

# 自然エネルギー発電設備が大量連系された配電系統の最適運用計画法

🔗 配電系統, 配電電圧制御, 蓄電池設備, 可制御負荷, 最適化計算

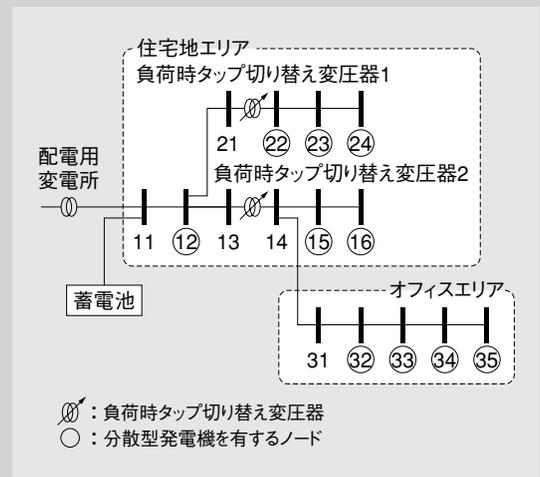
\* 千住智信 Tomonobu Senjyu

\*\* 舟橋俊久 Toshihisa Funabashi

## 概要

近年、太陽光発電システムや風力発電設備など再生可能エネルギーを利用した発電設備が配電システムへ積極的に導入されている。そのため、従来の単一方向な電力潮流が複雑化することが懸念され、配電システムシステムの運用が送電システムシステムの供給計画に影響を与えるおそれがある。

本研究では配電システムシステムと上位系統の連系点へ蓄電池設備を導入し、既存の電圧調整装置(変電所LRT, SVR)、太陽光発電設備の連系インバータによる無効電力制御と需要家側における可制御負荷との協調制御手法を提案し、配電電圧適正值維持及び系統連系点電力潮流の平準化を達成した。



配電システムモデル

## 1. ま え が き

近年、我が国では低炭素社会の実現を目指し、自然エネルギーを用いた分散型電源の導入が積極的に行われている。自然エネルギー発電設備は二酸化炭素を排出せず、再生可能エネルギー源として注目を集めている。しかし、気象条件により発電出力が大きく変動することから、配電系統へ大量連系された場合、配電電圧を適正範囲内で維持することが困難である。また、既存の配電系統は上流から下流への電力潮流を想定し構築されており、配電系統末端の電圧が分散型電源の連系により上昇することは考慮されていない。そのため、分散型電源の大量連系は上位系統への逆潮流を引き起こすなど様々な技術的課題を有している<sup>①</sup>。

本稿では、蓄電池設備・分散型電源連系インバータ・既存の電圧調整装置に加え、可制御負荷

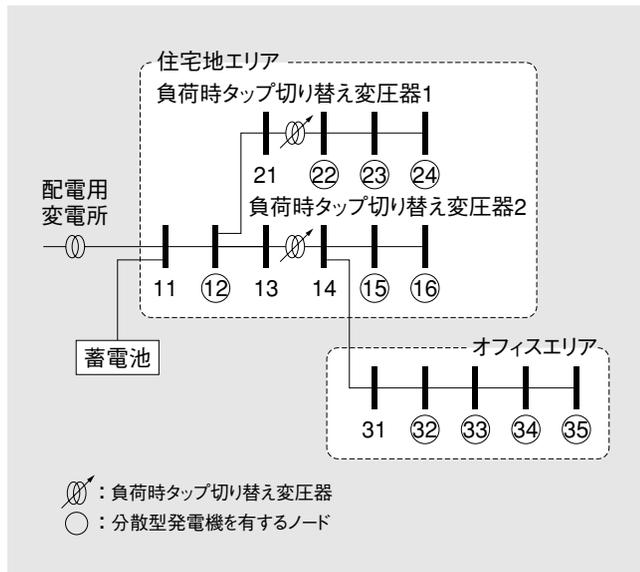
を考慮した配電系統の最適運用計画法を提案する。

## 2. 配電システムモデル

第1図に本稿で想定する配電システムモデルを示す。本図で番号を丸で囲んでいるノードは太陽光発電システムが大量連系されているものと想定している。太陽光発電は導入コストの低下や電力価格高騰に対する懸念から今後ますます増加するものと予測される。第1表に配電システムモデルの諸定数を示す。ここで系統容量及び公称電圧は、それぞれ5MVA及び6.6kVである。

電気事業法において、低圧受電の場合は供給電圧を $202 \pm 20V$ あるいは $101 \pm 6V$ の範囲内で維持することが義務づけられている。本稿では100V供給における $101 \pm 6V$ について検討し、高圧側の配電系統で維持すべき電圧の範囲を $6380V (0.967pu) \sim 6600V (1.0pu)$ <sup>②</sup>としている。

\*琉球大学 \*\*電力技術部



第1図 配電システムモデル

本稿で想定する配電システムモデルを示す。番号に丸が付いているノードは太陽光発電システムが連系されているものと想定している。

第1表 配電システムモデルにおける諸定数

本稿で用いる配電システムモデルの諸定数を明記している。

蓄電池貯蔵容量	4.0pu (20MWh)
蓄電池のインバータ容量	0.3pu (1.5MW)
各線路のインピーダンス	0.04+j0.04pu
太陽光発電システム定格電力	0.08pu (400kW)
太陽光発電システムインバータ容量	0.08pu (400kW)

### 2.1 太陽光発電システム

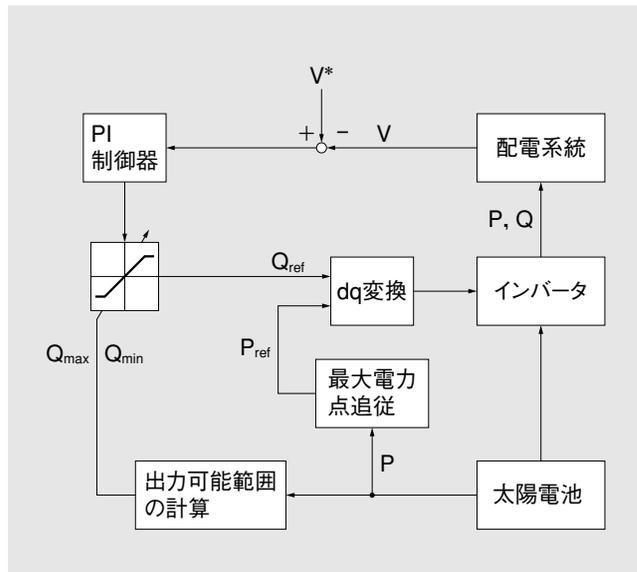
本稿では需要家側に大量連系された太陽光発電システムの連系インバータを用いた無効電力制御を提案する。第2図に太陽光発電システムの構想図を示す。連系インバータによる無効電力制御は発電された有効電力出力とは独立に制御可能とし、発電された有効電力出力の抑制は行わないものとする。次項で説明する最適化手法により、電圧制御指令値を決定し無効電力制御を達成する。

### 2.2 蓄電池設備

本稿では配電システムと上位側システムの連系点へ蓄電池設備を導入し、系統連系点における有効電力潮流及び無効電力潮流の平準化を図る。本システムは太陽光発電システムと同様に最適化計算に基づいて決定された制御指令値へ追従するような運用を想定する。

### 2.3 可制御負荷

蓄電池設備のみを用いた有効電力潮流制御では蓄電池設備の容量が過大となるため<sup>(3)</sup>、本稿ではスマートグリッド技術として近年注目を集めている可制御負荷を用いた協調制御手法を提案する。可制御



第2図 太陽光発電連系インバータ無効電力制御システム

本稿で想定する太陽光発電連系インバータ無効電力制御システムを示す。最適化計算に基づき決定した制御スケジュールにより制御を行う。

負荷とは電気自動車や電気給湯器など通信技術を用いて柔軟に制御することが可能な需要家側の消費電力とされている。本稿で想定する可制御負荷は系統全体の消費電力が大きいほど小さく、系統全体の消費電力が小さいほど大きいものとした。

## 3. 制御指令値の決定手法

### 3.1 最適化問題の定式化

前項で記述したように、本研究では配電システムの最適運用を目的として既存の電圧調整装置を用いたタップ位置制御、太陽光発電システムの連系インバータを用いた無効電力制御、系統連系点に設置された蓄電池設備による有効・無効電力制御、及び需要家側の可制御負荷を想定した有効・無効電力制御による協調制御を行う。そこで翌日の日射量及び電力需要の予測値を用いて最適な制御指令値スケジュールの作成を行う。最適化計算における目的関数及び制約条件を以下に示す。

[目的関数]

$$\min: F(P_B, Q_B, P_{CL}, Q_{CL}, Q_G, T_K) = \sum_i \sum_j P_{Li} \dots (1)$$

[制約条件]

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \dots (2)$$

$$\sqrt{P_B^2 + Q_B^2} \leq S_B \dots (3)$$



$$C_{B24}^{\min} \leq C_{B24} \leq C_{B24}^{\max} \dots\dots\dots(4)$$

$$C_B^{\min} \leq C_B \leq C_B^{\max} \dots\dots\dots(5)$$

$$\sqrt{P_G^2 + Q_G^2} \leq S_G \dots\dots\dots(6)$$

$$P_f^{\min} \leq P_f \leq P_f^{\max} \dots\dots\dots(7)$$

$$Q_f^{\min} \leq Q_f \leq Q_f^{\max} \dots\dots\dots(8)$$

$$T_{\min} \leq T_k \leq T_{\max} \dots\dots\dots(9)$$

$$P_{CL}^{\min} \leq P_{CL} \leq P_{CL}^{\max} \dots\dots\dots(10)$$

$$Q_{CL}^{\min} \leq Q_{CL} \leq Q_{CL}^{\max} \dots\dots\dots(11)$$

$$\Delta W_L \leq \int_0^{24} P_{CL}^{up} + \int_0^{24} P_{CL}^{down} \leq \Delta W_U \dots\dots\dots(12)$$

ここで、各変数は以下の通りである。

$n$ ：制御指令値の総切り替え回数

$x$ ：線路総数

$P_{Li}$ ：線路*i*における配電損失

$V_i$ ：*i*番目におけるノードのノード電圧

$V_{\min}, V_{\max}$ ：ノード電圧における上下限值

$P_f$ ：系統連系点における有効電力潮流

$P_f^{\min}$ ：系統連系点有効電力潮流バンド幅下限値

$P_f^{\max}$ ：系統連系点有効電力潮流バンド幅上限値

$Q_f$ ：系統連系点における無効電力潮流

$Q_f^{\min}$ ：系統連系点無効電力潮流バンド幅下限値

$Q_f^{\max}$ ：系統連系点無効電力潮流バンド幅上限値

$P_G, Q_G$ ：太陽光発電システムの有効・無効電力出力

$S_G$ ：太陽光発電システムの連系インバータ容量

$P_B, Q_B$ ：蓄電池設備による有効・無効電力出力

$S_B$ ：蓄電池の連系インバータ容量

$C_B$ ：蓄電池の残存エネルギー率

$C_B^{\min}, C_B^{\max}$ ：蓄電池エネルギー残存率の上下限值

$C_{B24}$ ：24時における蓄電池のエネルギー残存率

$C_{B24}^{\min}, C_{B24}^{\max}$ ：24時における蓄電池エネルギー残存率上下限值

$T_K$ ：各変圧器のタップ位置

$T_{\min}, T_{\max}$ ：タップ位置の上下限值

$P_{CL}$ ：可制御負荷有効消費電力

$P_{CL}^{\min}$ ：可制御負荷有効消費電力の下限値

$P_{CL}^{\max}$ ：可制御負荷有効消費電力の上限値

$Q_{CL}$ ：可制御負荷無効消費電力

$Q_{CL}^{\min}$ ：可制御負荷無効消費電力の下限値

$Q_{CL}^{\max}$ ：可制御負荷無効消費電力の上限値

$P_{CL}^{up}$ ：可制御負荷による有効消費電力増加分

$P_{CL}^{down}$ ：可制御負荷による有効消費電力減少分

$\Delta W_L, \Delta W_U$ ：可制御負荷増加分・減少分の制限値

系統連系点における有効電力・無効電力に関して大幅な変動を抑制し、かつ配電システム全体の制御への柔軟性を付与するために連系点潮流に対してバンド幅を設定する。本研究では有効電力潮流のバンド幅を平均負荷電力から±0.1pu (500kW)一定とし、無効電力潮流のバンド幅を系統連系点の力率が0.8~1.0の範囲で維持されるバンド幅としている。前述のように、電力潮流制御は蓄電池設備と電気自動車や全電化住宅を想定した可制御負荷を用い、系統連系点の有効電力潮流及び無効電力潮流をあらかじめ設定したバンド幅内で変動を抑制する。

制御指令値スケジュールは、1時間ごとにおける24時間に対して作成されており、全ての制約条件を満たした上で目的関数を最小化し、系統全体における配電損失の抑制を図る。制約条件としては配電システムにおける電圧制約、系統連系点における潮流変動の抑制を目的とした有効電力潮流及び無効電力潮流のバンド幅制約、太陽光発電システムの連系インバータ容量制約、蓄電池設備におけるインバータ容量制約、蓄電池設備の急速な劣化の抑制を目的とした蓄電池エネルギー残存率制約 ( $C_B^{\min} = 20\%$ ,  $C_B^{\max} = 80\%$ )、翌日の運用を考慮した24時における蓄電池エネルギー残存率制約 ( $C_{B24}^{\min} = 40\%$ ,  $C_{B24}^{\max} = 60\%$ )、変圧器におけるタップ切り替え上下限制約、可制御負荷における有効消費電力の上下限值制約及び無効消費電力の上下限值制約、そして有効消費電力の24時間全体の変動分に関する上下限值制約がそれぞれ設けられている。

### 3.2 粒子群最適化

粒子群最適化 (PSO: Particle Swarm Optimization) は鳥や昆虫、魚の群れが食糧を探索する際に、一匹が良好な経路を発見すると群れの残りはどこにいてもそれに倣うことができるという概念を用いた最適化手法である。多次元空間において位置と速度を持つ粒子群でモデル化され、探索アルゴリズムは群れのメンバーと良い位置情報について交換を行い、自身の位置と速度の調整を繰り返し行う。

位置と速度の更新は以下の式により行われる。

$$V_{k+1}(i) = w \cdot V_k(i) + c_1 \cdot rand_1 \cdot (pbest(i) - S_k(i)) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (gbest - S_k(i)) \quad \dots\dots(13)$$

$$S_{k+1}(i) = S_k(i) + V_{k+1}(i) \quad \dots\dots(14)$$

ここで、各変数は以下の通りである。

$V_{k+1}(i)$  : 粒子*i*の探索回数*k*回目における速度

$rand_1, rand_2$  : 0~1の範囲で与えられる一様乱数

$S_{k+1}(i)$  : 粒子*i*の探索*k*回目の探索点

$w$  : 慣性重み

$c_1$  : 自己の最良位置への探索に対する重み付け

$c_2$  : グループの最良位置への探索に対する重み付け

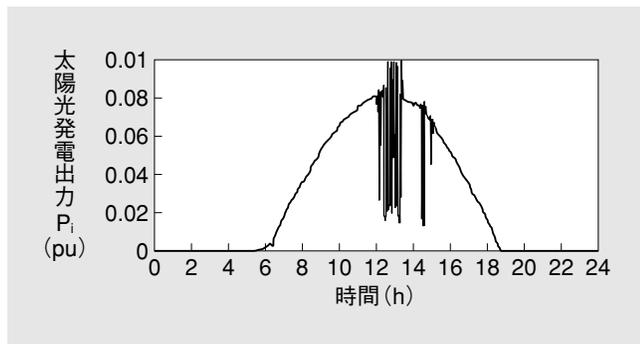
$pbest$  : 自己の中で得られた最良解

$gbest$  : グループの中で得られた最良解

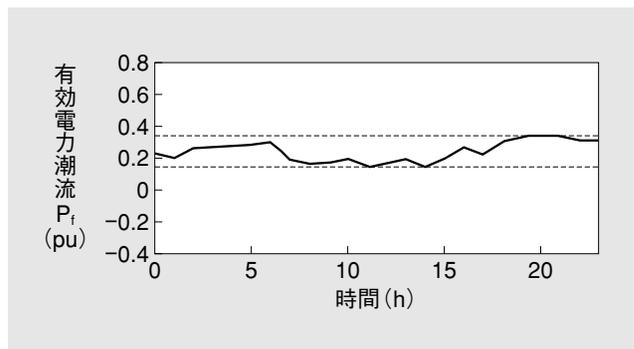
#### 4. シミュレーション結果

提案手法の有効性を示すため、第1図の配電システムモデルで電力潮流計算によるシミュレーション

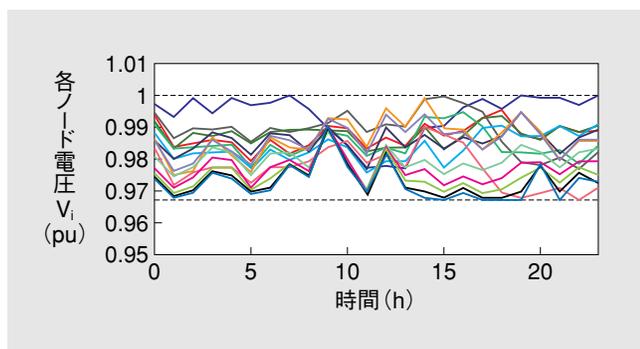
を行った。本シミュレーションでは第3図に示す太陽光発電出力の1時間平均値を翌日の予測値として最適な制御指令値スケジュールの作成を行う。提案手法適用時におけるシミュレーション結果を第4図~第10図に示す。各図は可制御負荷、蓄電池設備、太陽光発電連系インバータ及び既存の電圧調整装置による協調制御における各ノードにおける配電電圧、系統連系点有効電力潮流、系統連系点無効電力潮流、蓄電池設備による有効・無効



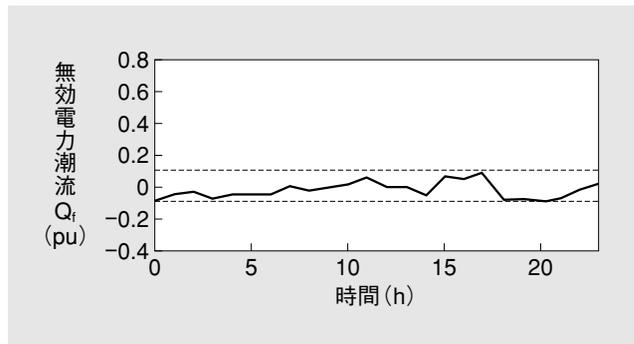
第3図 太陽光発電出力  
本稿のシミュレーションで想定した翌日の太陽光発電出力を示す。本図より一時間平均値を作成し、予測太陽光発電出力として制御指令値のスケジューリングに用いている。



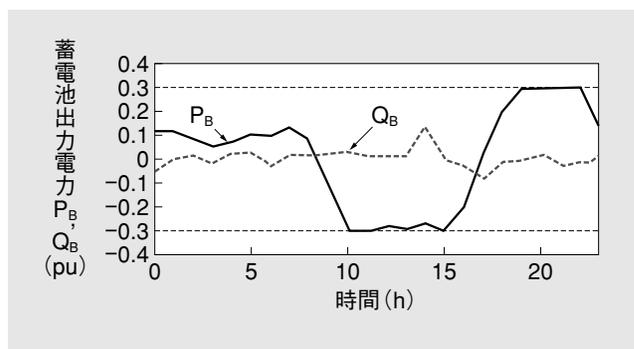
第5図 系統連系点有効電力潮流  
系統連系点の有効電力潮流シミュレーション結果を示す。蓄電池設備及び可制御負荷の協調制御により制約が維持されている。



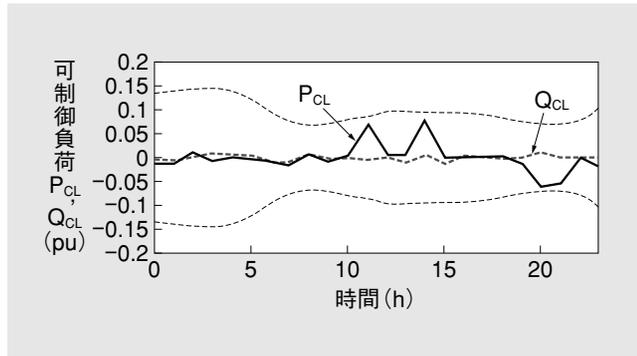
第4図 各ノードにおける配電電圧  
提案手法（可制御負荷・蓄電池設備・太陽光発電連系インバータ及び既存の電圧調整装置による協調制御時）適用時における配電電圧シミュレーション結果を示す。電圧制約が満足されている。



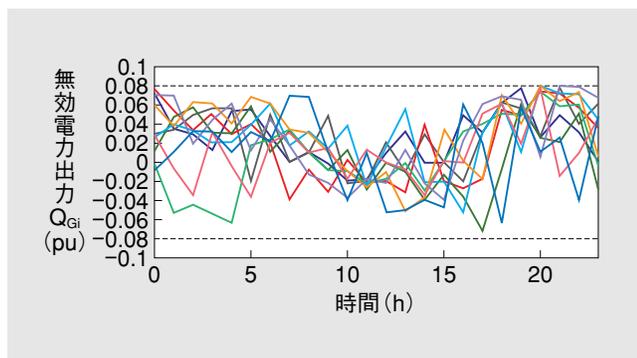
第6図 系統連系点無効電力潮流  
系統連系点の無効電力潮流シミュレーション結果を示す。有効電力潮流と同様に制約が満足されている。



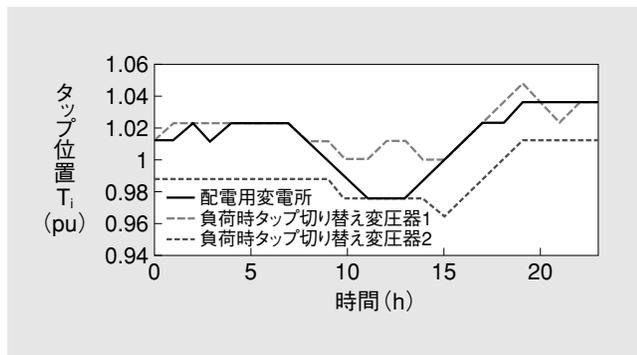
第7図 蓄電池設備による有効・無効電力出力  
蓄電池設備の有効電力出力及び無効電力出力を示す。昼間における逆潮流発生時に充電し、太陽光発電出力が得られない時刻に放電していることが確認できる。



**第8図 可制御負荷による有効・無効電力制御**  
可制御負荷の制御可能容量及び有効・無効電力制御量を示す。可制御負荷を蓄電池設備の充放電と協調して運用されている。



**第9図 太陽光発電連系インバータによる無効電力出力**  
太陽光発電連系インバータの制御可能容量及び有効・無効電力制御量を示す。太陽光発電出力のない時刻において電圧を上昇させるような無効電力補償が確認できる。



**第10図 既存の電圧調整装置のタップ位置**  
変電所LRT及びSVRのタップ位置を示す。昼間における電圧上昇を抑制し、そのほかの時刻で昇圧していることが確認できる。

電力出力、可制御負荷による有効・無効電力制御、太陽光発電連系インバータによる無効電力出力、既存の電圧調整装置のタップ位置を示している。これにより、各ノード電圧の変動は既存の電圧調整装置によるタップ位置制御と各制御装置による協調的な無効電力制御により制約条件を満足していることが確認できる。系統連系点電力潮流変動は蓄電池設備の有効・無効電力制御により平準化

が達成されている。また、可制御負荷を用いることにより需要家側において有効・無効電力制御が可能となるため、蓄電池設備容量及び連系インバータ容量の低減へ貢献している。

## 5. む す び

本稿では、自然エネルギー発電設備が大量連系された配電システムシステムの最適運用手法を提案した。提案手法を用いることで、配電電圧適正值維持及び系統連系点電力潮流の平準化、さらに可制御負荷を用いることで同時に蓄電池設備容量の低減を達成した。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

### 《参考文献》

- (1) 舟橋俊久：「分散型電源を活用した新電力供給システム」特集号によせて，電学論B, Vol. 130, No. 11, pp.927, 2010
- (2) 大城将人, 千住智信, 與那篤史, 浦崎直光, 舟橋俊久：「無効電力出力分担を考慮した配電システムの電圧制御法」, 電学論B, Vol. 130, No. 11, pp. 972~980, 2010
- (3) Masato Oshiro, Akihiro Yoza, Tomonobu Senjyu, Atsushi Yona, Toshihisa Funabashi, and Chul-Hwan Kim, “Optimal Operation Strategy with using BESS and DGs in Distribution System,” KIEE Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 20~27, 2012

### 《執筆者紹介》



千住智信 Tomonobu Senjyu  
琉球大学



舟橋俊久 Toshihisa Funabashi  
電力系統解析, 分散型電源の研究開発に従事