

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05924

研究課題名(和文) 間欠性出力電源主体の新世代電力システムを実現する超分散自律負荷制御の理論構築

研究課題名(英文) A Theory of Super-Distributed Autonomous Load Control for New Electric Power Systems Based on Intermittent Generators

研究代表者

齋藤 浩海 (Saitoh, Hiroumi)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：10202079

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：太陽光や風力など出力が間欠的に変動する再生可能エネルギー電源を活用するためには、電力システムの安定運用技術の高度化が必須である。本研究の目的は、その高度化のための自律分散的な負荷制御の理論を構築することである。負荷機器等と電力システムを一体化したモデルのシミュレーションにより、ヒートポンプ空調機制御に強化学習法を適用する方法や、負荷制御における機器使用の偏り解消に平均合意アルゴリズムが有効であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Penetration of renewable energy sources such as photovoltaic and wind power of which the electric power outputs intermittently fluctuate, requires the advancement of power system operation in order to maintain stable electricity supply. The purpose of my study is to develop a theory of autonomous decentralized load control to achieve the advancement. In the study, by the simulation of an integrated model of appliances and electric power system, it was clarified how reinforcement learning can be applied to control system of heat pumped air conditioner, and average consensus algorithm is useful to reduce the bias in the use of many appliances for the load control.

研究分野：電力系統工学

キーワード：電力システム 負荷制御 強化学習 合意制御 周波数制御 ヒートポンプ 電気自動車

1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギー電源の太陽光発電や風力発電の出力は天候により不確かかつ間欠的に変化するため、その割合が既存の火力・水力発電に比べて大きくなりすぎると、電力システム全体の電力の発生と消費のバランス、すなわち需給平衡を火力・水力発電の出力調整により保つことが困難になる。しかし、地球温暖化防止の観点から電源の主体を太陽光発電や風力発電の再生可能エネルギー電源に移行する必要がある、“間欠性出力電源主体の次世代電力システム”の安定運用を実現するシステム制御技術の開発が喫緊の課題である。

この重要課題を解決する有効な方法の一つに、多数の負荷機器、特にヒートポンプ空調機・給湯器や将来的には電気自動車(以下、EV)などの消費電力を調節して需給平衡を維持する負荷制御がある。ただし、地理的に広範囲に散らばった非常に多数の小さな負荷機器(例えば東北管内の電力システムを対象にすれば需要家総数約770万に匹敵する数の負荷機器)を、どのように組織的に動作させれば間欠性出力電源由来の需給不平衡を低減し、電力システム全体の安定運用を実現できるのかという挑戦的な技術的問題がある。

2. 研究の目的

本研究では、この多数の分散した負荷機器の消費電力制御を、自律分散システム概念を応用して実現する方法を明らかにしたい。具体的には、図1のように、電力消費の仕方に関する何らかの論理を組み込んだ負荷機器を“自律個”、電力システム全体の需給平衡維持を“秩序”、そして負荷機器が相互作用できる交流電力ネットワークを“場”に対応させて考え、需給平衡を維持し、かつ負荷機器の利便性を大きく損なわない自律的消費電力制御法(以下、超分散自律負荷制御)を考案することである。

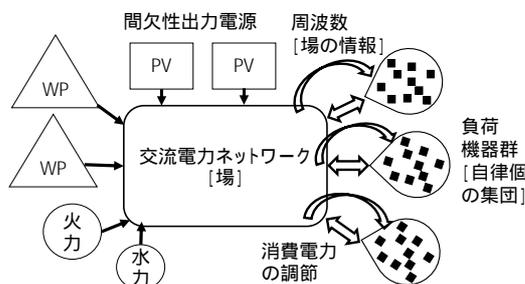


図1 超分散自律負荷制御の概念図

3. 研究の方法

(1) 需給不平衡を解消するための自律負荷制御論理の考案

負荷機器を、“インバータ等で消費電力を連続的に調節できる機器(以下、連続負荷)”と“スイッチの入り切り等で離散的に消費電力を変えられる機器(以下、離散負荷)”に分けて、それぞれについての制御論理を考案

する。

連続負荷: 機器の制御系に図2に示すような消費電力 L と周波数 f を関係づける直線特性を組み込まれ得るものと仮定し、その L - f 特性の傾き K と消費電力の変動可能幅 Δ の最適値を発見する方法を強化学習法などを応用して考案する。

離散負荷: 多数の負荷機器がそれぞれの消費電力をタイミングをずらして変更することにより、図2の階段状の L - f 特性を自己組織的に生成するための自律負荷制御の論理を、強化学習法や遺伝的アルゴリズムなどを応用して考案する。

(2) 超分散自律負荷制御論理の開発のための電力システムモデル

負荷制御の対象は数百万台オーダーの負荷機器であるので、最終的にはそれらの負荷機器を含む大規模電力システムモデルを作成し、計算機シミュレーションを実行する必要がある。ただし、超分散自律負荷制御の論理を検討するため、東北地域の系統を参考に系統容量10GW程度、配電用変電所数が200ほどの中規模の電力システムモデルを作成する。また負荷機器のモデルについては、研究代表者が実施している地中熱ヒートポンプ式空調機GeoHPの消費電力制御による周波数変動抑制の研究において実機から同定したモデルを利用する。

(3) 負荷機器の利便性が低下したときの人間行動のモデル化

ヒートポンプ空調機などの機器の利便性が負荷制御により損なわれるときの人間の負荷機器操作をモデル化し、そのモデルを用いて、負荷機器の利便性と負荷制御を協調させた制御論理を考案する。なお、人間の負荷機器操作のモデル化は関連文献の調査とGeoHP空調機負荷制御の実験結果利用して行う。

(4) 実規模電力システムモデルによる超分散自律負荷制御の実現可能性評価

人間の負荷機器操作モデルを組み込んだ超分散自律負荷制御の論理の有効性と問題点を、個々の需要家レベルまで模擬した実規模電力システムモデルの大規模計算機シミュレーションにより明らかにする。また、自律分散システムの特徴である耐故障性や信頼性などについても検証する。

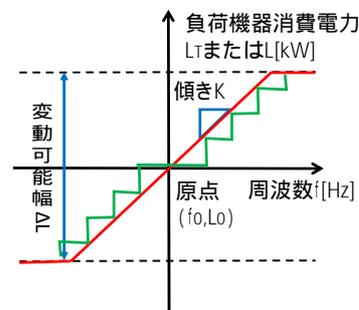


図2 周波数 f と負荷消費電力 L の調節特性

4. 研究成果

(1) 強化学習法を用いたヒートポンプ空調機制御による電力システムの周波数変動抑制

間欠性出力電源の連系量が増加した電力システムの周波数変動を抑制するため、ヒートポンプ空調機（以下、HP 空調機）の消費電力を強化学習法により制御する方法を考案した。考案制御法の特徴は、図3に示す通り給湯温度を使用者の設定範囲内に維持するためのフィードバック制御系と周波数変動を抑制するための強化学習制御アルゴリズムを組み合わせている点である。

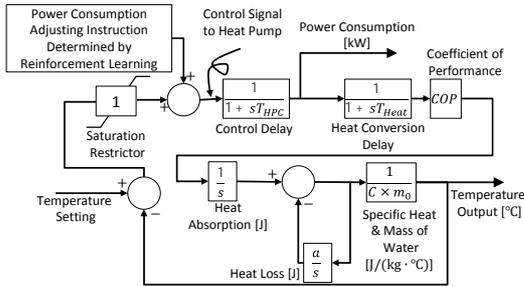


図3 考案したヒートポンプ空調機制御系

強化学習法を応用した負荷制御理論

強化学習は、ある環境においてエージェントがある目標について最適な行動を発見するための機械学習法である。これを電力システムの周波数変動抑制のための負荷制御に適用するため、電力システムを「環境」、HP 空調機制御系を「エージェント」、周波数変動の抑制を「目的」として捉えた。そして、電力システムという環境の「状態」、HP 空調機制御系というエージェントの「行動」、およびその行動に対する HP 空調機制御系エージェントの「報酬」を図4に示すように定義した。すなわち時点 k の状態 s_k を、時点 $k-1$ 以後に HP 制御系が計測した 4 時点の周波数変動 $\Delta f_1[k], \Delta f_2[k], \Delta f_3[k], \Delta f_4[k]$ により表わす。この状態に基づいて HP 制御系は消費電力変更量 a_k を決定し、HP 空調機の消費電力を変更するという行動を取る。この行動の影響が反映した形で周波数は時点 $k+1$ まで変化し、その時点で計測した周波数変動の大きさ

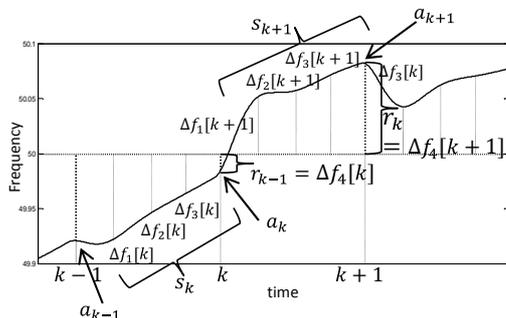


図4 考案の負荷制御系の状態、行動、報酬

$\Delta f_4[k+1]$ が小さければ HP 制御系に大きな報酬 r_k が与えられることになる。要するに時点 k で HP 制御系が取った行動 a_k の良し悪しが、この r_k によって評価されることになる。このような動作をする HP 制御系を Q-Learning アルゴリズムを用いた学習プロセスにより構築し、学習後の制御器を用いて消費電力の制御を行う。

シミュレーションによる検討

考案した HP 制御系の有効性を検証するため東北地域の電力システム規模（系統容量約 15000MW）のモデルを用いて数値計算シミュレーションを行った。なおシミュレーションにおいて、残余需要（電力需要から再生可能エネルギー電源の出力を差し引いた正味の需要）が振幅 300MW、周期 70 秒の正弦波と振幅 150MW、周期 600 秒の正弦波の合成された波形に従って変動するものと想定した。考案した HP 空調機の制御を行った結果、その消費電力は図5の下側のように変更され、周波数変動は図の上側の青い波形が示すように制御なし（赤い波形）の時に比べて抑制されることが明らかになった。

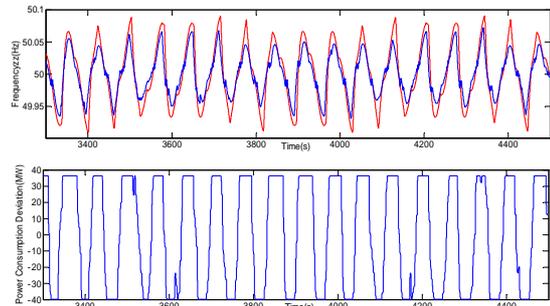


図5 周波数変動（上側）と HP 空調機の消費電力変化（下側）

(2) 負荷機器使用の偏りを低減するコンセンサス負荷制御

自律分散型負荷制御の課題

自律分散型負荷制御とは、個々の需要家所有の負荷機器 $\#i$ が電力システムに接続する点で計測した周波数変化 f に基づき自身の消費電力を L_i 変化させ、負荷機器集団として図2のように比例制御系（ゲイン K ）を形成することで、LFC が分担する需給不平衡の解消に貢献する負荷制御である。この制御の課題として、負荷機器の使用負担に偏りが生じてしまう点がある。この負荷制御は、図6に示すように各負荷機器に周波数変化のしきい値 $|f_s|$ が割り当てられており、そのしきい値を系統周波数変動が超えたときに割り当てられた負荷機器が自身の消費電力を

L_1 だけ増減させるという論理に基づいている。この割り当てられたしきい値が小さい負荷機器（図 6 中の LC_1 ）は小さな周波数変動に対しても消費電力を調節することになる。しかし、しきい値の大きい負荷機器（図 6 中の LC_2 ）は大きな周波数変動が発生しない限り消費電力を調節しない。このように負荷機器の使用の仕方において偏りが生じてしまうので、自律分散型負荷制御を実現するためにはこの偏りを解消することが重要になる。

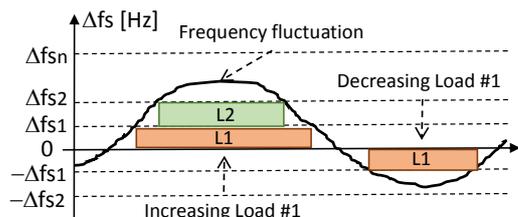


図 6 負荷機器使用における負担の偏り

平均合意アルゴリズムの応用

負荷機器使用の偏りを解消するためマルチエージェントシステムで研究されている平均合意アルゴリズム（以下、ACA）を応用した負荷制御（以下、コンセンサス負荷制御または CLC）を考案した。その考え方は、図 7 に示すように負荷機器# i が負荷制御のために調節した消費電力の時間平均 La_i が、 n 台のすべての負荷機器に関する機器間平均 ALa よりも大きくなったとき、しきい値 $|fs|$ を大きい値に変更し、逆に ALa よりも小さいときは $|fs|$ を小さい値に設定する。この ALa の推定値としきい値 $|fs|$ の変更を平均合意アルゴリズムに基づいて行うことにより、負荷機器使用の偏りを自律分散的に解消する。

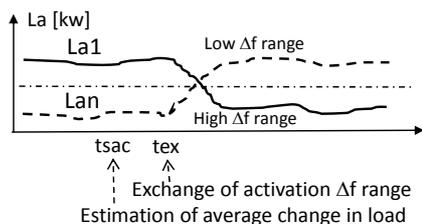


図 7 ACA による負荷機器使用の偏りを低減する方法

シミュレーションによる基本的検討

考案したコンセンサス負荷制御の動作を確かめるため、簡略化した電力システムの周波数制御系のモデルを用いてシミュレーションを行った。負荷制御対象外の負荷変動の振幅は系統容量の 5%、周期は 30 分の正弦波に従うものと仮定した。またコンセンサス負荷制御の動作を確認し易くするため 2 グループの負荷機器集団を考え、それぞれの消費電力変化 L_1 と L_2 の大きさを系統容量の 0.2% に設定した。また各集団の周波数変動しきい値の初期値を、集団#1 は $fs_1=0.02\text{Hz}$ 、集団#2 は $fs_2=0.08\text{Hz}$ とした。なおシミュレシ

ョンでは、40 分毎に ACA が起動し、20 分間の機器間平均 ALa_i の推定計算に基づいてしきい値 $|fs|$ の入れ換えを決定した。

シミュレーション結果の一例を図 8 と図 9 に示す。図 8 中の時刻 64 ステップ（16 分）時点の周波数変動値が示すように、わずかではあるが負荷制御により周波数変動が抑制されている。ただし負荷制御により各負荷機器集団の消費電力はステップ状に変化するため、その変化時点において過渡現象が周波数に現れている。図 10 には、負荷制御のために調整された負荷消費電力の時間平均 La_1 と La_2 、および時刻ステップ 80（20 分）で ACA が起動し、機器間平均 ALa_1 と ALa_2 が求められる過程が示されている。ステップ 80 における負荷機器集団#1 の時間平均 La_1 が、機器間平均 ALa_1 よりも大きく、逆に集団#2 の La_2 が ALa_2 よりも小さかったため、ステップ 160（40 分）において周波数変動しきい値の入れ換えが行われている。このシミュレーションよりコンセンサス負荷制御が負荷機器間の使用の偏りを解消しつつ、電力システムの周波数変動を抑制し得ることが明らかになった。

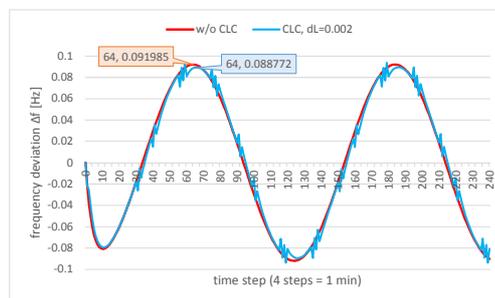


図 8 CLC による周波数変動抑制

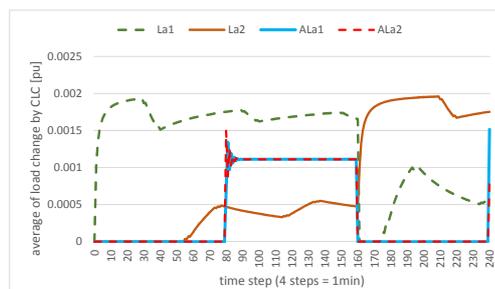


図 9 ACA による負荷消費電力の機器間平均の推定

(3) 平均合意アルゴリズムを用いた EV 搭載蓄電池群の制御による周波数変動抑制

考案した EV 搭載蓄電池群の制御方法

EV が普及し、その台数が十分に多くなれば、その搭載されている蓄電池を電力システムの需給バランス状況に合わせて充放電させることにより、電力システムの周波数変動を低減できる可能性がある。このときの課題の一つに、需要家所有の EV 利用において、需要家間の公平性、すなわち EV 搭載蓄電池の充電状態（以下、SOC）に需要家間で偏りを

生じさせないように充放電制御を行う必要がある。このような制御を実現するため、本研究ではマルチエージェントシステムにおける平均合意アルゴリズムの応用を試みた。

考案した EV 搭載蓄電池群の制御の概略を図 10 に示す。まず、一定区域内の EV をまとめて管理するローカルコントロールセンター(以下、LC)を複数設置する。各 LC は管理する EV の状態を監視し、全体の充放電能力を系統運用者(以下、TSO)に送る。TSO はそれに応じた充放電指令を決定し、充放電指令を LC に送る。LC はその指令を各 EV へ送信する。各 EV は、平均合意によって共有する LC 内全 EV の SOC の平均値を参照し、自身の蓄電池の SOC が平均 SOC に近づくように充放電を行う。

まず EV 充電ステーション毎にエージェントが設定され、各エージェントは自身が管理する EV の SOC 情報と充電電力情報、放電電力情報を初期情報として持っている。各エージェントは通信線で直接接続された隣接エージェントの情報を取得できるので、平均合意アルゴリズムに基づいて隣接エージェント間で情報の平均値の送受信を繰り返すことにより、各エージェントは全エージェントに関する EV の SOC と充電・放電電力の平均値を入手できることになる。

ある区域の EV 充電ステーション群を管理する LC は、平均合意アルゴリズムによって推定された SOC の平均値を用いて、その区域全体として充電・放電可能電力を算定し、それらの情報を電力システム全体の制御・管理に責任を負う機関の TSO に提供する。

TSO は、SOC の大きい LC から優先順位をつけ、例えば LFC 指令値が放電指令の場合、SOC の大きい LC へ順に放電指令を送る。TSO から充放電指令を受けた LC は管理下の全 EV に対して充放電指令を送信する。なお各エージェントは初期情報の内の充電電力情報と放電電力情報を参照し、EV に送信する充放電指令を作成する。

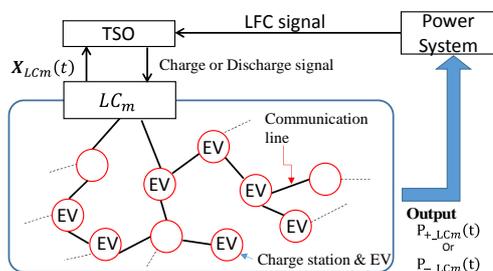


図 10 EV 搭載蓄電池群の制御の概念図

シミュレーションによる検討

考案した EV 搭載蓄電池群の制御による周波数変動抑制効果と SOC の偏り解消 (SOC 同期と呼ぶ) の効果を、東北地域の規模の電力システムを想定した周波数変動解析モデルにより検討した。また EV 群の動的モデルを、東北運輸局管内の一般乗用車台数の統計デ

ータや EV と PHV (プラグインハイブリッド自動車) の普及率のデータおよび道路交通情報のトリップデータなどを用いて、図 11 のように想定した。さらにエージェント間の情報通信ネットワークの構成として、低密度と高密度の 2 つの異なるサークル状の構成を想定し、エージェント全体での平均情報を得るまでの時間とその制御性能への影響を分析できるような設定も行った。

シミュレーションの結果、図 12 に示す通り、低密度の通信ネットワークの場合の方が高密度のネットワークの場合より平均情報を得るのに時間がかかっているが、図 13 に示す通り、その差は周波数変動に大きな影響は及ぼさない可能性のあることが明らかになった。また、図 14 に示す通り、EV 間の SOC 同期も通信ネットワーク構成に大きな影響を受けない可能性があることも分かった。

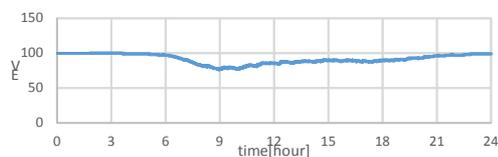


図 11 充放電制御可能な EV 台数の時間変化

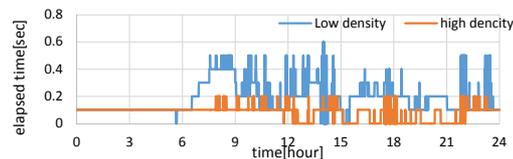


図 12 平均情報入手時間の変化

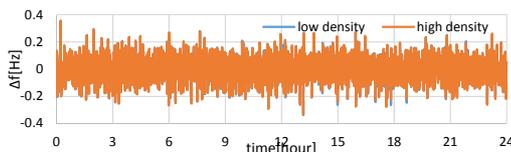


図 13 電力システムの周波数変動

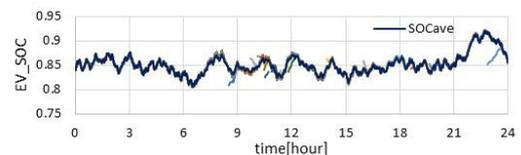
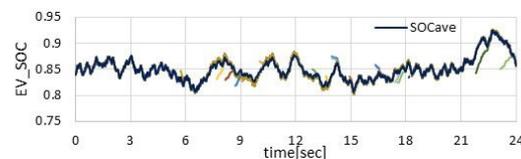


図 14 EV の SOC の時間変化 (上:高密度通信ネットワーク、下:低密度通信ネットワーク)

(4)今後の展望

本研究において残された課題を列挙すると次の通りである。

数百万オーダーの負荷機器をモデル化し、大規模計算機によるシミュレーションによる検討

負荷機器の利便性が低下したときの負荷機器使用者の行動分析とそのモデル化

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)

織原大、齋藤浩海、風力発電導入時の周波数制御に貢献するバッテリーアシスト型 LFC の所要蓄電池容量の評価、電気学会論文誌 B、査読有、138 巻、2018、印刷中

D. Orihara and H. Saitoh, Improvement of frequency stability by using battery to compensate rate shortage of LFC reserve, Journal of International Council on Electrical Engineering, Peer review, Vol. 6, 2016, pp.146-152

DOI:10.1080/22348972.2016.1202398

織原大、齋藤浩海、風力発電連系系統における電源出力変化速度に適応的なバッテリーアシスト型負荷周波数制御、電気学会論文誌 B、査読有、136 巻、2016、515-523

DOI:10.1541/ieejpes.136.515

[学会発表](計19件)

齋藤浩海、織原大、周波数制御支援を目的とした需要側機器使用の偏りを低減するコンセンサス負荷制御の提案、電気学会全国大会、2018 年

高田聖也、織原大、齋藤浩海、自律分散 LFC における平均合意アルゴリズムに基づく最適な調整力配分係数の推定法、電気学会全国大会、2018 年

高田聖也、織原大、齋藤浩海、平均合意アルゴリズムを活用した電源の運転状態に適応的な自律分散負荷周波数制御、電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会、2017 年

木村昇太、織原大、齋藤浩海、SOC 同期機能を備えた LFC 支援 EV ネットワークにおける通信接続構成が周波数制御性能に与える影響、電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会、2017 年

木村昇太、織原大、齋藤浩海、LFC を支援する電気自動車群の平均合意アルゴリズムによる広域 SOC 同期手法、電気学会電力・エネルギー部門大会、2017 年

木村昇太、織原大、齋藤浩海、平均合意アルゴリズムに基づく SOC 同期機能を備えた電気自動車群による周波数変動抑制制御、電気学会全国大会、2017 年

徐天放、織原大、齋藤浩海、LFC を支援する強化学習ベース負荷制御の性能と負荷変動特性の関係、電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会、2016 年

T. Xu, H. Saitoh and D. Orihara, Reinforcement Learning Based Heat Pump Controller for Load Frequency Control in Power System, Proc. of ICEE 2016, 2016.

外 11 件

6. 研究組織

(1)研究代表者

齋藤 浩海 (SAITOH, Hiroumi)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10202079