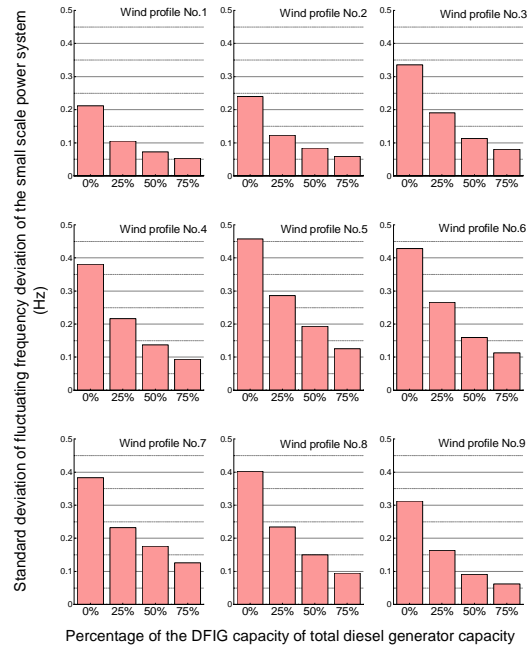


図3 系統周波数変動の標準偏差

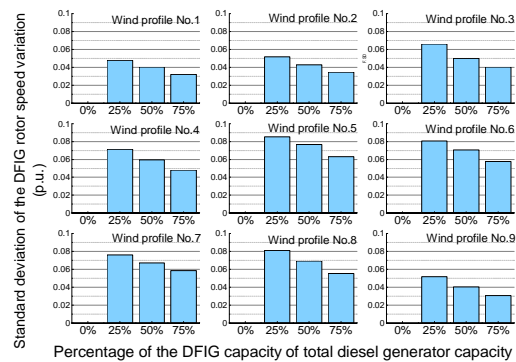


図4 可変速DFIG速度変動の標準偏差

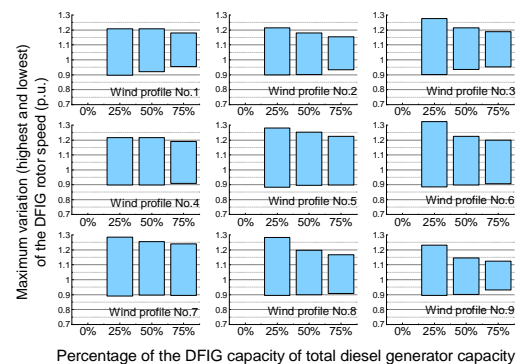


図5 可変速DFIG速度変動の最大偏差

Energy Storage System, BESS)の連系状態を示している。

以下より、(1)節で述べたマイクログリッドモデルに新しく追加したモデルならびに制御系の概要について示す。

可変速風力発電モデル

本検討では可変速風力発電として永久磁石同期発電機(PMSG)を採用した。一般的な風車では、ある風速の時に最大となる出力が得られる特性があり、これは風車回転速度の3乗に比例するため、発電機出力目標値すなわちMPPT目標値をこれに従い定める。また、MPPT目標値が定格を上回ったときに風を逃すピッチ角制御を働かせることで風車回転速度上昇を抑制するものとした。

可変速風力発電による周波数変動抑制のアシスト

可変速風力発電では、電力変換器制御により風速や風車回転速度に依存せず発電機出力を任意に決められる。一般的には、最大電力追従運転(MPPT運転)を行い、エネルギー変換効率を高める運転が行われる。一方で、風車に蓄えられている慣性エネルギーを利用して連系する電力系統において事故等で周波数が急変した場合に風力発電機から一時的にMPPT目標値を上回る電力を供給して周波数変動を抑制する手法も提案されている。

本検討では、3台の可変速風力発電に対して系統周波数変動を抑制するためにMPPT指令値を修正する補正出力制御系を導入し、可変速風力発電機群が可変速ディーゼル発電による系統周波数変動抑制をアシストするときの効果を検証した。これは、系統周波数変動がある閾値を超えたときに、その逸脱量に比例した補正出力指令値を生成し、これを各風車の持つ慣性エネルギーの比に応じて各風力発電機へ分配する中央制御系により実現する。

蓄電池による周波数変動抑制のアシスト

本検討では、需要家Bに設置してある蓄電池に対して電力の充放電を指令できるものと想定し、(1)節で述べた可変速風力発電機で行う周波数変動抑制と同様の制御を行った場合の効果を検証した。

解析条件および結果

本検討では、表2に示すような4つの条件を定めた。Case 2Aは本提案手法の比較対象として(1)節で示したCase 1Aの結果を再掲しており、Case 2BはWF2を有するが3台の風力発電機とも固定速かご型誘導発電機SCIGである場合、Case 2CはWF2を有し3台の風力発電機ともMPPT運転を行う可変速風力発電PMSGである場合、Case 2Dは、Case 2CにおいてPMSGが周波数変動抑制に寄与する場合である。また、それぞれのケースでDG1およびDG2がどちらも従来の固定速同期発電機である場合とDG2が可変速DFIG(容量比25%)である場合、ならびに蓄電池制御を併用する場合としない場合も併せて解析を行った。これらの条件の下でシミュレーションにより得られた系統周波数変動の大きさを、基準周波数(50Hz)に対する変動の標準偏差として図6に示す。DG2が可変速DFIGである場合は(1)節で示した結果と同様に周波数変動の抑制効果が得られているほか、Case 2Aに対して、Case 2B~2Dでは風力発電機導入量が計600kW増大しているため周波数変動は大きくなるものの、その度合いは著しいものではないことが分かる。Case 2B, 2Cに対して、Case 2Dでは周波数変動が小さくなっており、可変速風力発電機の出力制御による周波数変動抑制の効果が得られている。蓄電池を用いた場合も同様の傾向であるが、同じ程度の周波数変動であれば、可変速風力発電機の出力制御により蓄電池を小型化できることを示している。例えば、Case 2Bにおいて蓄電池定格が100kWであるとき、Case 2Dにおいて蓄電池定格が50kWであるときの周波数変動の標準偏差はほぼ同じであり、可変速風力発電機の出力制御により蓄電池定格を50%小さくできる。以上より、主電源構成の一部を可変速ディーゼル発電とすることに加えて、複数の可変速風力発電システムにおいて協調的な出力制御を行うことにより変動抑制の効果を高められると言える。

表2 解析条件

Case No.	DG1 and DG2	WF1	WF21, 22 and 23	PMSG control	Rated capacity of the BESS
2A	SG(50%)+	SCIG 625kVA	-	-	0 kW, 50kW, 100kW, 150kW
2B	SG(50%) or		SCIG 200kVA	-	
2C	SG(75%)+		PMSG 200kVA	MPPT	
2D	SG(25%)			Regulated	

* SG : Synchronous Generator

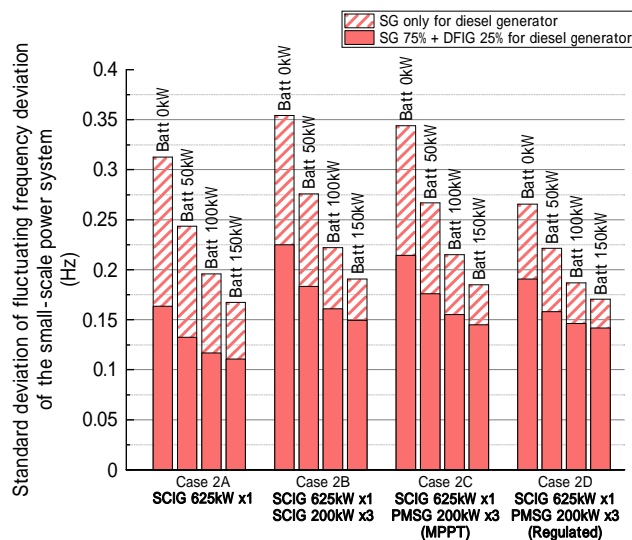


図6 系統周波数変動の標準偏差

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takahashi Rion、Umemura Atsushi、Tamura Junji	4. 巻 10
2. 論文標題 Cooperative Frequency Control of a Small-Scale Power System between Diesel Engine Driven Adjustable Speed Generator and Battery	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 9085 ~ 9085
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app10249085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takahashi Rion
2. 発表標題 A new control strategy for grid frequency stabilization of small scale power system by variable speed diesel-driven power plant
3. 学会等名 2nd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques 2021（国際学会）
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 高橋 理音
2. 発表標題 小規模電力系統における可変速ディーゼル発電システムの導入による系統周波数の変動抑制効果
3. 学会等名 令和2年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋 理音
2. 発表標題 可変速ディーゼル発電システムを用いた小規模電力系統における風力発電由来の周波数変動抑制法
3. 学会等名 令和2年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋 理音
2. 発表標題 再生可能エネルギーを有する小規模電力系統における可変速ディーゼル発電システムを用いた系統周波数安定化
3. 学会等名 令和元年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahashi Rion
2. 発表標題 An application of adjustable speed diesel power plant to frequency control of small scale power system with renewable energy sources
3. 学会等名 2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 理音
2. 発表標題 可変速ディーゼル発電システムを導入した小規模電力系統における周波数安定化制御法
3. 学会等名 平成30年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋 理音
2. 発表標題 可変速ディーゼル発電システムを導入した小規模電力系統における周波数安定化制御法
3. 学会等名 電気学会 回転機研究会 (2018年11月開催)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Rion Takahashi, Atsushi Umemura, Junji Tamura : A new control strategy for grid frequency stabilization of small scale power system by variable speed diesel-driven power plant, 2nd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques 2021 (ICREST 2021), No.164, 2021/01が、「Best Paper Award」を受賞.

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------