

# 区分開閉器を用いた分散型電源の 地点別時間別連系可能最大容量の検討

岩崎敬亮\*<sup>1</sup>, 大貫悟志\*<sup>1</sup>, 青木秀憲\*<sup>2</sup>

## Examination of Locational and Hourly Maximum Capacity of a Distributed Generator Connected to a Distribution Power System Using Sectionalizing Switch

by

Keisuke Iwasaki\*<sup>1</sup>, Satoshi Ohnuki\*<sup>1</sup> and Hidenori Aoki\*<sup>2</sup>

(Received on March 31, 2007 & accepted on May 24, 2007)

### Abstract

Recently, the distributed generators (DGs) that have been connected to distribution systems have increased the complexity of electric power systems. If DGs are installed in distribution systems appropriately, the reduction of distribution loss and the substitution of petroleum resources can be expected. To ensure that the deployment of DGs is effective, it is necessary to know how many DGs can be introduced in systems and to increase their capacity. In this paper, we use sectionalizing switches and propose an algorithm that calculates the hourly maximum capacity of DGs at each location. We conclude by producing an optimal distribution scheme.

**Keywords:** locational and hourly capacity of DGs, distribution systems, distributed generator, sectionalizing switch, reverse flow

## 1. 緒言

近年の電力自由化に伴い、様々な分散型電源 (Distributed Generator: DG) が配電系統内に連系されることが予想される。そのため、DGの大量連系に対する課題が多く検討されている。特に、逆潮流現象に関しては系統内の電圧上昇を招く原因となるため、電力品質確保の面から対策が要求される。このような系統内の問題に対して、最近では、配電用変圧器や電圧自動調整器など電圧制御機器を用いて対処することが検討<sup>(1),(2)</sup>されているが、それら調整用機器の設置コストや設置箇所、さらには連系するDGの運用形態の決定に多くの課題が残されている。そのため、電力系統運用者は予め前述のような問題が生じない程度の適切なDG出力 (DG連系可能容量) を把握しておく必要がある。<sup>(3),(4)</sup>

これまでに、DG連系可能容量の算出に関しては様々な研究がなされている。特に、文献(3)では、各連系地点及び時間帯別に詳細な検討がなされている。このような検討によって、配電系統の電力供給信頼度を維持しつつ、前述のようなDGの活用によるメリットを期待し易くなる。また、DG連系可能容量に関しては、その出力電力が大きいほど1次系統の大規模発電所 (化石燃料を利用した発電方式) の電力負担分が軽減され、環境負荷を軽減することができる。そのため、本論文では電力の供給信頼性を維持しつつ、既存の配電系統に連系可能であるDG出力のより効果的な増大を図るために、系統内にある区分開閉器による負荷切換えを用いることを提案する。本稿は、提

案手法により地点別時間別DG連系可能容量を算出し、区分開閉器による効果を明らかにしている。

## 2. 制約条件及び評価関数

### <2.1>制約条件

配電系統内にDGを導入するときに考慮すべき制約条件を次に挙げる。<sup>(3),(5),(6)</sup>

#### ①電圧上下限値制約

$$V_{\min_n} \leq V_n \leq V_{\max_n} \quad (n \in N) \quad \dots (1)$$

#### ②線路電流量制約

$$|I_j| \leq I_j^{\max} \quad (j \in J) \quad \dots (2)$$

#### ③逆潮流制約

$$\sum_{n \in N} PDG_n < \sum_{n \in N} PL_n + \sum_{j \in J} loss_j \quad \dots (3)$$

ただし、 $V_{\min_n}, V_{\max_n}$ : 電圧上下限値、 $V_n$ : ノード  $n$  における時間断面  $t$  の電圧値、 $|I_j|$ : 線路区間  $j$  における時間断面  $t$  の電流値の絶対値、 $I_j^{\max}$ : 線路区間  $j$  の電流量、 $PDG_n$ : ノード  $n$  における時間断面  $t$  のDG出力、 $PL_n$ : ノード  $n$  における時間断面  $t$  の負荷消費電力、 $loss_j$ : 線路区間  $j$  における時間断面  $t$  の線路損失、 $N$ : ノード数、 $J$ : 線路区間数

①は、柱上変圧器を介して供給される低圧の需要家電圧を法規に定められた規定値 ( $101 \pm 5[V]$   $202 \pm 20[V]$ ) に維持するた

\*1 工学研究科電気電子システム工学専攻修士課程

\*2 工学部電気電子工学科教授

めに設ける高圧配電システムの電圧許容範囲である。②は、各区分間の配電線を通る電流の値が、その電線の材質や構造から定められた電流上限値を超過しないために設けられる。③は、系統運用者側において系統側の電圧管理や保護協調面、単独運転などの問題を回避するため、バンクへの逆潮流の流入を禁止するものである。

<2.2>評価関数

本論文で取り扱う評価関数は、次の2つの異なるケースを想定する。

①：DG 連系可能容量最大値の最大化

$$F1 = PG \max_{nt} \rightarrow \text{Maximize} \dots (4)$$

DG 出力の最大化のみに着目することで、DG 大量連系などに備えるものである。しかし、区分開閉器の切換え時には、電圧下限値や線路電流制約を維持するための DG 連系可能容量最小値を把握する必要がある。そのため、これらを考慮した DG の出力を求めることを目的にしている。

②：DG 連系可能容量最大値の最大化（但し、最小値=0）

$$F2 = PG \max_{nt} \quad (PG \min_{nt} = 0) \rightarrow \text{Maximize} \dots (5)$$

DG の事故時などの DG 解列を想定し、電力供給の信頼性を確保し、なおかつ連系可能容量の増大を目的とする。つまり、DG 出力がすべて0になった場合も同時に想定することで、DG による逆潮流および、通常負荷による電圧変動双方に対応するシステムの構成を行う。

ただし、 $PGmax_{nt}$ ：ノード n 時間断面 t における DG 連系可能容量最大値、 $PGmin_{nt}$ ：ノード n 時間断面 t における DG 連系可能容量最小値

3. DG 連系可能容量とその増加について

DG 連系可能容量は、DG の連系地点・負荷状態（時間帯）によって大きく変化する。そのため、各連系地点別及び時間別で詳細な検討を行う必要がある。ここでは、任意の時間断面における DG 連系時の系統の電力潮流の変化を基に、DG 連系可能容量の特性を調査し、更にその増大に向けた区分開閉器の動作について記述する。

<3.1>DG 連系時の電力潮流および電圧プロフィールの検討

まず、DG 連系による系統への影響を基に、DG 連系可能容量について検討する。Fig.1 には例題配電システムモデルとして 32 ノード放射状配電システムを示す。そして、Fig.2 には Fig.1 のメインフィーダの任意の点に DG（力率 1.0）を連系し、その出力をいずれかの制約に制限されるまで Step By Step 方式によって段階的に増加させた（DG 連系可能容量最大値導入）時の各地点の有効・無効電力潮流及び各ノード電圧のプロフィールを示した。また、Fig.3 には、メインフィーダの各ノードにおける DG 連系可能容量最大値（単位法：1000kw ベース）を示した。Fig.4 に

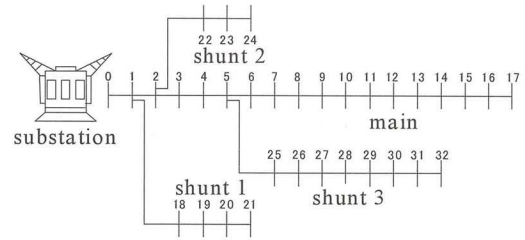
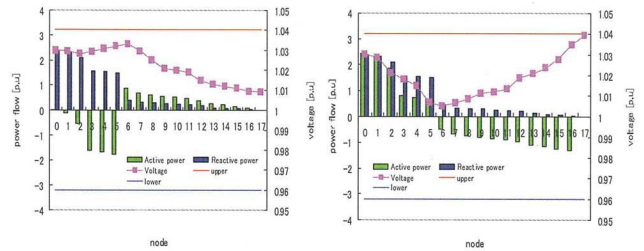


Fig.1 32nodes test system



(a) connecting node 6 (b) connected node 17  
Fig.2 Profiles of power flow and voltage

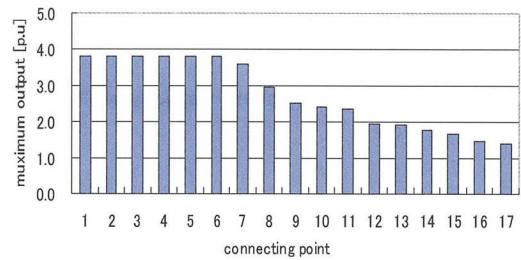


Fig.3 Maximum output of DG at each node

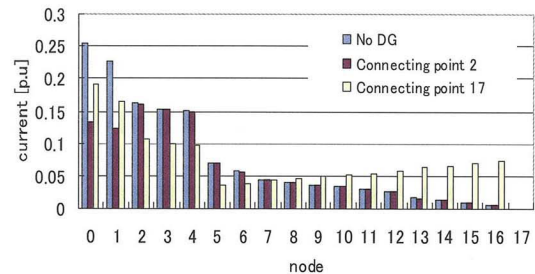


Fig.4 Profiles of current before and after connection of DG

は、上位側ノード 2 または末端側ノード 17 に DG が連系された場合の各地点の電流値を示している。

Fig.2(b)では DG は系統末端に位置しており、DG 出力が連系地点より末端側の消費電力を超過することで、逆潮流現象が生じる。通常ではインピーダンス降下によって末端側ほど電圧は降下するが、逆潮流現象によって電圧上昇が生じ、電圧が上限値に到達していることがわかる。一方、連系地点 6 のように、有効・無効電力潮流の比較的大きな系統上位側では、電圧が上限値に達する以前に DG の出力が系統の容量を超過し、逆潮流制約に制限される。また、Fig.3 に目を移すと、逆潮流制約に制限される範囲では DG 連系可能容量は系統全体の容量（負荷と線路損失の和）と等しくなるため、その値はほぼ一定である。一方、電圧制約に制限される範囲では、連系地点によって異なる

り、末端側程 DG 連系可能容量が小さい傾向にある。これらは、次のような考えに理論付けられる。

Fig.5 に、任意の区間のモデル及び、それぞれの要素のベクトル図を示した。この時、ノード0 からノード1 へ向かう各状態量は式(6)から(8)で表される。<sup>(7)</sup> なお、ベクトル図内各要素の添え数字は、次のケースごとの番号に対応するものとし、それぞれ次に説明する。

$$P_1 = P_0 - r \cdot \frac{P_0^2 + Q_0^2}{V_s^2} - PL_1 + PG_1 \quad \dots (6)$$

$$Q_1 = Q_0 - x \cdot \frac{P_0^2 + Q_0^2}{V_0^2} - QL_1 + QG_1 \quad \dots (7)$$

$$V_r^2 = V_s^2 - 2 \cdot (r \cdot P_0 + x \cdot Q_0) + (r^2 + x^2) \cdot \frac{P_0^2 + Q_0^2}{V_s^2} \quad \dots (8)$$

① 順潮流であり、負荷が誘導性の場合

ノード1 からノード2 への潮流を順潮流とし、負荷を誘導性であると仮定すると、受電端電圧  $V_r$  と、線路電流  $I_1$  間には  $\theta_1$  の位相差が生じ、これにインピーダンス降下を考慮すれば送電端電圧と受電端電圧の関係は、 $V_{s1}$  と  $V_r$  の関係となる。

② 逆潮流であり、遅れ無効電力潮流がある程度存在する場合

逆潮流によって受電端電圧  $V_r$  と線路電流  $I_2$  の位相差  $\theta_2$  は  $\theta_2 > \pi/2$  [rad] となる。したがって、①の送電端電圧と受電端電圧間の位相差は①のケースと逆となるが、この状態では送電端電圧が受電端電圧を上回っている。

③ 逆潮流であり、誘導性の無効電力潮流が極めて少ない場合

遅れ無効電力潮流の少ない地点では、受電端電圧  $V_r$  と線路電流  $I_3$  の位相差  $\theta_3$  が  $\pi$  [rad] に近づき、受電端電圧  $V_r$  が送電端電圧  $V_{s3}$  を上回るようになる。つまり、DG が末端側に連系されれば、その地点以下の消費電力が少ないため、広い区間で逆潮流が生じ易く、それに加え遅れ無効電力潮流が小さいために、電圧上昇が著しいと言える。この結果、末端側に DG が連系された場合、少ない DG 出力であっても電圧が上限値に達し易く、一方で系統上位側では、電圧上昇が鈍く、DG 出力が系統容量に達するまでの間、電圧が上限値に達し難いと言える。

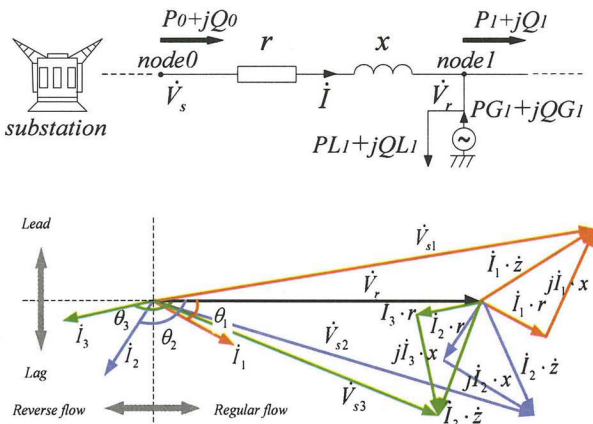


Fig.5 Vectors of power flow

Fig.4 には、DG の最大出力導入時の電流プロフィールを示している。電流に関しては、下位ノードの電力の一部を DG が補うため、連系地点より上位側では線路電流は減少する傾向が見られる。よって、電圧や逆潮流制約と比較すれば、DG 連系可

能容量が電流制約に制限されることは少ないと考えられる。しかし、ノード17 に DG が連系された場合に注目すると、大きな逆潮流によって末端側の電流が他のケースと比較して大きくなっている。仮にこの部分が電流容量の小さな電線で設計されている場合、逸脱の恐れがある。また、その他にも極めて重負荷である場合なども逸脱の可能性があるので、考慮が必要であると言える。

<3.2>区分開閉器を用いた DG 連系可能容量の増加

DG 連系可能容量は逆潮流現象に影響され、系統上位側では逆潮流制約、末端側で電圧上下限值制約に制限されることは、前節に示した。電圧に関しては、配電用変圧器や自動電圧調整器 (Step Voltage Regulator : SVR) や静止型無効電力補償装置 (Static Var Compensator : SVC) によって制御が可能である。つまり、DG 連系可能容量が電圧制約に制限されているケースでは、その増加が期待できる。しかし、SVR や SVC は設置コストや設置箇所の決定、協調制御の複雑さに難点があることが指摘されている。よって、本論文では、配電損失の軽減や、事故や工事などによって、任意の区間を系統から切り離すことを目的として設置されている区分開閉器<sup>(8),(9)</sup>に着目し、これを用いて DG 連系可能容量の増加を図る。

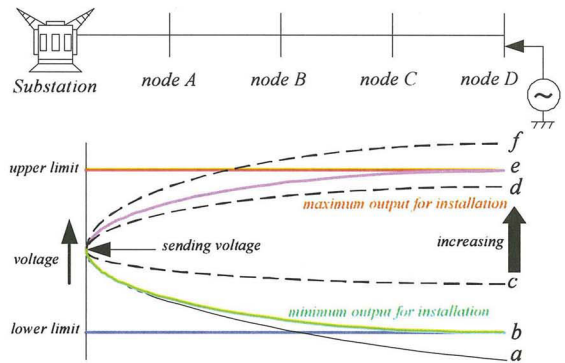


Fig.6 Profiles of voltage before and after connection of DG

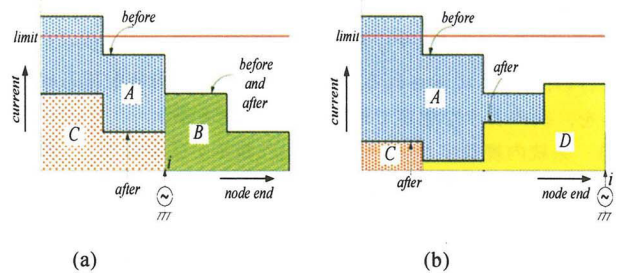


Fig.7 Profiles of current before and after connection of DG

Fig.6 には簡単な配電系統モデルと、末端に連系された DG の出力変化に対する電圧プロフィールの推移を示す。まず、DG 連系前に c の電圧プロフィールが得られている場合を想定する。この時、DG の増加に伴い電圧が上昇し、上限値に達した e の電圧プロフィールとなった地点の DG 出力が、DG 連系可能容量最大値である。本論文では、この状態より大きい出力の DG を連系可能とするために、末端側 (D 以下) に存在する区分開閉器を切换え、ノード D 以下に負荷を融通させ、電圧上昇を抑制することを提案する。すなわち、最末端であるノード D 以下



に負荷を設けることで、DG は末端側の負荷の電力を賄い、逆潮流が減少する。加えて、遅れ無効電力潮流が増加するため、電圧上昇を抑制できるものとする。また、区分開閉器が他のバンクに接続されているフィードを介して設置されている場合、DG の連系される系統の負荷が増加する。よって、系統容量が増加するため、逆潮流制約値が増加し、逆潮流制約に制限される地点においても DG 連系可能容量の増大が期待できる。

しかし、区分開閉器を切替えることで、系統の電力潮流が大きく変化する。例えば定常状態と比較して任意のフィードの負荷が増加することで、線路のインピーダンス降下が大きくなり、DG を連系しない状態において電圧の下限値を逸脱してしまう。この状態が Fig.6 に示す a の電圧プロフィールである。しかし、ある程度出力調整が可能な DG を連系することで電圧は上昇し、やがて制約範囲内へと推移することになる。この場合、e の電圧プロフィールで表される DG 連系可能容量最大値のみでなく、電圧を下限値以内に保つための容量 (DG 連系可能容量最小値) についても検討する必要がある。また、負荷の増加に伴い系統上位側の線路電流も増加するため、DG を連系しない状態で電流制約を逸脱する可能性がある。Fig.7 は DG 連系前と連系後における配電線の電流値を模擬したものである。まず、(a)について、連系前は A 及び B で示される大きさの電流が各地点に存在しており、上位側区間では電流制約を逸脱しているものと仮定する。しかし、i 点に DG が連系されると連系地点以上の区間でその量に相当する電流が減少する。これにより DG 連系後の電流値は B 及び C となる。その結果、上位側にある電流値の制約逸脱は解消される。ただし、この場合には制約逸脱を解消するためにいくつかの DG 出力が要求されることになる。そのため、DG 連系可能容量最小値を算出する必要がある。次に、(b)は末端側に DG が連系された場合である。この場合には、DG 連系により一時的に電流制約逸脱解消が可能となるが、DG 出力の増加に伴い逆潮流も増加し、DG 連系前とは異なる区間で電流が上限値に近づく現象が現れるため、注意が必要である。

#### 4. 数値計算条件

##### <4.1>モデル系統

数値計算では C 言語プログラミングによってシミュレーションを行い、Fig.8 に示される IEEE123 ノード放射状配電系統モデルを、次のような想定で取り扱うものとする。

- ① 系統内裸数字がノード No、()内数字が区間番号、○数字 (①~⑥) が開閉器番号を表している。
- ② 各ノードの負荷及び力率は既知であり、その変動率は Fig.9 及び Fig.10 で示される。ただし負荷は三相平衡であり、午前 0 時から午前 9 時までは進みれ力率、その他の時間帯では遅れ力率とする。
- ③ 配電線の各区間には、抵抗とインダクタンスのみが存在し、その値は既知である。
- ④ 連系される DG (三相) の力率は 1.0 とする。
- ⑤ 線路電流容量は、幹線で 450[A]、支線で 125[A]とする。
- ⑥ 配電線の section ごと柱上変圧器のタップを設定しており、電圧上下限値は Fig.11 に示す値を用いる。
- ⑦ 系統の総負荷は、軽負荷時(午前 5 時)に 1361[kW]、重負荷時(午後 3 時)に 4537[kW]となる。
- ⑧ 定常状態では区分開閉器②⑤が開放状態となっている。

- ⑨ 送り出し電圧に関しては次式の評価関数に基づいて開閉器パターンごと予め決定されている。その電圧プロフィール (9 通り : 4.3 節に詳細を記述) を Fig.12 に示す。

$$F_{V\_send} = \sum_{n \in N} g_k(V, I) + \sum_{n \in N} (V_{ref\_n} - V_n)^2 \rightarrow \text{Minimize} \quad \dots (9)$$

##### <4.2>地点別時間別 DG 連系可能容量の算出方法

モデル系統にインピーダンス及び各時間断面の負荷が与えられているため、式(6)~(8)に基づいて潮流計算を行うことができる。つまり、DG の連系地点及び出力を与え、潮流計算によって各ノード、区間の状態量を算出し、式の制約条件によってその DG が連系可能であるか否か判定することができる。本論文では DG 出力の変化に対する各状態量の変化に着目し、DG 連系可能容量最大値  $PG_{max_{nt}}$  と、最小値  $PG_{min_{nt}}$  を算出する。算出方法に関しては、次のことを考慮する。

- ① 電圧上限値および逆潮流制約は、DG 出力が大きいかほど制約値に近づく (DG 出力増加→電圧上昇または逆潮流増加)
- ② 電圧下限値制約は、DG 出力が小さいほど制約値に近づく (DG 出力減少→電圧低下)
- ③ 線路電流制約は、DG 出力が増加することで制約値に近づく区間もあれば、制約値からの余裕が増加する区間もある (DG 出力増加→電流増加または電流減少)

①,②に関しては DG 出力の増減に対する制約値への推移が明確であるため、電圧上限値または逆潮流制約を逸脱する瞬間の DG 出力の値が最大値、電圧下限値制約を逸脱する瞬間の DG 出力が最小値であると決定できる。一方③では、線路電流制約に関しては各区間で推移が逆になることがあるため、電圧及び逆潮流制約と同時に考えることはできない。したがって、電圧及び逆潮流制約に対する最大値  $PV_{max_{nt}}$ ・最小値  $PV_{min_{nt}}$  と、電流制約に対する最大値  $PI_{max_{nt}}$ ・最小値  $PI_{min_{nt}}$  を求め比較する。そのフローを Fig.13 (a) に示し、Section ごとに、その詳細を記述する。

SectionA では初期状態で潮流計算[a-2]及び系統の評価[a-3]~[a-5]を行い、どの制約を逸脱しているかを把握する。これにより、次のステップである SectionB におけるフローが異なる。その理由は、DG 連系可能容量の最小値が存在しなければ、これを算出するアルゴリズムを実行する必要が無いためである。

SectionB では、 $PV_{max_{nt}}$ ,  $PV_{min_{nt}}$ ,  $PI_{max_{nt}}$ ,  $PI_{min_{nt}}$  の算出を行う。これらは可能な限り厳密な値を算出する必要があるが、例えば Step by Step を用いて算出を行えば、その計算量は膨大なものとなる。そのため、本論文では Fig.13(b)に示すようなアルゴリズムを構築した。図は、 $PV_{max_{nt}}$  を算出するためのフローである。まず[b-2]~[b-4]で系統データの読み込み、連系地点及び DG 出力の設定を行う。[b-5]では DG 出力を変化させる大きさ  $F_g$  を 1000 に設定する。[b-6]では現在の状態を用いて潮流計算を行い、[b-7]では制約条件を判定する。指定された電圧上限値及び逆潮流制約を満足していれば、[b-8]で現在の  $PV_{max_{nt}}$  を  $F_g$  増加させ、再評価する。一方、[b-7]で制約逸脱と判断された場合、[b-9]で電圧下限値制約を同時に判断し、電圧下限値も同時に逸脱していれば、導入は不可能であると判断し、アルゴリズムを終了する。また、電圧下限値を同時に逸脱していない場合、最終的に求める  $PV_{max_{nt}}$  は、現在の  $PV_{max_{nt}}$  と、 $PV_{max_{nt}} - F_g$  との間に存



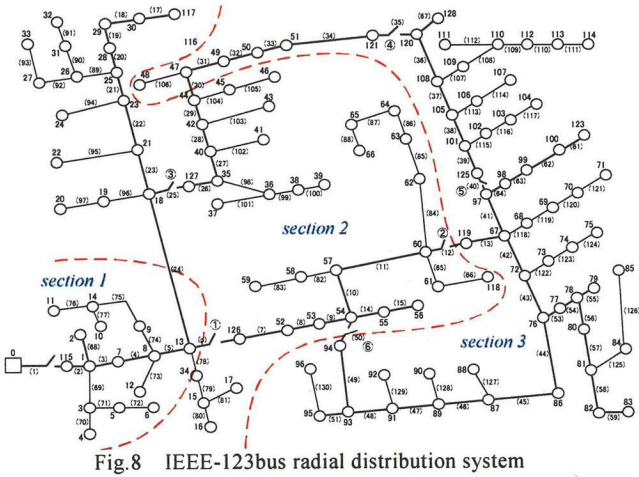


Fig.8 IEEE-123bus radial distribution system

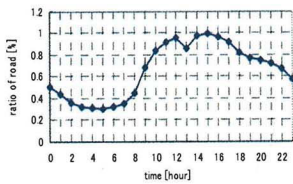


Fig.9 Coefficients of load change

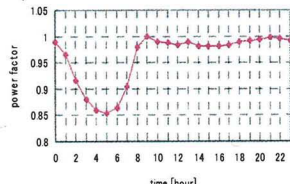


Fig.10 Power factor

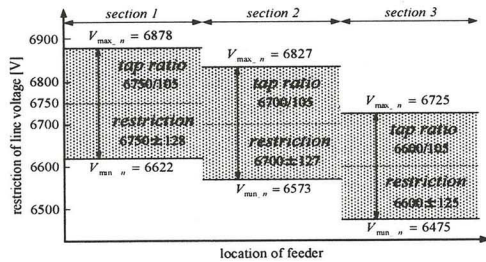


Fig.11 Ranges of voltage restriction and tap of pole transformer for each section

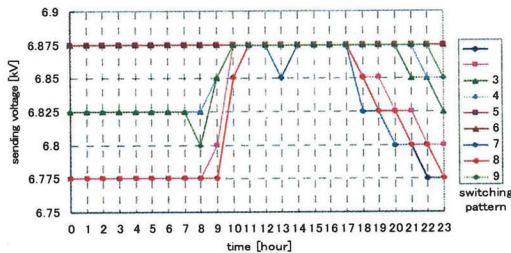
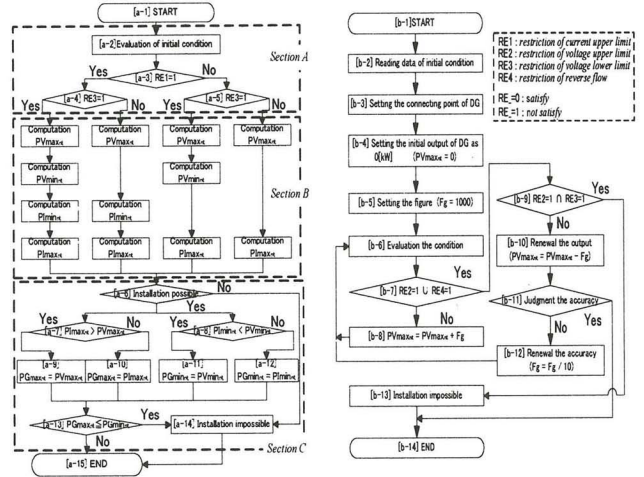


Fig.12 Profiles of sending voltage

在すると考え、 $PV_{max_{nt}} - Fg$ [b-10]の点から  $Fg$  を現在の  $1/10$ [b-12]として繰り返す。これを求めたい精度[b-11]まで行う。これまでのフローを、Fig.14を用いて分かり易く解説する。例えば、Fig.14に示すように、DG出力を0から  $Fg=1000$  ずつ増加させ7000で逸脱が生じた場合、 $PV_{max_{nt}}$ は6000~7000の中に存在することになる。よって、次に6000から100ずつ増加させ、同様に逸脱する点6400を求める。更に、6300から10ずつ増加させ、逸脱する点を求める。これを求めたい精度まで行うことで、Fig.14では  $PV_{max_{nt}}=6347$ と求めることができる。また、この点から同様な手法で出力を減少させ、電圧下限値を逸脱する点求めれば、 $PV_{min_{nt}}$ が求まる。 $PI_{max}$ ,  $PI_{min_{nt}}$ に関しては、 $PI_{min_{nt}}$ の存在しない(初期状態で線路電流制約を逸脱していない)場合



(a) Computation of  $PG_{max_{nt}}$ ,  $PG_{min_{nt}}$  (b) Computation of  $PV_{max_{nt}}$ ,  $PV_{min_{nt}}$   
Fig.13 Flow chart for computation of maximum and minimum output of DG

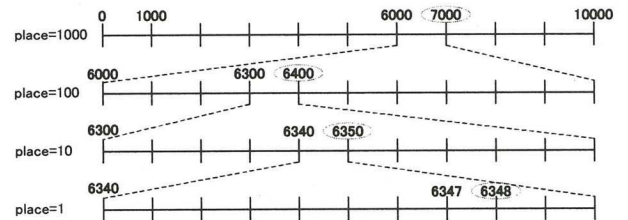


Fig.14 A method for searching required point

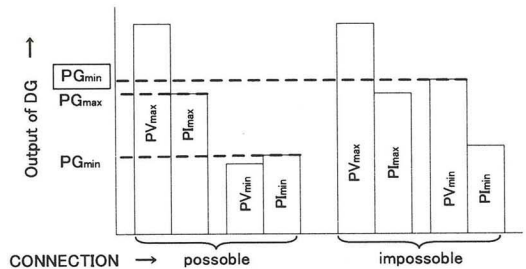


Fig.15 Determination of maximum and minimum output of DG

は、 $PI_{max_{nt}}$ を同様な手法で算出することが可能である。 $PI_{min_{nt}}$ の存在する場合に関しては、同様な手法で  $PI_{min_{nt}}$ を算出することはできない。なぜなら、例えば  $PI_{min_{nt}}$ と  $PI_{max_{nt}}$ 双方が0から1000の間に存在している場合を考えると、 $PI_{min_{nt}}$ と  $PI_{max_{nt}}$ を特定することができない。したがって、 $PI_{min_{nt}}$ が存在する場合、まず初期状態で電流逸脱量が最大である区間  $S_{max}$ に着目する。つまり、DGに連系によって電流制約逸脱が解消される時は、 $S_{max}$ の制約逸脱が解消される時に等しい。よって、制約の判断を  $S_{max}$ の逸脱解消を対象として、上記のアルゴリズムを実行し、 $PI_{min_{nt}}$ を求める。また、その点から、 $S_{max}$ 以外の区間が制約逸脱する点  $PI_{max_{nt}}$ を同様なアルゴリズムを用いて算出する。

SectionCでは、まずSectionBで連系可能であるか否かを判断[a-6]し、連系不可能であればアルゴリズムを終了する。連系可能であれば、求めた  $PV_{max_{nt}}$ ,  $PV_{min_{nt}}$ ,  $PI_{max_{nt}}$ ,  $PI_{min_{nt}}$ を用いて



$PG_{max_{nt}}, PG_{min_{nt}}$ を算定する。これに関しては、Fig.15に示すように、最大値は  $PV_{max_{nt}}$  と  $PI_{max_{nt}}$  を比較して小さい値を、最小値は  $PV_{min_{nt}}$  と  $PI_{min_{nt}}$  を比較して大きい値を採用する。[a-7] ~ [a-12] また、 $PG_{max_{nt}} \leq PG_{min_{nt}}$  となった場合は、制約を満たす DG 出力の範囲が存在しないため、連系は不可能であるとす。

このフローを連系地点及び時間で行い、地点別時間別 DG 連系可能容量の算出を実行している。

<4.3>区分開閉器の切換え

Fig.8 で示した系統内6つの開閉器を用いた切換えを想定すると、64通りの組み合わせが考えられる。しかし、区分開閉器の切換えは定常運転時に次の制約を満たさなければならない。

- ① 配電系統は配電用変電所を最上位ノードとする放射状を維持しなければならない。
- ② 配電系統内に停電ノードを生じてはならない。

よって、64通りの組み合わせの中からこの制約を満足しているものを選出すると、Table.1に示す9通りの組み合わせが選出される。この9通りに対して、それぞれ地点別時間別 DG 連系可能容量を算出し、各連系地点及び時間帯で、どの開閉器の開閉状態が最適であるかを式の評価関数によって検討し、配電系統の運用計画を決定する。

Tanle.1 Switching pattern

switching pattern	1	2	3	4	5	6	7	8	9
opening switches	②,⑤	②,④	②,③	②,⑥	①,②	①,⑥	⑤,⑥	④,⑥	③,⑥

5. 数値計算結果の考察

<5.1>各開閉器パターンの検討

まず、Fig.16に9通りの開閉器状態すべての地点別時間別の  $PG_{max_{nt}}, PG_{min_{nt}}$  を示す。平面上横軸に時間、縦軸に DG の連系地点、そして高さはそれぞれの地点別時間別の DG 連系可能容量の最大値・最小値を示している。Table.2には、それぞれの地点別時間別  $PG_{max_{nt}}$  の和、 $PG_{min_{nt}}$  の和及び、その差を示した。

開閉器パターン1,2では、すべての  $PG_{min_{nt}}$  が0であるため、たとえ連系された DG が解列されても制約逸脱を生じることなく、電力品質を確保した運用を行うことができることがわかる。DG の連系地点が上位側である場合、逆潮流が生じる DG 出力がかなり高い値となるため、制約逸脱が生じ難く  $PG_{max_{nt}}$  が系統容量に近いものとなる。よって、負荷曲線と同様な推移で変化する。一方、系統末端側では逆潮流が生じ易く、更に遅れ無効電力潮流が小さいため、電圧上昇が生じ易い状態であり、比較的低出力で電圧上限値に制限される傾向となっている。電圧上昇の程度も、負荷曲線の影響を受けるため、特に軽負荷で進み力率である夜間より、重負荷で遅れ力率ある昼間にやや多くの DG を連系可能であるが、逆潮流制約に制限される上位側と比較すれば、1日の中での変化は少ない。しかしながら、系統上位側においても  $PG_{max_{nt}}$  が系統容量に達している箇所が少なく、大部分が電圧上限値に制限される結果となった。電流制約に関しては、今回のシミュレーションの中で他の制約より先に逸脱することが見られなかったため、大部分で逸脱を生じる電圧を制約値以内に保つことのほうが難しいものと予測できる。

開閉器パターン3~6, 9に関しては、定常状態（開閉器パターン1）と比較して系統構成が相当異なるため、DG 連系前の状

Table.2 The total sum of  $PG_{max_{nt}}$  and  $PG_{min_{nt}}$

switching pattern	$\sum \sum PG_{max_{nt}}$	$\sum \sum PG_{min_{nt}}$	remainder
1	522964	0	522964
2	501598	0	501598
3	23080	15730	7350
4	538778	84622	454156
5	285366	225315	60051
6	426562	286664	139898
7	672161	4786	667375
8	658985	43926	615059
9	487312	152624	334688

Table.3 Comparison between before and after switching

function	$\sum \sum PG_{max_{nt}}$	$\sum \sum PG_{min_{nt}}$	remainder	target switch pattern	increasing rate [%]	
					maximum	remainder
F1	832434	300687	531747	7	23.8	-20.3
F2	702847	0	702847	1	34.4	34.4

態で制約逸脱を生じ、多くで  $PG_{min_{nt}}$  が存在する。そのため、各パターンはそれぞれ特徴的であり、特に電圧に制限される末端側では、最大値がパターン1, 2よりはるかに大きい値となっているケースもみられる。また Table.2 に示されるように、その総和も定常状態と比較しても大きくなっているパターンもある。しかしこれらは  $PG_{min_{nt}}$  が  $PG_{max_{nt}}$  にかかなり接近している箇所が多く存在する。軽負荷時には、系統上位側から末端側への電圧の偏差は少ないため、電圧は制約値に収まり易く、 $PG_{min_{nt}}$  も生じ難い。しかし、重負荷時には上位側から末端側の電位差が大きくなるため、電圧が制約値に収まる DG 出力の範囲は限られ、 $PG_{min_{nt}}$  と  $PG_{max_{nt}}$  が接近するケースが多く見られる。よって、出力変動の大きな DG を連系する場合には不適切であると言えるが、出力変動が少なく、比較的細かな出力調整の可能な DG の連系により連系可能な DG 出力を増加できる。

開閉器パターン7,8では系統構成が定常状態と近いため、 $PG_{max_{nt}}$  の総和が大きく、 $PG_{min_{nt}}$  も重負荷時の一部の時間帯でしか生じていない。

このように、運用者側が DG 連系可能容量を予想される負荷から予め算出し、知っておくことで電力の信頼性を確保しつつ、DG の連系及び DG の連系時の系統運用のプランニングを適切に行うことができる。

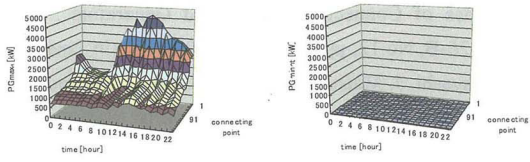
<5.2>区分開閉器を切換え後の検討

次に、区分開閉器の切換えを用いた DG 連系可能容量の増大効果について評価関数 F1, F2 をそれぞれ検討する。

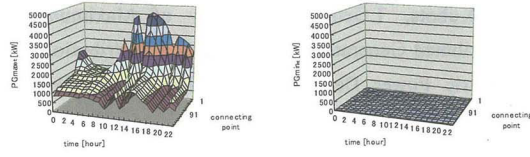
まず、 $PG_{max_{nt}}$  の増加を目的とした場合、式(4)に対して区分開閉器の切換えを行った結果を Fig.17~19 (1~123 の数字は DG の連系地点を意味する。)に示す。Fig.19 の  $PG_{max_{nt}}$  に着目すると、区分開閉器の切換えを行わない9パターンのいずれと比較しても、かなりの増大がみられる。切換えを行わない場合の  $PG_{max_{nt}}$  総和が最も大きかったパターン7と比較しても、Table.3 に示すように、区分開閉器の切換えにより  $PG_{max_{nt}}$  総和は23.8[%]の増加を図ることができている。Fig.17の区分開閉器の切換の様子を見ると、特に重負荷時に様々な状態に切換わることで、それぞれのパターンの特徴を生かし、最大値が増加したと言える。一方で、 $PG_{min_{nt}}$  が  $PG_{max_{nt}}$  にかかなり接近している箇所が存在するため、 $PG_{max_{nt}}$  と  $PG_{min_{nt}}$  の差が小さくなり、急激な DG の出力や負荷の変動に対応する能力が低くなっている。よって、安定した出力及び制御を行うことのできる電源システ



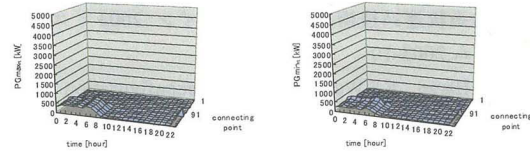
switching pattern 1



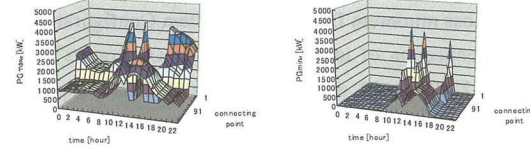
switching pattern 2



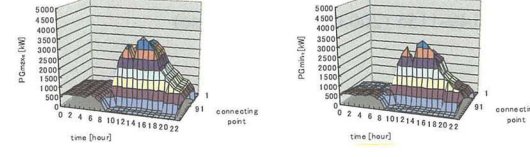
switching pattern 3



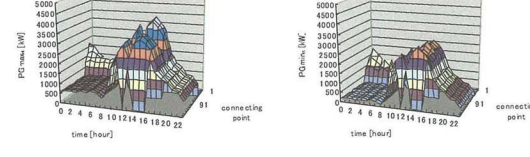
switching pattern 4



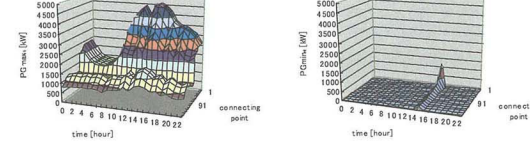
switching pattern 5



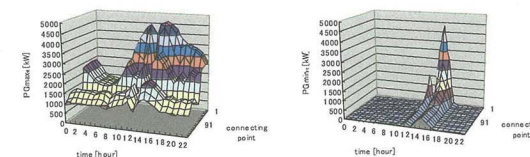
switching pattern 6



switching pattern 7



switching pattern 8



switching pattern 9

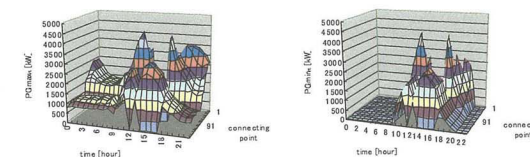


Fig.16 Locational and hourly maximum and minimum capacity of DG for each switching pattern

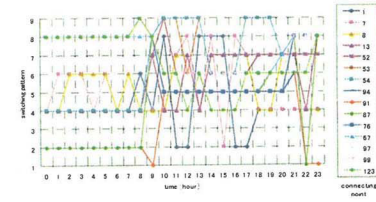


Fig.17 Profiles of switching for function F1

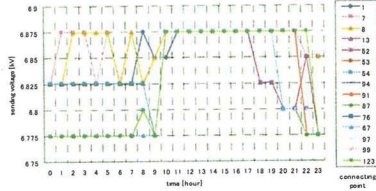


Fig.18 Profiles of sending voltage for function F1

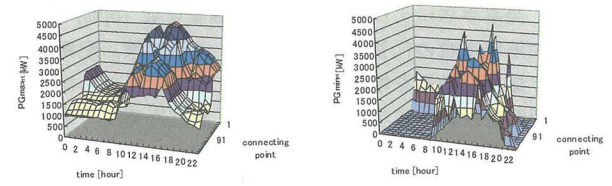


Fig.19 Locational and hourly maximum and minimum capacity of DG for function F1

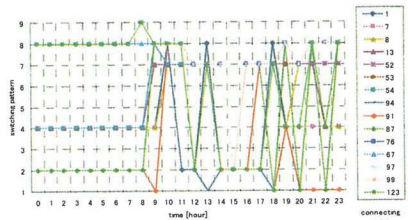


Fig.20 Profiles of switching for function F2

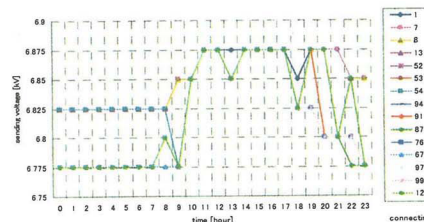


Fig.21 Profiles of sending voltage for function F2

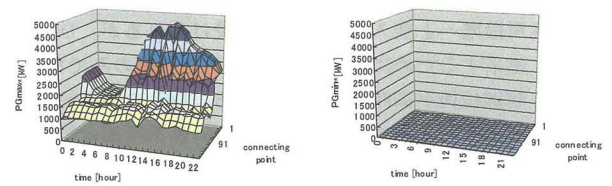


Fig.22 Locational and hourly maximum and minimum capacity of DG for function F2

ムを用いなければならないが、それが可能であるならば DG 連系箇所に応じて Fig.17~19 に示される開閉器切換え状態、送り出し電圧プロフィール及び、地点別時間別 DG 連系可能容量から、効果的な運用計画が実現可能となることがわかる。

次に、電力品質の信頼性を考慮しつつ、PGmax<sub>ni</sub> の増加を目的とした F2 についての検討を行う。Fig.20~22 には、その結果が示されている。比較対象は、同条件で PGmax<sub>ni</sub> 総和が最大で



あるパターン1とする。Table.3より、パターン1と比較するとPGmax<sub>ni</sub>総和が34.4[%]増加している。Fig.20の区分開閉器の切換えの様子を見ると、比較的定常状態に近い開閉器パターン2,7,8への切換えが多く見られる。特に、開閉器パターン7,8に関しては、PGmax<sub>ni</sub>総和が定常状態より大きく、PGmin<sub>ni</sub>も一部の重負荷時にしか生じていないため、その時間帯を他の開閉器状態に切換えることで、開閉器パターン6,7の長所が生きている。この状態のようにPGmin<sub>ni</sub>が存在しない場合には、PGmax<sub>n</sub>が、DGの解列が生じて安定した電力供給ができるDG出力の範囲を示していることになる。すなわち、運用者側はFig20~22の開閉器切換え状態、送り出し電圧プロフィール、地点別時間別DG連系可能容量を予め理解し、運用することで、定常状態から予想されるDG出力に対応でき、さらには、急激なDG出力による変動や解列についても対応が可能になるものとする。また、提案手法によってDGの連系容量を数10[%]増加できれば、大規模系統の代替、環境問題への改善対策、配電損失の軽減など様々な効果を期待することができる。これらが既存の区分開閉器を用いて実現できるならば、新たな電圧・電力潮流などの制御機器の投入コストの削減にも繋がることになる。今回のシミュレーションは、配電系統にはバンクが1つしかないものとして取り扱ったため、主に電圧制約に対してDG連系可能容量の増大効果を図ることができることを明らかにした。しかしながら、区分開閉器の切換えは他の制約に対しても増大効果が図れるので、DGの連系時にはこれらの点を考慮した最良系統を構成することが望まれることになる。

## 6. 結言

本論文では、近い将来大量に連系されてくるであろうDGによる配電系統の逆潮流問題を取り扱い、その対処方法の1つとして連系可能であるDG出力を地点別時間別で算出を行った。また、DGの持つ環境負荷の軽減効果などの長所を生かすため、その増大を既存の区分開閉器を用いて行った。区分開閉器を切換えることで、DG連系可能容量増加に対するメリットが現れることが明らかとなった。これに対して、初期状態と大きくかけ離れた系統構成となる場合には電力品質の確保が難しくなる。特に、電圧に関しては、その制約の範囲が狭く、系統内で大きな電力潮流の変化が生じる場合には電圧制御機器を用いないとその対応は難しいものとする。

近年、実用段階へと突入した電源も見受けられるが、DGとして系統に連系するためには、電源の高性能化技術のみでなく、系統連系・制御技術が同時に不可欠となる。DGの効果的な実用を図るためには、本論文のように、DGの連系可能な範囲の出力状態を把握するだけでなく、区分開閉器の使用や電圧・電力潮流の制御機器を含めたあらゆる研究を融合した技術が必要になるであろう。

## 参考文献

- (1) T. Hasagawa, H. Aoki, Y. Mizutani: "Optimal Placement of Step Voltage Regulator Considering Interconnection of Distributed Generator" IEE Japan, Joint Conference of PE&PSE, PSE-05-113, pp31-36 (2005-9)
- (2) J. Sugimoto, R. Yokoyama, G. Fujita, and Y. Fukuyama:

- "Cooperative Allocation of SVR and SVC for Voltage Fluctuation in Case of Connecting Distributed Generators", T. IEE Japan, Vol.126-B, No.12, pp.1191-1198 (2006-12) (in Japanese)
- (3) Y. Hayashi, J. Matsuki, Y. Hanai, S. Hosokawa, and N. Kobayashi: "Computation of Locational and Hourly Maximum Output of a Distributed Generator Connected to a Distribution Feeder", T. IEE Japan, Vol.126-B, No.10, pp.1023-1031 (2006-10) (in Japanese)
- (4) Y. Kubota, T. Genji: "A Theory of Maximum Capacity of Distributed Generators Connected to a Distribution system Using Electric Power Density Model" IEE Japan, Vol.125-B, No.5, pp475-484 (2005-5)
- (5) 分散型電源有効活用のための電力系統技術：電気学会技術報告, 第1025号, 2005-6
- (6) 電力系統連系技術要件ガイドライン 2003：エネルギーフォーラム, 2003-10
- (7) M.E. Baran, F.F. Wu: "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.4, No.2, pp.1401-1407 (1989-4)
- (8) H. Takano, Y. Hayashi, and J. Matsuki: "Determination Method for Loss minimum Distribution System Configuration Considering Disconnection of Installed Dispersed Generators", T. IEE Japan, Vol.122-B, No.12, pp.1376-1383 (2002-12) (in Japanese)
- (9) Y. Mishima, K. Nara, T. Satoh, T. Ito, and H. Kaneda: "Method for Loss Minimum Re-configuration Problem of Distribution System by Tabu Search", T. IEE Japan, Vol.123-B, No.10, pp.1149-1155 (2003-10) (in Japanese)