

# マイクログリッド運用に対する可到達集合の利用\*

朝山 和香<sup>†</sup>・引原 隆士<sup>†</sup>

## On the Use of Reachable Set for Safe Operation in Microgrid\*

Nodoka ASAYAMA<sup>†</sup> and Takashi HIKIHARA<sup>†</sup>

Microgrid is one of the new power supply systems expected for expanding introduction of renewable energy and improving the power quality. However, generators in a microgrid have risk at step-out because a microgrid utilizes many changeable power resources. For a safe operation in a microgrid, we evaluate reachable sets for unsafe sets of gas-engine generators according to a microgrid model. Reachable sets have already been applied to a study on air traffic management and electric power system. The unsafe sets are defined to avoid large deviations of rotor speed. Setting plurality of unsafe set, system's safe set can be obtained by calculating backward reachable sets for unsafe sets. This paper considers two compensation operations for load fluctuation. Based on the characteristic of reachable sets for unsafe sets, demand response strategy can be examined. Finally, numerical simulation shows that setting based on reachable sets can suppress the angular frequency variation of gas-engine generators in microgrid.

### 1. はじめに

近年、再生可能エネルギーの導入量は急速に伸びてきている [1]. 従来の大規模電源に依存した電力供給形態には大停電などのリスクが内在しており、再生可能エネルギーを含む多様なエネルギー源の活用が求められる。また、地球環境問題の観点からも再生可能エネルギーの導入拡大が期待される [2]. しかしながら、太陽光や風力を利用した発電は気象変動による出力変動が激しく、既存の電力系統に連結させるには多くの課題がある [3]. こうした背景から、太陽光発電などの分散型電源を主要構成要素とし、既存の電力系統と協調した運用により地域内でのエネルギーの利用効率を高めることを目的とした、新しい電力供給システムへの関心が高まっている。マイクログリッドはその形態の一つである [4–6].

電力系統においては、一定時間内における各分散型電源の発電電力量の和と需要家での消費電力量の和を一

致させる制御（同時同量制御）が同期発電機の安定性を確保するために必要である。しかしながら、マイクログリッドの主要構成要素には出力変動の激しいものも多く、マイクログリッド内において同時同量制御のみを実施する場合、潮流の大きな変化によりグリッド内の同期発電機の運用に支障が出る危険性がある [7]. また、太陽光発電などの激しい出力変動は系統全体の周波数変動にも繋がり、周波数の変動は発電機の故障の原因になるのみでなく、工業製品の均一性が損なわれるなど、電源側と負荷側の双方に悪影響を与える。

上記の問題に対し、時間や気候による需給バランスの変化に対するマイクログリッドの安全運用に向けて、可到達集合の利用が考えられる。可到達集合を用いた解析は過渡解析手法の一つであり、システムの危険な状態を表す集合（危険集合）に対し、後進可到達集合を算出することで発電機の過渡解析が可能となる。また、可到達集合については航空機の制御手法において検討される [8] ほか、電力系統においては発電機の過渡解析手法として適用が議論されている [9, 10].

本論文では複数の可到達集合の算出結果より、負荷需要の変動に対する補償動作における発電機および二次電池の出力決定方法について検討する。また、二つの補償動作を比較するため、それぞれの補償動作における発電

\* 原稿受付 2018年6月4日  
第62回システム制御情報学会研究発表講演会にて発表 (2018年5月)

<sup>†</sup> 京都大学 大学院 工学研究科 Graduate School of Engineering, Kyoto University; Yoshida-Honmachi, Sakyo ward, Kyoto city, Kyoto 606-8501, JAPAN

**Key Words:** microgrid, transient analysis, reachable set, suppression of angular frequency variation, load-following.

機の角周波数変動について数値計算を行った結果を示す。

## 2. 可到達集合に基づく過渡安定解析

### 2.1 過渡安定性

一般に、電力系統には多数の同期発電機が連系され、電力系統内の無数の負荷に電力を供給している。同期発電機は、タービンなどの原動機からの機械的エネルギーを電気的エネルギーに変換する機械である。定常時、同期発電機の機械的入力と電気的出力は均衡している。負荷の増加により電気的出力が増加すると、同期発電機は回転による慣性エネルギーを放出することで負荷の増加分を補う。このとき、回転速度は低下し、その結果電気的出力は抑制され同期運転が継続される [11]。しかし、電力系統内では、架空送電線への落雷や、機器の絶縁不良による短絡事故など、安定した同期運転を妨げる大小さまざまな擾乱が発生するため、そのような擾乱に対し、擾乱後も新たな安定運転状態に遷移させ、供給支障を拡大させないことが必要である。

過渡安定性においては、事故の発生・除去、系統構成の変化に伴い系統電圧や発電機出力などが大幅かつ急激に変化するだけでなく、負荷電力の電圧特性、発電機の磁気飽和など、電力施設、制御装置の非線形特性の影響が強く現れ、時々刻々と変化する。過渡安定性の解析手法としては等面積法や、リアプノフ関数による方法などが知られている [12] が、本研究では危険集合に対する可到達集合を用いた解析を適用する。リアプノフ関数による過渡安定解析は、安定のための十分条件を与えるものである。一方で、可到達集合に基づく過渡安定解析は、危険な状態への有限時間の十分条件に基づき危険な状態集合の補集合を考えることで、安定のための必要条件を満たす状態を与える解析手法である。また、可到達集合に基づく過渡安定解析においては、危険な状態へと到達する時刻を陽に考慮することが可能である。本論文においては可到達集合を用いた発電機の過渡解析により、マイクログリッド内発電機の角周波数変動抑制について検討する。

### 2.2 可到達集合

可到達集合には大きく分けて二つの種類がある。一つは前進可到達集合とよばれ、定められた初期値からの解軌道に沿って有限時間で到達し得るすべての状態点の集合を表す。もう一つは後進可到達集合とよばれ、有限時間内に目標とする集合へと到達するような軌道を持つ状態点の集合である [8]。前進可到達集合と後進可到達集合の違いを Fig. 1 に示す。矢印はシステムの解軌道を表している。なお、本報告ではこの二つの可到達集合のうち、後進可到達集合を用いた解析を行う。

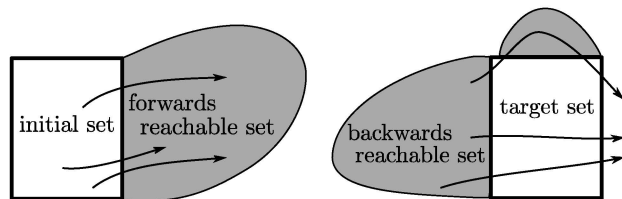


Fig. 1 Difference between forward and backward reachable sets [8]

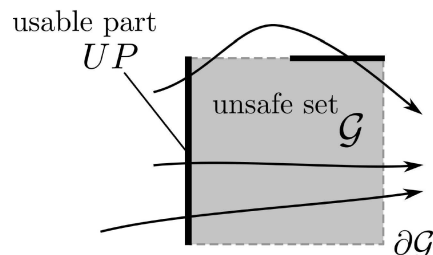


Fig. 2 Image of an unsafe set and UP

### 2.3 危険集合と Usable Part

文献 [10] を参考とし、可到達集合の算出に Usable Part に基づく手法を採用する。まず、危険集合とは、システムの許容できない動作に相当する状態の集合である。ここで、非線形微分方程式  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x})$  で記述される連続時間系を考えると、システムの状態  $\mathbf{x} \in X$  に対し、危険集合  $G_i$  は次式で定義される。

$$G_i = \{\mathbf{x} \in X \mid L_i(\mathbf{x}) < 0\} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

ただし、 $L_i: X \rightarrow \mathbb{R}$  はレベルセット関数とよばれる  $\mathbf{x}$  に関して微分可能な関数である。このレベルセット関数を許容できない状態（危険な状態）に対して負となるように定めることで、危険集合を定義することができる。危険集合は  $G_1, G_2$  のように複数独立に設定することができ、(1) 式で表される危険集合  $G_i$  それぞれに対する UP (Usable Part) を以下で定義する。

$$UP_i = \{\mathbf{x} \in \partial G_i \mid \frac{\partial L_i(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}^T \mathbf{f}(\mathbf{x}) < 0\} \quad (2)$$

ただし、 $\partial G_i$  は危険集合  $G_i$  の境界であり、次のように表される。

$$\partial G_i = \{\mathbf{x} \in X \mid L_i(\mathbf{x}) = 0\} \quad (3)$$

Fig. 2 に示すように、UP は連続フローに従って微小時間後に危険集合  $G_i$  に入り込む境界  $\partial G_i$  の部分集合を表している。

### 2.4 可到達集合に基づく安全領域の概念

Fig. 3 に示すように目標とする集合を危険集合として設定する。取りうる初期値のうち危険集合に対する後進可到達集合に属している状態点は、破線で示す解軌道のように有限時間内に危険集合へと到達する。したがって、後進可到達集合の補集合は、属する状態点が有限時間経

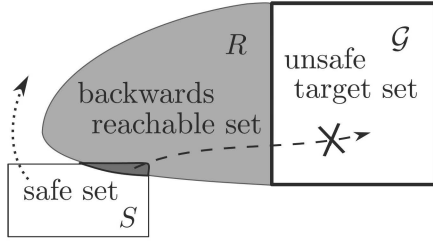


Fig. 3 Using the backward reachable set to verify safety

過後も危険集合へと到達することのない集合であるため、この補集合を初期値として選択すれば、点線のようにその軌道が危険集合へ到達することはない。

### 3. モデル設定

#### 3.1 マイクログリッドモデル

Fig. 4に解析対象とするマイクログリッドのモデルを示す。このマイクログリッドは、商用系統の配電網上に発電要素と供給対象の負荷が分散した、仮想マイクログリッドとよばれる形式のものである。平成15年度～19年度にかけて京丹後市で行われた実証実験 [14] を参考に、本論文のマイクログリッドも5台の並列接続されたガスエンジン発電機、二次電池、太陽光発電装置、無限大母線、負荷により構成する。ガスエンジン発電機は、台数切り替えにより運転台数を1台から5台まで変えることができ、無限大母線は、マイクログリッドに連系する管理区間外の商用系統に相当する。また、新エネルギー設備としては、インバータを用いて直交変換を行う電源が多く [5]、本モデルにおける直流電源と交流系統の接続は直流交流変換と交流出力の系統同期機能を有し、力率を1に保つパワーコンディショナを介するものとする。

本モデルにおける電源は、出力および運転台数が制御可能なガスエンジン発電機と出力制御可能な二次電池、制御不可能な太陽光発電装置に分類され、制御可能な電源による追従制御により、出力調整のできない電源や負荷における変動を補償し、需給バランスを維持する。

以上のモデル設定のもと、ガスエンジン発電機の運転状態を動揺方程式により記述し、過渡解析を行う。

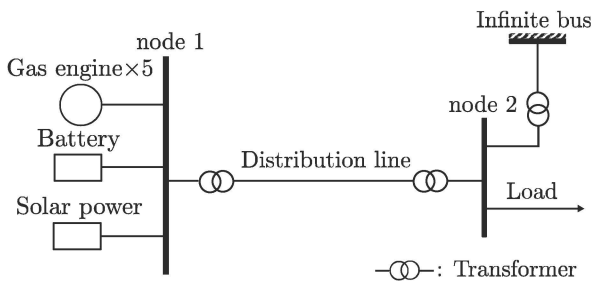


Fig. 4 Microgrid model that includes distributed energy resources, a load, and a distribution network [15]

#### 3.2 マイクログリッド内発電機の動揺方程式

Fig. 4中のガスエンジン発電機の過渡ダイナミクスは、次の動揺方程式で記述される [15]。

$$\begin{cases} \dot{\delta}_g = \omega_g \\ \dot{\omega}_g = \frac{P_{NS}}{P_{rg0} \times n} \{p_{mg}(\Delta p_l) - k_g \omega_g - p_{eg}(\delta_g)\} \end{cases} \quad (4)$$

Table 1に(4)式の従属変数およびパラメータの物理的意味を示す。なお(4)式における時間  $t$  は  $t_{base} = (H_g/\pi f_s)^{1/2}$  により、角周波数偏差  $\omega_g$  は  $\omega_{base} = 1/t_{base}$  により無次元化されている。ここで、 $H_g$  はガスエンジン発電機の慣性定数、 $f_s$  は系統の基準周波数である。また、 $p_{eg}$  は  $\delta_g$  の関数であり、次式で与えられる。

$$p_{eg}(\delta_g; \delta_b, \delta_s, \delta_\infty) = G_{gg} E_g^2 + \sum_{i=b,s,\infty} E_g E_i \{G_{gi} \cos(\delta_g - \delta_i) + B_{gi} \sin(\delta_g - \delta_i)\} \quad (5)$$

ただし、 $G_{gg}$  はガスエンジン発電機に関する内部コンダクタンスであり、 $G_{gi} + jB_{gi}$  ( $i = b, s, \infty$ ) はそれぞれガスエンジン発電機と二次電池、太陽光発電、無限大母線との伝達アドミタンスである。また、 $E_g$  はガスエンジン発電機の端子電圧、 $E_i$  および  $\delta_i$  ( $i = b, s, \infty$ ) はそれぞれ二次電池、太陽光発電、無限大母線の端子電圧および相差角を表す。ここでは無限大母線の相差角および角周波数を各発電機のそれぞれの基準値とし、偏差の値を  $\delta_\infty = 0$ 、 $\omega_\infty = 0$  とする。また、二次電池と太陽光発電からの出力変動は相差角  $\delta_b$ 、 $\delta_s$  の変化によって表現され、ガスエンジン発電機の機械的入力  $p_{mg}$  は有効電力だけに着目し、負荷需要の変動  $\Delta p_l$  に追従して変化させる。 $\delta_b$ 、 $\delta_s$ 、 $\Delta p_l$  および  $p_{mg}$  の決定方法については次章以降で詳しく述べる。

### 4. 可到達集合の算出

#### 4.1 危険集合の設定

本論文では、周波数の変動に着目し、危険集合を設定する。系統における周波数変動を抑制することは、系統を運用する側と需要家側の双方にとって必要とされ、とくに製紙工場や繊維工場などにおいて周波数の規定値保持が要求されている [16]。周波数の変動は、負荷需要の増減や電源脱落が原因となり、有効電力の発生と消費に過不足が生じるために起こる。したがって電力系統との連系の容量に制限があり、出力変化の激しい再生可能エネルギーを利用した電源を多く含むマイクログリッドにおいては周波数の変動が大きくなる。また、従来の大規模電力系統と異なり、需給バランス維持のための予備の発電容量が限られているため、マイクログリッドにおいて周波数を一定に保つことは一つの大きな課題である。

ここでは発電機の角周波数偏差が大きく変動した場合を危険な状態とし、位相空間の構造から危険集合の設定を行う。発電機が許容された安全な動作を行う角周波数

Table 1 List of variables and parameters in (4)

|            |                                                                                               |         |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| $\delta_g$ | Angular position of rotor in the aggregated generator with respect to the infinite bus        |         |
| $\omega_g$ | Deviation of rotor speed in the aggregated generator relative to the system angular frequency |         |
| $p_{mg}$   | Mechanical input power to the aggregated generator                                            |         |
| $p_{eg}$   | Electrical output power of the aggregated generator                                           |         |
| $n$        | The number of operating generators                                                            |         |
| $P_{NS}$   | Volt-Ampere base                                                                              | 400 kVA |
| $P_{rg0}$  | Rated capacity of the single gas-engine generator                                             | 80 kW   |
| $k_g$      | Damping coefficient in the aggregated generator                                               | 0.05    |

偏差の限界値として  $\omega_{c\pm}$  を定義することにより、危険集合を設定する。数値計算においては  $\omega_{c\pm} = \pm 0.4$  p.u. とした。この値を周波数に換算すると、およそ 1.5 Hz の偏差に相当する。

#### 4.2 数値計算における設定と可到達集合の算出例

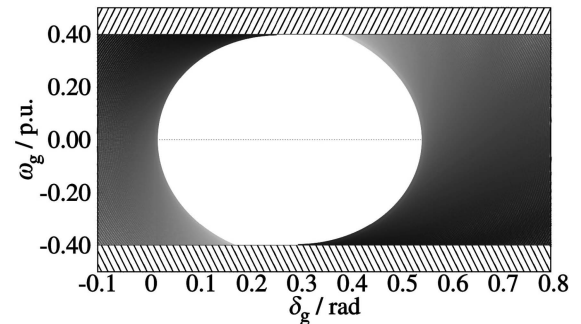
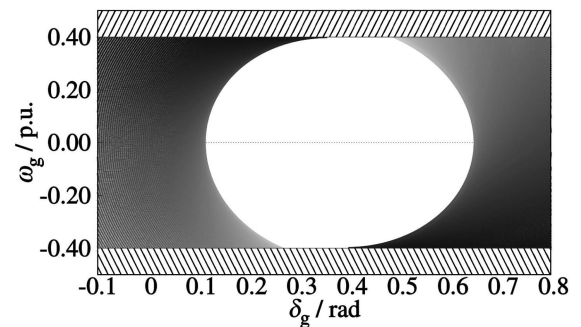
初期状態  $t=0$  s において、マイクログリッドは定常状態にあるとする。定常状態において、負荷需要を  $p_{l0} = 0.3$  p.u., 太陽光発電の出力を  $p_{s0} = 0.05$  p.u., ガスエンジン発電機の出力を  $p_{eg0} = 0.25$  p.u., 二次電池の出力を  $p_{b0} = 0$  p.u. とする。負荷需要の変動 ( $0.3$  p.u.  $\rightarrow$   $0.4$  p.u.) を想定し、発電機からの出力  $p_{mg}$  を変化 ( $0.25$  p.u.  $\rightarrow$   $0.35$  p.u.) させた場合の可到達集合の変化を Fig. 5 に示す。なお、発電機の運転台数は 2 台とし、その他シミュレーションに用いた数値を Tables 2, 3 に示す。

Fig. 5 の各図における上下斜線を引いた帯状の領域は、前節で設定した危険集合を表しており、上側が発電機の過度な加速状態に相当する領域、下側が発電機の過度な減速状態に相当する領域である。続いて、各図の左に広がる領域が過度な加速状態を示す危険集合に対する可到達集合を、右側の領域が、過度な減速状態を示す危険集合に対する可到達集合を表している。また、色の濃淡は危険集合へ到達するまでの時間を表しており、色が薄いほど危険集合へと到達するまでの時間に余裕があることを表す。Fig. 5 から、負荷需要の増加に伴い発電機からの出力を増加させると、可到達集合が相対角正方向へ平行移動していることがわかる。この可到達集合の平行移動は、発電機の運転状態の変化に伴うものである。発電機の運転状態はさまざまな要因により変化するため、発電機の出力以外にも多くのパラメータが可到達集合の変化に影響を及ぼすと考えられる。

#### 4.3 3次元プロットによる考察

前節の可到達集合の変化をより明確に示すため、各設定値における可到達集合を重ねることを考える。なお、以降では過度な加速状態を示す危険集合に対する可到達集合のみを図示するが、ここでの議論は、そのまま減速する場合についても成立する。

Fig. 6 は前節と同様、負荷需要の変動に対し発電機の

(a)  $p_{mg} = 0.25$  p.u.(b)  $p_{mg} = 0.35$  p.u.Fig. 5 Transition of reach sets due to mechanical input power ( $p_{mg}$ )

機械的入力  $p_{mg}$  のみで補償を行った場合の可到達集合の変化を表している。したがって、 $p_{mg} = 0.25$  p.u. および  $p_{mg} = 0.35$  p.u. における  $\delta_g$ - $\omega_g$  平面は、Fig. 5 の二つの図と一致する。また、Fig. 6(b) は  $\omega_g$  軸負の方向から  $\delta_g$ - $p_{mg}$  平面を見たときの図である。発電機の機械的入力の増加に伴い可到達集合が  $\delta_g$  正方向に移動している。このことは電力相対角曲線 [12] を用いて説明することができる。Fig. 7 に電力相対角曲線を示す。Fig. 6 における  $p_{mg}$  の増加は Fig. 7 における  $P_m$  の増加に、Fig. 6 における可到達集合の  $\delta_g$  正方向への移動は Fig. 7 における  $\delta_0$  の増加に相当する。

続いて Fig. 8 は  $p_s + p_b$  を可変とし、 $p_b + p_{mg}$  を一

Table 2 List of parameters for the microgrid model

|                                                   |              |          |
|---------------------------------------------------|--------------|----------|
| Nominal system frequency                          | $f_s$        | 60 Hz    |
| Per-unit time inertia of the aggregated generator | $H_g$        | 0.332 s  |
| Rated capacity of the battery                     | $P_{b,\max}$ | 100 kW   |
| Maximal output of the solar power site            | $P_{s,\max}$ | 50 kW    |
| Voltage base                                      | $V_{NS}$     | 210 V    |
| Terminal voltages for the aggregated generator    | $E_g$        | 1.0 p.u. |
| Terminal voltages for the battery                 | $E_b$        | 1.0 p.u. |
| Terminal voltages for the solar power site        | $E_s$        | 1.0 p.u. |
| Terminal voltages for the infinite bus            | $E_\infty$   | 1.0 p.u. |

Table 3 Complex-valued transfer admittances  $G_{gi} + jB_{gi}$  for the microgrid model

| i        | $G_{gi} + jB_{gi}$  |
|----------|---------------------|
| g        | $0.0229 - j1.0792$  |
| b        | $-0.0352 + j0.3778$ |
| s        | $-0.0040 + j0.1912$ |
| $\infty$ | $0.0484 + j0.5070$  |

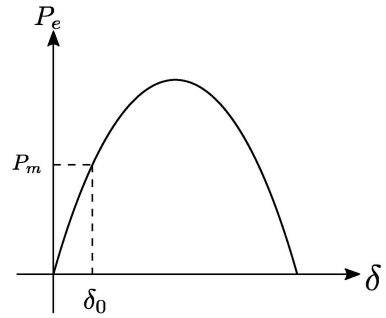
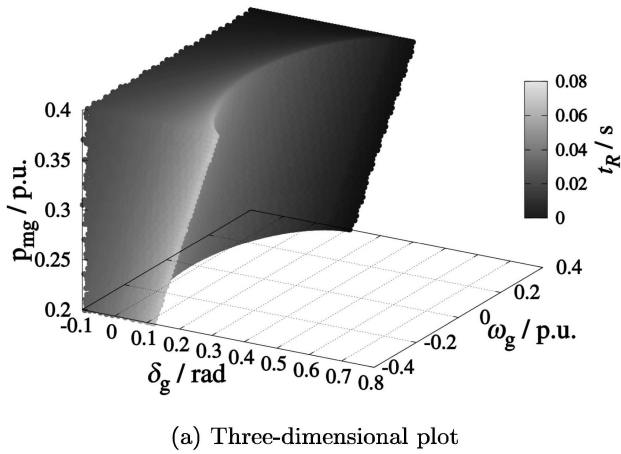
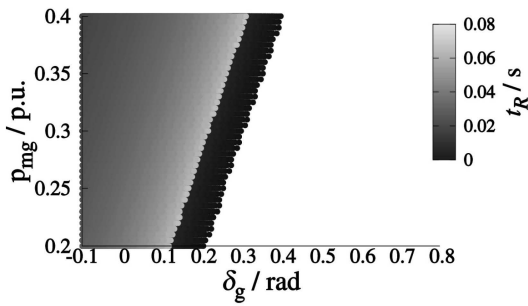


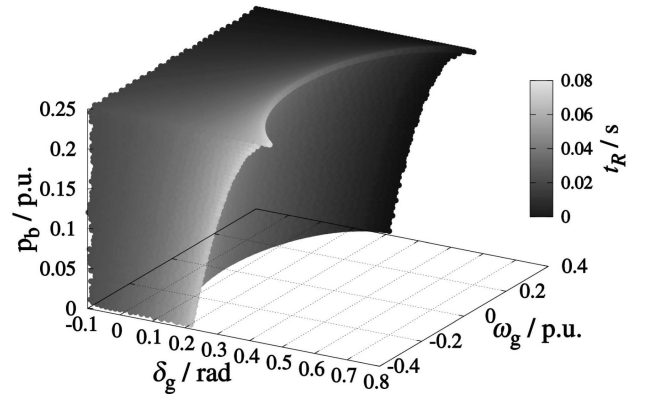
Fig. 7 Power-angle curve



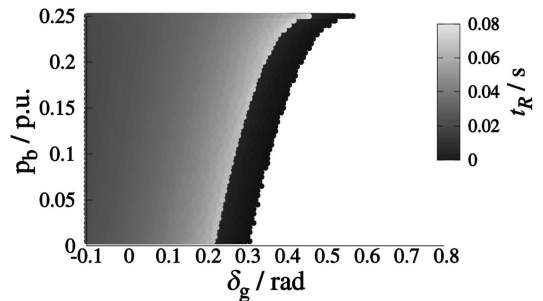
(a) Three-dimensional plot

(b)  $\delta_g$  -  $p_{mg}$  planeFig. 6 Transition of reashacle sets due to mechanical input power ( $p_{mg}$ )

定とした場合の二次電池の出力による可到達集合を示している。  $p_b + p_{mg}$  が一定であるとはすなわち、負荷需要および太陽光発電からの出力に対し、必要とされる電力の二次電池および発電機による分担比を変える



(a) Three-dimensional plot

(b)  $\delta_g$  -  $p_b$  planeFig. 8 Transition of reashacle sets due to output of the battery ( $p_b$ )

ことによる可到達集合の変化を表している。なお、ここでは負荷需要を  $p_l = 0.35$  p.u., 太陽光発電からの出力を

$p_s = 0.05$  p.u. とした ( $p_b + p_{mg} = 0.3$  p.u.). 先ほどと同様, Fig. 8(b) は  $\omega_g$  軸負の方向から  $\delta_g - p_b$  平面を見たときの図である. 二次電池の出力増加に伴う可到達集合の移動も電力相差角曲線により説明が可能であり, Fig. 8における  $p_b$  の増加は Fig. 7における  $P_e$  の減少に, Fig. 8における可到達集合の  $\delta_g$  正方向への移動は Fig. 7における  $\delta_0$  の増加に相当する.

Figs. 6, 8 から, 負荷需要が増える, または二次電池による分担を増加させると  $\delta_g$  が増加する方向に可到達集合が平行移動することがわかる. したがって, 負荷需要の増加に対し, 二次電池による出力の割合を減少させることで発電機の状態点を同一の場所に留め, 角周波数変動を抑制できる可能性がある.

## 5. 角周波数の変動抑制に向けた補償動作

### 5.1 各電源における出力の決定方法

負荷需要の変動  $\Delta p_l$  は乱数により決定した. 二次電池の出力  $p_b$  とガスエンジン発電機の機械的出力  $p_{mg}$  は, 同時同量制御方式に基づき, この変動によって生じる電力の需給アンバランスを補償するように決定する. なお, 今回の数値計算においては太陽光発電の出力変動は考慮しないものとする. 数値計算における  $\Delta p_l$  および二つの補償動作における  $p_b$ ,  $p_{mg}$  の決定方法を以下に示す.

はじめに, 負荷需要の変動  $\Delta p_l$  は 10 s ごとに決定され, その値は 0.004 p.u. 刻みで最大  $\pm 0.04$  p.u. 変化する. 本論文では簡単のため発電機の運転台数を 2 台で固定し, 台数切り替えを考慮しない. それに伴い負荷需要の変動範囲を  $0.2 \text{ p.u.} < p_l = p_{l0} + \Delta p_l < 0.4 \text{ p.u.}$  とする.

#### 補償動作 A

- ガスエンジン発電機の機械的入力  $p_{mg}$  は, 負荷変動の 1 s 後に負荷変動を補償するように追従する. その値は  $p_{mg} = p_{eg0} + \Delta p_l$  で与えられ, この出力値を満たすように, (4) 式に基づき相差角  $\delta_g$  および電気的出力  $p_{eg}$  を定める.
- 二次電池の出力  $p_b$  は, 太陽光発電の出力変動を補償する役割のみをもつものとし, 補償動作 A においては変動しないものとする.

#### 補償動作 B

- ガスエンジン発電機の機械的入力  $p_{mg}$  は, 負荷変動の 1 s 後に負荷変動を補償するように追従させる. その値は 4.3 節の結論に基づき,  $p_{mg} = p_{eg0} + (1 + \alpha) \cdot \Delta p_l$  ( $\alpha > 0$ ) で与えられ, この出力値を満たすように (4) 式に基づき相差角  $\delta_g$  および電気的出力  $p_{eg}$  を定める.
- 二次電池の出力  $p_b$  は, 負荷変動の 1 s 後にガスエンジン発電機の機械的入力変更に伴うアンバランスを補償するように追従させる. その値は  $p_b = p_{b0} - \alpha \cdot \Delta p_l$  で与えられ, 負荷需要の相差角  $\delta_b$  は, その出力値  $p_b = p_{b0} + \Delta p_b = P_{b,max} \sin \delta_b$  を満たすように与

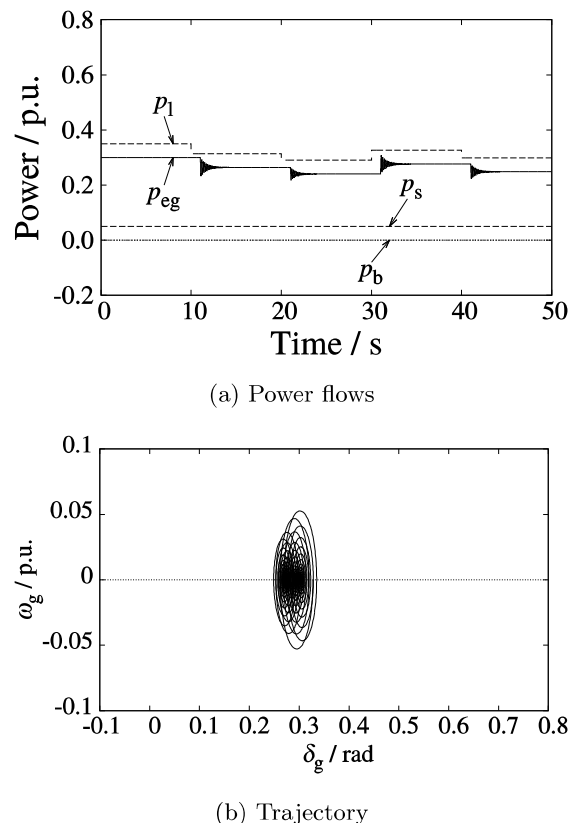


Fig. 9 Time responses of active power flows and trajectory on  $(\delta_g, \omega_g)$  under the setting A

える.

補償動作 A においては負荷需要の変動は発電機により, 太陽光発電の出力変動は二次電池により独立に補っている. 一方の補償動作 B においては負荷需要の増加に対しては二次電池の分担比を減少させ, 負荷需要の減少に対しては二次電池の分担比を増加させるという動作を行っている. なお, 今回の数値計算においては  $\alpha = 1$  とした.

### 5.2 電力の時間波形と発電機の解軌道

Fig. 9 に補償動作 A における電力の時間波形および発電機の解軌道を示す. 発電機が負荷需要を追従するタイミングで発電機の挙動に振動が見られることが Fig. 9(a) からわかる. Fig. 9(b) においては, 角周波数偏差の限界値として定めてきた  $\omega_c = \pm 0.4$  p.u. には達していないものの, 角周波数偏差の最大値, 最小値はそれぞれ  $\omega_{g,max} = 0.053$  p.u.,  $\omega_{g,min} = -0.053$  p.u. であり, 周波数に換算するとおよそ  $\pm 0.2$  Hz の偏差に相当する. この値は太陽光発電の出力変動によりさらに増大すると考えられる. なお, 商用系統においては  $\pm 0.1$  Hz を目標値とし,  $\pm 0.2$  Hz が限界値とされている [12].

Fig. 10 に補償動作 B における電力の時間波形および発電機の解軌道を示す. 負荷需要の変動パターンは Fig. 9 と等しく, 太陽光発電の出力変動はないものとする. Fig. 10(a) において, 補償動作 A においては一定であった二次電池からの出力  $p_b$  が発電機からの出

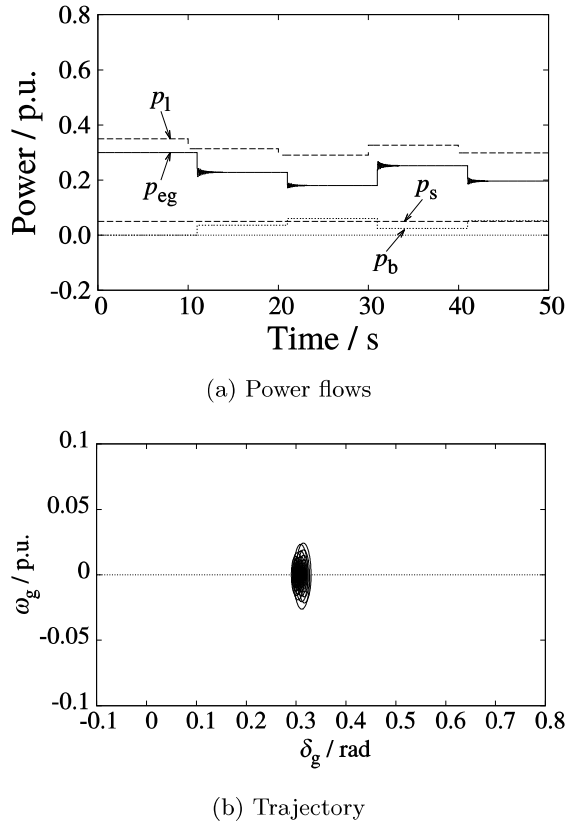


Fig. 10 Time responses of active power flows and trajectory on  $(\delta_g, \omega_g)$  under the setting B

力の変化に伴い変動している。Fig. 10(b)においては  $\omega_{g,\max} = 0.024 \text{ p.u.}$ ,  $\omega_{g,\min} = -0.026 \text{ p.u.}$  であり、補償動作 A の場合と比較するとおよそ半分の偏差に抑えられている。したがって、可到達集合に基づく補償動作により、発電機の角周波数変動が抑制されることが確認できた。

## 6. おわりに

本論文では、発電機の角周波数変動抑制に向けた発電機の機械的入力  $p_{mg}$  および二次電池の出力  $p_b$  の決定方法について検討を行った。はじめに可到達集合を利用した過渡解析手法を示し、 $p_{mg}$  および  $p_b$  による可到達集合の変化を求めた。続いて可到達集合の変化の特徴から、負荷需要の変動に追従する発電機と二次電池の出力の割合を決定することにより角周波数の変動抑制を達成した。

マイクログリッド内発電機の過渡解析手法として可到達集合の考え方を導入、可到達集合の変化に関わるパラメータの影響を評価し、マイクログリッドモデルにおける補償動作の役割をもつ電源の出力決定方法を示した。発電機の角周波数偏差の限界値を定めることにより、可到達集合の目標となる危険集合を設定した。これにより、発電機の過度な加速および減速に対する十分条件が示された。また、パラメータの影響評価においては3次元プロットを行うことにより、可到達集合の変化の特徴

がより明確に現れることを確認した。そして、可到達集合を考慮した場合とそうでない場合について、マイクログリッド内発電機の負荷変動に対する挙動を比較することにより、角周波数変動を抑制できることをシミュレーションにより確認した。

今後は太陽光発電の出力変動や発電機の台数切り替えも含めた補償動作について検討を重ねていく考えである。

## 参考文献

- [1] 入江: 分散型電源の導入の現状; 技術総合誌 OHM, Vol. 102, No. 2, pp. 4–8 (2015)
- [2] 新エネルギー・産業技術総合開発機構: NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版, pp. 7–11 (2014)
- [3] 谷口: 分散型電源と電力系統の制御; 電子学会論文誌 B, Vol. 121, No. 9, pp. 1065–1068 (2001)
- [4] 日本電機工業会: マイクログリッドの導入のすすめ (2005)
- [5] 田中: NEDO における系統連系プロジェクトの現状; 技術総合誌 OHM, Vol. 91, No. 6, pp. 44–48 (2004)
- [6] B. Lasseter: Microgrids; *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Panel*, pp. 146–149 (2001)
- [7] 野田: 電力系統の制御; 電気書院, pp. 38, 79–80 (1986)
- [8] C. J. Tomlin, I. Mitchell, A. M. Bayen and M. Oishi: Computational techniques for the verification of hybrid systems; *Proceedings of the IEEE*, Vol. 91, No. 7, pp. 986–1001 (2003)
- [9] 高辻, 引原: マイクログリッドにおける発電機の台数制御に関するハイブリッドモデル; 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 108, No. 336, pp. 41–45 (2008)
- [10] Y. Susuki, H. Ebina and T. Hikiyara: Application of hybrid system theory to power system stability analysis; *Nonlinear Theory and its Applications*, IEICE, pp. 202–205 (2005)
- [11] 長谷: 電力技術の実用理論 第2版, 丸善出版, pp. 228–229 (2011)
- [12] 川本: 電力システム工学 (大澤 編), オーム社, pp. 29–41 (2001)
- [13] 大澤: 電力系統の安定度解析に対するリアプノフ直接法の応用に関する研究; 京都大学 博士論文 (1981)
- [14] 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 新エネルギー等地域集中導入技術ガイドブック 別冊, pp. 41–64 (2008)
- [15] Y. Takatsuji, Y. Susuki and T. Hikiyara: Hybrid controller for safe microgrid operation; *Nonlinear Theory and Its Applications*, IEICE, Vol. 2, No. 3, pp. 347–362 (2011)
- [16] 大久保: 電力システム工学, オーム社, pp. 63–65 (2008)

## 著者略歴

あさ やま のど か  
朝 山 和 香

2017 年 3 月京都大学工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科修士課程に進学し、現在に至る。電力・エネルギーシステムの研究に従事。電子情報通信学会の学生会員。

ひき はら なか し  
引 原 隆 士 (正会員)

1987 年 3 月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程研究指導認定退学。関西大学を経て、1997 年 4 月京都大学助教授、2001 年 8 月同教授となり、現在に至る。その間、1993 年 3 月～1994 年 3 月米国コーネル大学客員研究員。非線形力学の工学的応用、パワーエレクトロニクス、電気エネルギーシステムの開発などの研究に従事。京都大学工学博士。電気学会、電子情報通信学会、IEEE、APS、SIAM などの各会員。