

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560329

研究課題名(和文)次世代電力システムを構成する小規模システムのオンデマンド需給制御に関する研究

研究課題名(英文)An on-demand generation regulation control for small independent power grids

研究代表者

造賀 芳文 (Zoka, Yoshifumi)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40294532

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：小規模電力システムに対し、出力変動が大きい太陽光発電(PV)、風力発電(WT)などの不確定電源について、オンラインでその変動を捉え、過剰な変動がある場合にはオンデマンドで出力を制御する「オンデマンド需給制御」システムの提案・試作・検証を実施した。要素モデルを含め、ある離島システムを一例としてモデル化し、試作したプロトタイプを用いてシミュレーション実験と現象の考察を行った。制御基準として評価指標を提案、それに基づいた制御方法について検討し、EV充電制御の効果についても検討を行った。最終的に、PV・WTを区別した制御およびEVの利便性をも考慮した充電制御による新しい制御方法を構築することができた。

研究成果の概要(英文)：In this research, an on-demand control system for demand and supply control has been proposed, which is mainly suitable for small independent power grids with unstable renewable energy generators, for example, photovoltaic (PV) and wind turbine (WT) generators. The proposed system has been named as "On-demand Generation Regulation Control (OGRC)" system, which is always observing the unstable generator outputs and watching power grid status including electric vehicles (EV) charging behavior to realize on-demand regulation of unstable generators.

A test system has been modeled based on a certain isolated island grid with possible components including PVs, WTs and EVs. An evaluation index for the regulation control has been proposed and several numerical simulations have been performed based on the index. In final, a new regulation control method (OGRC) has been built that realizes the effective regulation control of PVs and WTs with considering EV owners' convenience and satisfaction.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電力工学 マイクログリッド 太陽電池 風力 電気自動車

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究の学術的背景

近年、いわゆる「スマートグリッド」に注目が集まっている。欧米と日本とでは背景が異なり、また目指す具体像も違っているが、基本的には情報通信技術 (ICT) を活用し、自然エネルギーの積極的な利用やエネルギーの効率的な使用を実現することが主眼である。そのためには、出力の変動が激しく電力系統に悪影響を与える風力発電、太陽光発電など自然エネルギー電源 (以降、不確定電源という) に対して、需要 (負荷) の変動も考慮しつつ、臨機応変に制御することも大きな課題となっている。

そこで最近、以前から提案されていた「マイクログリッド」 (以降、MG とする) などの自律型で独立運転可能なシステムに改めて注目が集まっている。不確定電源の出力変動は MG 内で処理され、スマートグリッドへの親和性も高いため、スマートコミュニティの一部としても研究が進んでいる。

本研究者も、以前から MG に関連する研究を行ってきており、MG 自体の安定性・経済性や、DG の連系・解列まで考慮した周波数制御のあり方などについて検討してきた。しかしながら、今後予定されているような大規模な太陽光発電の導入を考慮すると、不確定電源に対してさらに積極的に制御することも必要であると考えられる。

一般的には、たとえ小規模系統といえども、需給運用・制御については基幹系統と同様の業務が必要となる。すなわち、綿密な需要 (負荷) 予測をもとに、長期から短期の需給計画を立て、月間、週間、日間と順次補正を行い、さらに負荷周波数制御 (LFC) やローカル制御 (ガバナ) 等によりリアルタイムな需給調整を行うと考えられる。従来は、主な変動要因および予想はずれの要素が負荷のみであったため、それほど大きく計画を外すこともなく、非常事態に備えるための予備の供給力 (予備力という) もそれほど大きく持つ必要はなかった。

しかしながら、不確定電源が大量に入ってくると、通常的需求予測に加え、不確定出力による影響をも予測する必要がある。予測すべき不確定要因が増えるため、必然的に用意しておくべき予備力も増える。この予備力が、自然エネルギー導入の上限を決めることになるため、拡大を図ると予備力の増強が避けられず、コストの増大を招く。特に、小規模系統を対象とした場合にはこの傾向が顕著であり、大きな課題として挙げられている。

2. 研究の目的

よって本研究では、MG のような小規模自律系統において、不確定電源の出力変動が当初の予測をはずれて想定外に大きくなった際に、その電源の出力を抑制することにより系統状態の維持を図るような機能を考える。このような機能を含む柔軟な制御を「オンデマ

ンド需給制御: OGRC (On-demand Generation Regulation Control)」と称し、その制御方法の検討、プロトタイプ of 構築・検証を本研究の目的とする。

不確定電源は、出力変動が大きい電源であることに変わりはなく、抑制することによって供給力が不足する恐れもある。よって、抑制後の状態も計算・推測することで、できるだけ不確定電源の有効活用を図る。これが実現すれば、不確定電源の連系可能量の拡大または過剰な予備力の削減が期待できる。

また、上記の考え方は、今後普及が進むと思われる電気自動車 (EV) バッテリーの活用にも応用が可能である。定置型のバッテリーはいつでも連系されているが、EV は移動してしまうことが最も大きな問題となる。しかしながら、EV も不確定な機器として取り扱うこととし、連系している間に EV の充電特性をシステム側から制御することができれば、まさに本研究にて提案する枠組みに合致する。よって、EV も OGRC の対象に組み込み、制御可能な負荷として積極的に活用するような、柔軟な制御方法の構築を目指す。

3. 研究の方法

具体的な研究方法としては、まずシミュレーションのための (1) モデル構築から始め、次に不確定電源の出力変動の観測・評価方法および制御則策定のための (2) 評価指標の策定、提案を行った。これには、EV の充電制御の取り扱いも含まれる。その後、実際に実系統をベースにしたシステムモデルを用いて (3) シミュレーションを行い、その効果を検証した。

(1) モデル構築

まず、シミュレーションのための構成機器などのモデル化を行った。以前の研究で構築済みのモデルについては更新・調整を行い、新たに PV や WT などの不確定電源、EV の充電システムモデルなどを作成した。本研究の目的は全体的な枠組みの提案にあることから、扱いやすく信頼のおけるシミュレーションパッケージを用いた方が効率的であると考え、MATLAB[®] および Simulink[®] を使用し、モデルを作成することとした。

続いて、典型的なケースを考えるため、ある離島の電力システムを参考に小規模な独立システムのモデルを構築し、上記の構成機器モデルを配置した。

(2) 評価指標

出力抑制・制御のための判断基準は明確に決めておく必要がある。例えば、調整容量、周波数変動許容量、電圧変動制限、送電線容量、短絡容量などが関係すると考えられる。ただ、本研究にて提案しているオンデマンド需給制御 (OGRC) システムは調整容量 (周波数制御) にのみ焦点を当てており、他の要件は予め、計画段階にて適切に計画、調整されていると仮定している。

その上で、観測した出力変動、負荷変動などから、制御が必要かどうかの評価指標を必

要な調整容量という観点で策定、提案した。具体的には「4. 研究成果」にて説明する。

(3) シミュレーションによる検証

上記(2)にて提案した評価指標を含むアルゴリズムを開発し、全体的な OGRC システムを実装した。システムの有効性を確認するために、上記(1)にて構築したモデルシステム用いてシミュレーションを行った。以下、具体的な研究成果について示す。

4. 研究成果

研究期間中、進捗状況に応じて様々な検討を行ってきたが、ここでは最も代表的な検討例（主に文献②）について概要を示す。

(1) 必要調整容量の推定方法

ここでいう調整容量とは、負荷変動などによる需給バランスの不整合を調整することのできる発電機の調整容量のことを指す。本研究では、以下(i)式に基づいて必要となる調整容量を推定・計算することとした。

$$C_L = 4 \cdot \sigma_L = 4(\sigma_{PV} + \sigma_{WT} + \sigma_{Load}) \quad (i)$$

$$= C_{PV} + C_{WT} + C_{Load}$$

ここで、 C_L ：必要調整容量、 σ_L ：全変動量標準偏差、 σ_{PV} ：PV 出力変動標準偏差、 σ_{WT} ：WT 出力変動標準偏差、 σ_{Load} ：負荷変動標準偏差、 $C_{PV} = 4\sigma_{PV}$ 、 $C_{WT} = 4\sigma_{WT}$ 、 $C_{Load} = 4\sigma_{Load}$ である。

これは、負荷変動および不確定電源出力変動の信頼区間を 95% と仮定して導出したものであり、必要調整容量 C_L は、例えば過去 300 秒間について 2 秒間隔で観測し、計算される。

対して、今現在、電力系統内に存在している調整容量は（発電機に対する制御に左右されるが）、ここでは制御可能発電機容量の 10% と仮定し、式(ii)にて計算することとした。

$$C_0 = \alpha \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot S_i + K \cdot f_{lim} \quad (ii)$$

ただし、 C_0 ：保有調整容量、 α ：調整容量係数（ここでは、 $\alpha = 0.1 = 10\%$ ）、 n ：総発電機数、 P_i ：発電機 i の定格容量、 S_i ：発電機 i の連系状態（0：解列または 1：連系）、 K ：系統周波数特性定数、 f_{lim} ：周波数変動許容量である。ここで、系統周波数特性定数 K は式(iii)にて計算される。これは、EV の連系数によって制御可能な負荷の量が増え、逆の意味で調整容量が増えることを考慮している。

$$K = K_0 + K_{EV} \quad (iii)$$

なお、 K_0 ：EV 連系前の系統周波数特性定数、 K_{EV} ：EV による周波数特性定数であり、本研究では、許容周波数偏差を $f_{lim} = \pm 0.1\text{Hz}$ としている。

(2) 判断基準および制御量

周波数的に安定運用を保つためには、現存している保有調整容量 C_0 が必要とされる調整容量 C_L より大きくあるべきである。すなわち $C_0 > C_L$ が成立する必要がある、本研究では表 1 に示す判断基準を用いた。

表 1：抑制・復帰の判断基準

(動作)	判断基準
抑制	$C_0 < C_L$ が 30 秒間継続
復帰	$C_0 / 2 > C_L$ が 30 秒間継続

また、上記の判断基準が満たされた場合も、どの程度の量が抑制、復帰されるべきかが重要である。PV と WT とではその出力特性も異なり、さまざまな検討の結果、それぞれ別々に制御することとし、その制御量を以下のように決定した。

$$m = \frac{C_0}{C_L} \quad (iv)$$

$$CV_{PV} = \frac{C_{PV}}{SMA_{PV}}, \quad CV_{WT} = \frac{C_{WT}}{SMA_{WT}} \quad (v)$$

ここで、 m ：必要抑制容量比、 CV_{PV} ：PV 出力変動係数、 CV_{WT} ：WT 出力変動係数、 SMA_{PV} ：PV 出力単純移動平均、 SMA_{WT} ：WT 出力単純移動平均である。

出力変動係数 CV_{PV} 、 CV_{WT} は、それぞれの移動平均に対する比で表され、これを用いて適切な抑制・復帰量を推定する。概念図を図 1 に示す。

(3) EV 充電制御方法

本研究では、EV の充電は制御可能であるものとし、制御可能負荷として周波数制御に積極的に活用することを仮定している。ただ、EV のオーナーからすると、できるだけ早く充電を完了し、いつでも使えるようにしておきたいと考える。一方、OGRC システムから見ると、不確定電源の変動吸収にできるだけ活用し、不必要な抑制を避けることが目的である。よって、OGRC システムでは従来の一定速度充電ではなく、臨機応変に充電速度を変更する充電制御方式を採用した。これは、オーナーの満足度を考慮するために充電レベル（SOC：State of Charge）によって充電速度を変更し、かつ系統の状態によっても一時的にその充電速度を調整する制御方法である。図 2 に充電特性を示す。この図は横軸が周波数偏差、縦軸が充電速度を表している。

基本的に、現在の系統周波数が高ければ電力が余っているということであり充電速度を増速（負荷が増加）し、逆に周波数が低ければ減速（負荷が減少）するという線形特性である。これにより、周波数変動を抑える方向

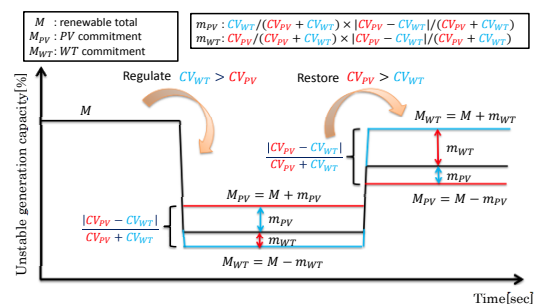


図 1：抑制・復帰量の推定

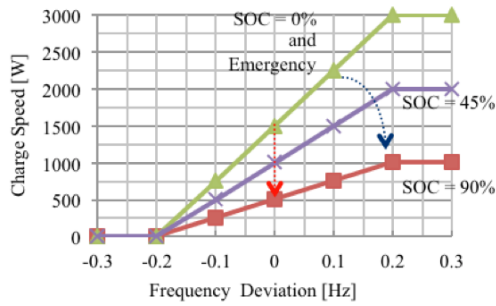


図 2 : EV 充電特性の例

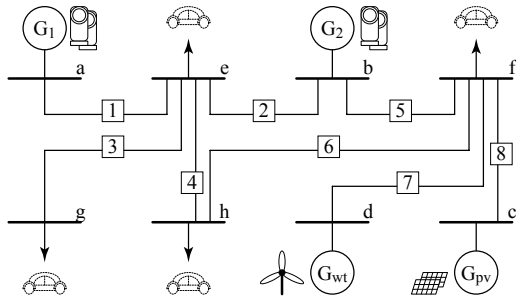


図 3 : テスト系統

に制御される。

ここで、この図 2 において、ある EV が低い SOC で系統に連系して充電をしているのであれば、上側の特性（例えば、緑の特性：SOC=0%と表記）とし、できるだけ速く充電を行うことで EV オーナーの要望に応える。しかし、OGRC から見た場合、SOC が上がり過ぎると制御の余地が少なくなってくるため、SOC が上がるに従って徐々に充電速度を落としている（図中点線の変化）。

さらに、大きな周波数変動が起こった場合は緊急事態（Emergency と表記）とし、EV 充電制御を可能な限り活用するため一時的に上側の特性（緑の特性）に変更するというロジックも採用した。

以上のように、オーナーの要望に応えながら制御性も確保していることが OGRC の特徴である。これらの効果については、後のシミュレーションにて定量的に示す。

(4) シミュレーション

開発した OGRC の性能を確認するため、シミュレーション計算を行った。以下、その概要を示す。

本研究では、ある離島系統を参考とし、ディーゼルエンジン発電機 (DE)、PV、WT、EV を配置したモデル系統を構築した。図 3 に、そのテスト系統を示す。従来型発電機として 2 箇所に DE が設置され、PV および WT がそれぞれ 1 箇所に連系されている。EV は、すべての負荷ノードに連系される可能性があり、その連系数は時間的に変動すると仮定している。各要素モデルの詳細は省略するが、DE は一般的な Park モデルをベースに開発され、容量に応じたパラメータに調整されている。PV も容量に応じたパネルアレイを模擬

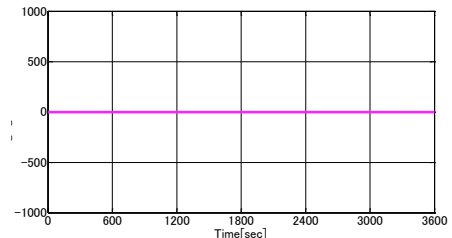
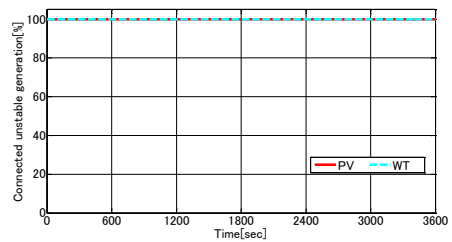
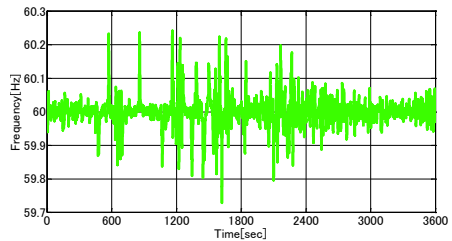
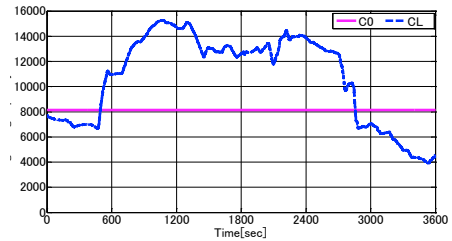
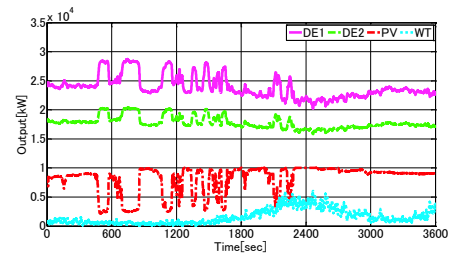


図 4 : Case 1 (上から出力, 調整容量, 周波数, 連系数, EV 充電)

し、パワーコンディショナからの出力をモデル化しており、日射量データは実測値をベースに用意した。WT も同様に出力をモデル化している。

①シミュレーション条件

発電機構成について、表 3 にまとめる。ただし、OGRC の性能を効果的に評価するため、参考とした離島系統より PV、WT の容量を大きめに設定している。

表 3 : 発電機構成

発電機	定格出力 kW
DE 1 (G ₁)	40,000
DE 2 (G ₂)	21,500
PV (G _{PV})	10,000
WT (G _{WT})	10,000

シミュレーションケースとしては、次の表

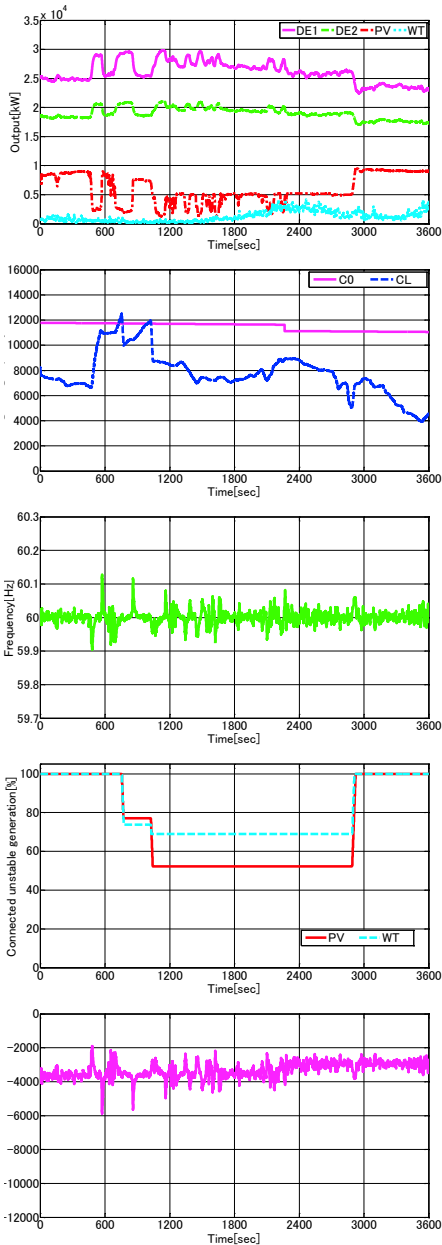


図 5: Case 2 (上から出力, 調整容量, 周波数, 連系量, EV 充電)

4 に示す 3 ケースを用意した。

表 4: シミュレーションケース

ケース	OGRC	EV 充電制御
Case 1	OFF	なし
Case 2	ON	SOC 考慮
Case 3	ON	SOC 考慮+緊急時制御

Case 1 は何も考慮されていないベースケースであり, Case 2 は OGRC に SOC を考慮した EV 充電制御が含まれるもの, Case 3 が緊急時制御まで考慮したものである。

②シミュレーション結果

Case 1~Case 3 のシミュレーション結果を図 4~6 に示す。シミュレーション時間としては, 0 秒に始まり 3600 秒までの 1 時間を想定している。各図において, 上から
各発電機の有効電力出力値 [kW],

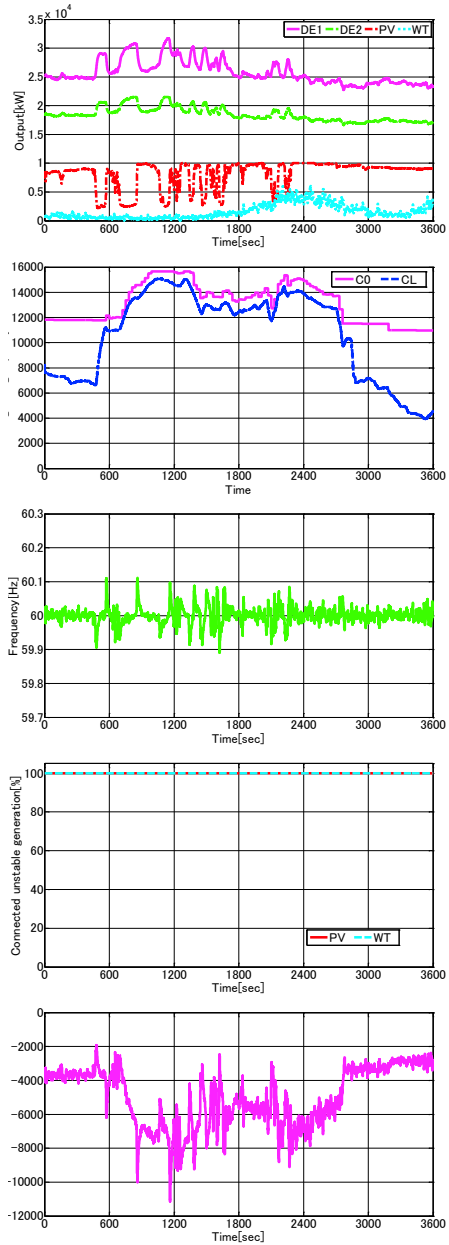


図 6: Case 3 (上から出力, 調整容量, 周波数, 連系量, EV 充電)

保有・必要調整容量 [kW],
周波数観測値 [Hz],
PV・WT 連系容量 [%],
EV 充電量 (総和) [kWh]
をそれぞれ表している。

《Case 1》

OGRC が導入されていないベースケースである。典型的な例として, 500 秒あたりで PV の大きな変動があり, それが計算された必要調整容量 C_L に現れていることが分かる ($C_0 < C_L$ が成立)。しかし, OGRC が導入されていないため何も制御されず, 結果的に周波数が許容幅 $\pm 0.1\text{Hz}$ を超えて 60.23Hz あたりまで変動しており, その後もこの傾向が続く。

《Case 2》

Case 2 は OGRC が導入されている。EV の充電制御も考慮されているため, 保有調整容量 C_0 も Case 1 に比べて大きく計算されることが分かる。

800秒あたりで $C_0 < C_L$ が成立しているため、PV、WTともに抑制されており、結果、周波数変動も許容値以内に保たれていることが見て取れる。また、2,900秒あたりではPVの出力変動も収まり復帰条件が満たされるため、PVもWTも適切に復帰していることが分かる。抑制、復帰制御は発生しているが、周波数は適切に制御されており、OGRCが適切に動作している証左といえる。

《Case 3》

Case 2に加え、EVの緊急時制御も加味したケースである。全体的に、Case 2と比較して周波数の変動が低く抑えられている。さらに、EV充電の緊急時制御が効果的に動作しており、結果的にPV、WTいずれも抑制されていないことが分かる。自然エネルギーがすべて有効に活用されており、OGRCの性能が確認できる。

(5) まとめ

提案したオンデマンド需給制御(OGRC)の有効性を確認した。今後の課題としては、出力変動や周波数変動のより信頼性のある検出方法、パラメータのさらなる調整や他の要素モデルの追加などが挙げられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① Y. Zoka, Y. Mashima, Y. Kuwada, Y. Sasaki, N. Yorino, “An On-demand Generation Regulation Control for small independent power grids with effective EV charging control,” Proceedings of the 48th International Universities’ Power Engineering Conference, 査読有, 2013, DOI: 10.1109/UPEC.2013.6714959
- ② Y. Zoka, R. Tonoda, Y. Mashima, Y. Sasaki, N. Yorino, “An on-demand control system for demand and supply control of small independent power grids,” Proceedings of the 47th International Universities’ Power Engineering Conference, 査読有, 2012, DOI: 10.1109/UPEC.2012.6398601

〔学会発表〕(計8件)

- ① 造賀芳文, 桑田泰範, 間島佑貴, 佐々木豊, 餘利野直人: 「オンデマンド需給制御システムによる自然変動電源の効率的連系に関する一検討」, 平成25年度(第64回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, pp. 87-88, 2013年10月19日, 岡山大学, 岡山市
- ② 渡井慧, 造賀芳文, 佐々木豊, 餘利野直人: 「負荷周波数制御のための電気自動車の充電方式の一検討」, 平成25年度(第64回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 7-11, pp. 83-84, 2013年10月19日, 岡山大学, 岡山市
- ③ 造賀芳文, 渡井慧, 出口翔太郎, 佐々木豊, 餘利野直人: 「電気自動車の充電制御による負荷周波数制御への貢献度評

価に関する一検討」, 平成25年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-13-144/PSE-13-160, 2013年9月11日~13日, 九州工業大学, 北九州市

- ④ 造賀芳文, 間島佑貴, 桑田泰範, 佐々木豊, 餘利野直人: 「自然変動電源を考慮した小規模独立系統におけるオンデマンド需給制御に関する一検討」, 平成24年度(第63回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 7-11, pp. 27-28, 平成24年10月20日, 島根大学, 松江市
- ⑤ 間島佑貴, 造賀芳文, 殿田竜士, 佐々木豊, 餘利野直人: 「小規模独立系統におけるオンデマンド需給制御のための太陽光発電出力変動特性に関する一検討」, 平成24年電気学会電力・エネルギー部門大会, 218, 2012年9月12日~14日, 北海道大学, 札幌市
- ⑥ 造賀芳文, 殿田竜士, 間島佑貴, 佐々木豊, 餘利野直人: 「EV充電制御を考慮した小規模独立系統におけるオンデマンド需給制御に関する一検討」, 平成24年電気学会全国大会, 6-149, pp. 265-266, 2012年3月21日~23日, 広島工業大学, 広島市
- ⑦ 造賀芳文, 殿田竜士, 間島佑貴, 佐々木豊, 餘利野直人: 「電気自動車を考慮した小規模独立系統におけるオンデマンド需給制御に関する一検討」, 平成23年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-11-053/PSE-11-070, 2012年9月28日~30日, 常翔学園大阪センター, 大阪市
- ⑧ 殿田竜士, 森岩正博, 造賀芳文, 佐々木豊, 餘利野直人: 「小規模独立系統における不確定電源に柔軟に対応するシステムの一検討」, 平成23年電気学会電力・エネルギー部門大会, 152, 2011年8月30日~9月1日, 福井大学, 福井市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

造賀 芳文 (ZOKA, Yoshifumi)

広島大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 40294532