

区分開閉器の電圧制御効果による分散型電源 導入可能容量の増大

岩崎 敬亮*¹ 矢代 篤*¹ 青木 秀憲*²

Increase in Maximum Capacity of Distributed Generators Installed in Distribution Systems Using Voltage Control Effect of Sectionalizing Switches

by

Keisuke IWASAKI*¹, Atsushi YASHIRO*¹ and Hidenori AOKI*²

(Received on Sep.28, 2006 & accepted on Nov.22, 2006)

Abstract

Recently, the distributed generators (DGs) introduced in distribution systems have resulted in more complicated electric power systems. Therefore, it is an important problem to know the maximum capacity of the DGs that can be introduced to the systems. The authors propose the use of a sectionalizing switch and analysis based on a genetic algorithm (GA) to solve this problem. The effectiveness of the proposed method is demonstrated in practical distribution systems.

Keywords: Distribution systems, Distributed generator, Reverse flow, Sectionalizing switch, Genetic algorithm

1. はじめに

近年、電力自由化の進展や環境保護の観点を考慮すると、電力システムには太陽光発電や燃料電池、コジェネレーションシステム等の各種分散型電源(Distributed Generators : DG)が大量に導入されることが予想される。これらが系統内に適切に設置された場合、送電損失の軽減や、大規模電源の代替、大気汚染問題の解消などといった効果が期待されている。しかし、配電系統は電力系統の末端に位置しているため、系統容量が小さく、DGの大量導入に対するシステムが未だ十分に設備されていないのが現状である。そのため、このような状況でのDGの導入は、逆潮流現象による電圧上昇や電力品質の低下などの技術的な問題を発生する可能性が指摘されている。

配電系統の電圧管理についてはこれまで様々な検討がなされている。最近では、系統内にSVR (Step Voltage Regulator) や SVC (Static Var Compensator) などを設置し、それら電圧制御機器の制定値の調整により逆潮流時の系統内の電圧を規定値内に維持する研究が進められている。しかし、それら機器のコスト面や、運用の困難さ(最適な導入台数や設置箇所、制定値の決定)が問題となる。そのため、予め任意のノードに導入されるDGの容量を適切に決定することは重要な課題となっている。従って、配電系統内にDGを新たに導入する場合には、その適切な導入可能容量を算出し、更により多くの容量を受け入れるための系統を構成する必要がある。

本論文は、配電系統におけるDGの導入可能容量の最適化を遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm : GA)により検討して

いる。その際、配電系統内に多数設置されている区分開閉器の動作により各フィード間での負荷切換えを実施し、新たな系統構成を作成し、DGの導入可能容量の増大を図るアルゴリズムを提案している。

2. 逆潮流現象と区分開閉器による抑制

放射状の構成となっている配電系統では、電力潮流は系統最上位である配電用変電所(配変)バンクから、系統末端への方向となる。この様子を簡単に図示すると、Fig.1(a)のようになる。(簡単化のため、線路損失は無視する。)その後、末端側ノードにDG1、DG2が導入されたものとする。このとき、各DGから導入された電力(斜線部)は、DGの導入点から末端側へと流れようとする。しかしながら、このような状態にある系統では系統最末端に接続されているDG1に対して、この導入点ノード以下の系統が存在しないので、まず導入点のノードの負荷を負担することになる。この場合、DG1の出力がそのノードの負荷を上回ることになる。そのため、DG1に余剰出力電力が生じ、余剰分が従来とは逆方向となる上位ノード側へと流れることになり、逆潮流現象が生じることになる。また、同図のように末端側にさらにDG2が集中して導入される場合には、DG2による出力も系統末端側へと流れることができなくなり、逆潮流区間が増大する要因となる。本来、配電系統は放射状の構成であるため、各ノードの電圧は末端に向かうにつれて、線路のインピーダンスにより降下することになる。しかし、逆潮流区間では電力潮流が逆方向であるために系統末端側の電圧は上昇する。これによりノードの電圧が定められた電圧上限値を超過し、定められた制約の逸脱を生じる大きな原因となる。

* 1 工学研究科電気電子システム工学専攻

* 2 工学部電気電子工学科教授

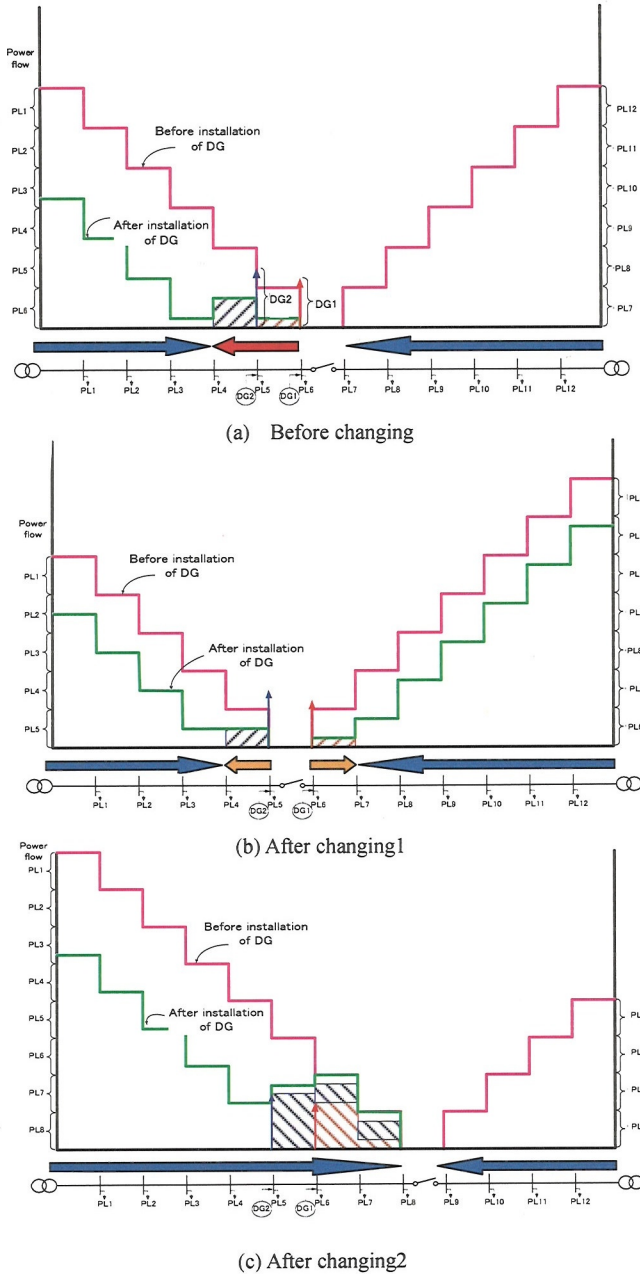


Fig.1 Reduce of reverse flow

本稿では、システムの電圧管理に焦点を当て、SVR や SVC などの電圧制御機器の操作をするのではなく、その前段階において区分開閉器の動作による電圧管理を提案している。そのため、まず各区分間に設置されている区分開閉器による負荷の切り換えを Fig.1(a)から Fig.1(b)のように変更する。この場合、大きな逆潮流に起因していた DG の一方 (DG1) を、他のフィーダに移行することにより、左側のフィーダにおける逆潮流の区間が減少し、これまでよりも電圧上昇が抑制されることになる。これにより、右側のフィーダでは逆潮流を生じることになるが、システム全体から判断した場合には、切り換え以前のような大きな逆潮流が分散されることで、各フィーダの電圧上昇も軽減されることになる。次に、Fig.1(c)のように、DG の設置点より末端側の負荷を増加させるような切り換えを行った場合を考察する。この操作は、DG の出力電力が設置点より末端側の負荷を全て負担し、余剰出力電力がこれまでより減少し、逆潮流を抑制することに

なる。更に、遅れ無効電力の増加に伴う電圧上昇抑制効果によって、電圧上限値からの余裕が増加することが期待できる。

その他、DG の導入後には、上位側の電力潮流が軽減されるため、DG の適切な導入により線路損失及び変電所の負担を軽減することが期待できる。

3. DG 導入可能容量の増大効果について

最近の電力自由化により配電システム内に DG が導入される時の電圧管理については、SVR や SVC などの電圧制御機器を用いて検討が進められている。しかしながら、その前段階において導入が可能である DG の導入容量を予め算出できるならば、それら機器の設置コストなどをより効率的に軽減できるものと考えられる。

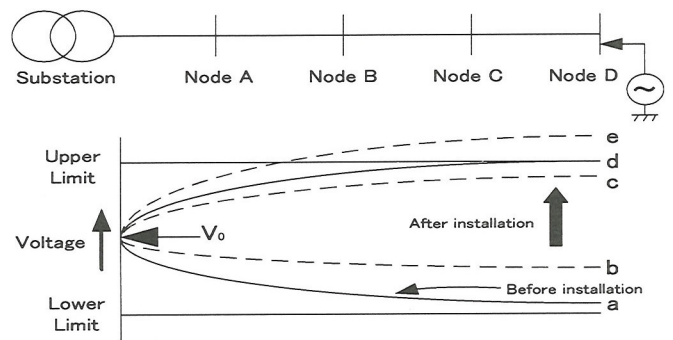


Fig.2 Limit of installation

そこで、本研究では、システムへの DG の導入可能容量を次のように考えることにする。Fig.2 は簡単な配電システムモデルとそのときの各地点における電圧値を示したものである。まずシステム内に DG を導入していない場合の電圧は a で示されるものとする。次に、この状態にあるシステムの Node D に DG を導入する。このとき、その出力電力の増加と共に各ノードの電圧は $b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e$ と変化することになる。特に、 $d \rightarrow e$ においては、逆潮流現象によって、末端側の電圧が上位側の制限電圧を上回るようになる。通常、e のように電圧上限値を逸脱してしまう場合には、逆潮流対応型 SVR や SVC などの電圧制御機器により電圧の補償が行われ、逸脱箇所の電圧が規定値内に抑えられることになる。これに対して、それら機器が設置されない場合には、電圧の上限値を逸脱しないための DG の最大出力電力は、電圧上限値を超えない d の曲線で表されることになる。すなわち、この時の DG の出力が、導入可能容量となる。しかしながら、最近ではシステムが複雑となり、その厳密な容量を算出することは困難となるため、本稿ではメタヒューリスティック手法を用いてこの値を決定している。その際、区分開閉器による負荷切り換えをこれと同時にを行い、逆潮流による電圧上昇軽減と DG の導入可能容量の増大効果を図っている。

4. 評価関数とその制約条件

本研究では、配電システムを (I)~(IV) のような仮定で扱い、本問題における評価関数およびシステム運用上の制約条件を以下に示す。

- (I) 各ノードの負荷は定電力で、その値は既知である。
- (II) 各区分間の線路は抵抗とリアクタンスのみが存在し、その

値は既知である。

- (Ⅲ) 分散型電源は定電力量 (力率 1.0) として扱い、各設置箇及び出力は既知である。
- (Ⅳ) 区分開閉器は全ての区間に設置されている。

〈4.1〉 評価関数

本問題は、式(1),(2)の評価関数で定義される。式(1)は、区分開閉器の切換えで配電損失の最小化を図る関数である。これには第4項として、各ノードの電圧の規定値 (単位法 1.0[p.u.] = 6.6[kV]) からの偏差の最小化を図る項が新たに設けられている。式(2)は分散型電源導入量(DGn)の増加を目的とし関数である。本研究では、重み係数によって、式(2)が重視されることになる。ただし、DG の導入容量の増加に関与しない区分開閉器が切替わる場合には、式(2)の値は変化しないので式(1)が探索の対象として取り扱うことになる。また、式(3)の適応度は、式(1)の逆数と、式(2)の和で表されるものとする。

$$J_{1i} = W_1 \sum_{k=1}^{kk} g_k(V, I) + W_2 \sum_{l=1}^{ll} BC_l + W_3 \sum_{m=1}^{mm} loss_m + W_4 \sum_{n=1}^m |V_{ref} - V_n|^2 \dots (1)$$

$$J_{2i} = W_5 \sum_{p=1}^{pp} DG_p \dots (2)$$

$$f_0(I_i) = 1/J_{1i} + J_{2i} \dots (3)$$

ただし、 J_{1i} , J_{2i} : 目的関数、 $W_1 \sim W_5$: 重み係数、 kk : 考慮する負荷状態数、 $g_k(V, I)$: 電圧、電流制約逸脱量の絶対値和、 ll : バンク数、 BC_l : バンク 1 におけるバンク容量逸脱量、 mm : 区間数、 $loss_m$: 区間 m の配電損失、 V_{ref} : 電圧規定値、 V_n : ノード n の電圧、 pp : 分散型電源数、 DG_p : 分散型電源 p の出力、 $f_0(I_i)$: 適応度とする。

〈4.2〉 制約条件

- ①放射状制約
配電系統は、配電変電所を最上位ノードとする放射状構成となっていなければならない。
- ②停電制約
いずれの区間も停電してはならない。
- ③線路電流容量制約
各区間の線路に流れる電流が、その区間の送電線の定格電流を超えてはならない。

$$|PI_m| \leq PI_m^{max} \quad (4)$$

ただし、 PI_m : 区間 m の電流値、 PI_m^{max} : 区間 m の線路定格電流である。

- ④バンク容量制約
各バンクが負担する負荷の総和が、そのバンクの定格容量を超えてはならない。

$$|PB_l| \leq PB_l^{max} \quad (5)$$

ただし、 PB_l : バンク l に接続されている負荷の容量、 PB_l^{max} : バンク l の容量とする。

⑤電圧上下限値制約

各ノードの端子電圧が、定められた電圧上下限値を逸脱してはならない。

$$V_{min} \leq V_n \leq V_{max} \quad (6)$$

ただし、 V_{min} ・ V_{max} : 電圧上下限値。

5. 配電系統潮流計算

〈5.1〉 潮流計算

配電系統内各ノードの状態量を求めるための潮流計算法を次に示す。

従来、送電系統の潮流計算では、ニュートン・ラプソン法(N-R法)が用いられる。しかし、配電系統は、送電系統とは異なる放射状の構成となっており、また、送電系統と比較して線路抵抗の成分が大きいためという特徴を持つ。従って、配電系統潮流計算においては、N-R法は収束しない場合があることが指摘されている。⁽⁶⁾ そこで、本研究では配電系統の潮流計算に適し、系統の最上位ノードの状態から、末端までのノードの電力潮流や電圧の状態量を逐次的に行う DistFlow 法を用いる。この計算方法によると、N-R法と比較しても、非常に早く状態量を評価することが可能である。

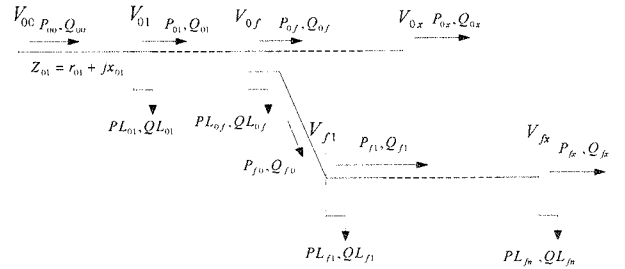


Fig.3 Radial distribution systems.

配電系統のモデルを Fig.3 に示した。系統において、DG 導入時の上流ノード n から下流ノード n+1 へのブランチ潮流方程式は、次のように表される。

$$P_{0(n+1)} = P_{0n} - r_{0(n+1)} \frac{P_{0n}^2 + Q_{0n}^2}{V_{0n}^2} - PL_{0(n+1)} + PG_{0(n+1)} \quad (7)$$

$$Q_{0(n+1)} = Q_{0n} - x_{0(n+1)} \frac{P_{0n}^2 + Q_{0n}^2}{V_{0n}^2} - QL_{0(n+1)} + QG_{0(n+1)} \quad (8)$$

$$V_{0(n+1)}^2 = V_{0n}^2 - 2(r_{0(n+1)}P_{0n} + x_{0(n+1)}Q_{0n}) + (r_{0(n+1)}^2 + x_{0(n+1)}^2) \frac{P_{0n}^2 + Q_{0n}^2}{V_{0n}^2} \quad (9)$$

ただし、 $P_{0n}(Q_{0n})$: ノード n から流れ出る有効(無効)電力潮流、 $PL_{0(n-1)}(QL_{0(n-1)})$: ノード n に接続された有効(無効)電力負荷、 $PG_{0(n-1)}(QG_{0(n-1)})$: ノード n への分散型電源導入により受ける有効(無効)電力、 $r_{0(n+1)}$: 配電線 n+1 の抵抗、 $x_{0(n-1)}$: 配電線 n+1 のインダクタンス、 $V_{0(n-1)}$: 母線 n+1 の電圧

6. 遺伝的アルゴリズム(GA)への適用

本章では、適用した遺伝的アルゴリズムのアルゴリズムについて記述する。その際、パラメータは系統内の区分開閉器の開閉と新たに導入できる DG の出力電力である。提案手法は下のような手順で実行される。

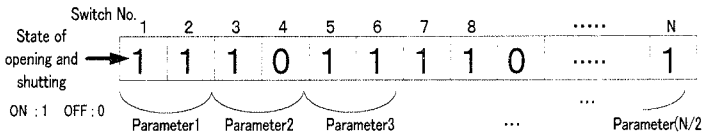


Fig. 4. Representation of an individual of switch.

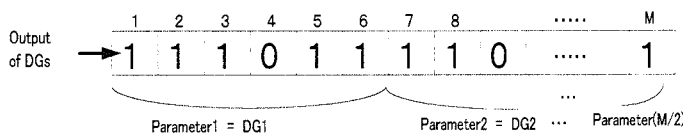


Fig. 5. Representation of an individual of DG's output.

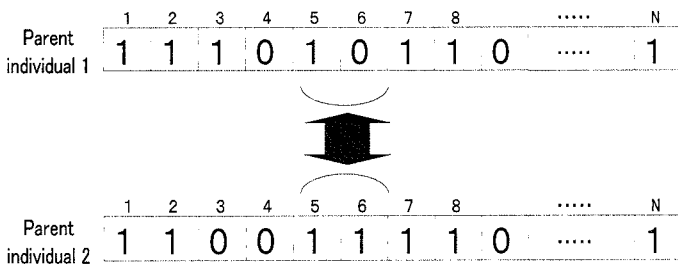


Fig. 6. An example of Crossover.

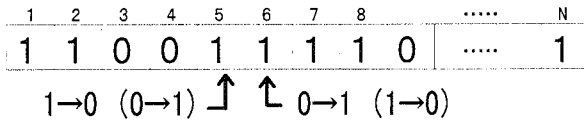


Fig. 7. An example of Mutation.

手順 1. 個体の設計 遺伝子の長さは系統内の区分開閉器数と同じものとして対応させる。但し、開閉器番号の割り当ては、可能な限り隣接する開閉器を連番とする。すなわち、ON (閉) 状態を 1, OFF (開) 状態を 0 として開閉器番号と遺伝子番号を一致させ、順に並べたものが 1 個体として表現される。このような定常運転状態を初期状態の個体として表現する。その際、制御変数となる 1 つのパラメータは 2 ビットとして表されている。(Fig.4) したがって、GA 内の区分開閉器の切換えでは、2 つを同時に変化させることになる。また、新たに導入される DG の最適な出力についてもこれを決定する必要がある。そのため、区分開閉器が切り替わると同時にその容量を変化させ、導入の可否を評価しなければならない。よって、DG の出力をパラメータとした個体が別に設けられている。(Fig.5) このときの個体にある一つのパラメータ (分散型電源の出力) は 2 進数 6 ビットで 64 段階により表現される。すなわち、Fig.8 に示すようにデータの読み込み時において区分開閉器と分散型電源の出力に対する 2 つの個体が別々に設けられることになる。

手順 2. 初期生物集団 手順 1 で構成した初期状態の個体に

対して、区分開閉器と DG の出力によるパラメータを一様乱数で選択し、この状態に対して適応度を評価し、制約条件を満足する個体を生成する。この操作は、 m_0 個の個体が生成されるまで実行することになる。ただし、個体の生成段階では、放射状となった個体のみを評価の対象とし、放射状とならない個体が生じた場合には、評価せずに再度生成し直す操作が実行されている。このような探索は、以下の交差及び突然変異についても同様に実行される。

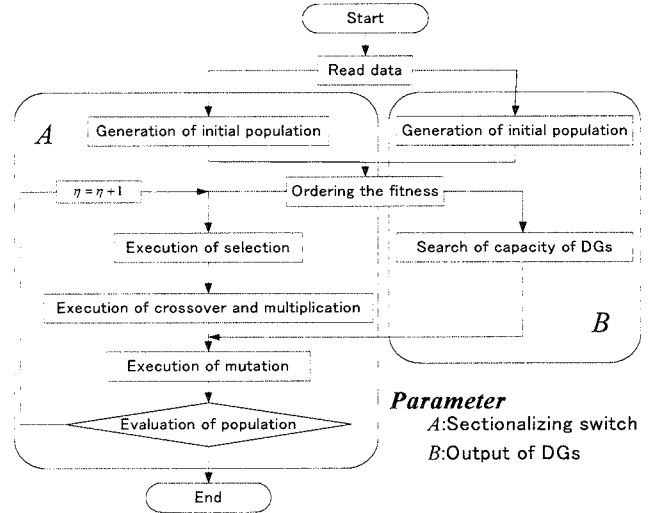


Fig.8 Flow chart of proposed method.

手順 3. 淘汰・交差 全個体の適応度を大きい順に並べる。それらの個体のうち、適応度の下位 4 割を淘汰し、上位 6 割の中からルーレット方式によって選ばれた親個体の 2 つを基に、Fig.8 の A 側で示すように区分開閉器に対しては、乱数によって選ばれたパラメータ同士を入れ替える操作を実施する。(Fig.6) 一方、B 側の分散型電源の出力探索は、1 回の区分開閉器による分散型電源導入可能容量の変化は微小なものと判断し、ここでは乱数による大域的な探索ではなく、近傍探索によって分散型電源の導入可能な出力を導出する。これらによって決定した個体を評価し、淘汰した個体 4 割を新たに生成することになる。

手順 4. 突然変異 GA にある突然変異率 (本問題ではこれを 50%とする。) に基づいて個体を決定し、この個体にある 1 ビットに対して、乱数による遺伝子番号が選択される。そして、個体として採用するかどうか判定される。しかしながら、交差による区分開閉器の探索ではパラメータ間 (例えば Fig.7 の開閉器 4,5 区間) の切換えが実行されないこととなる。さらに、突然変異だけではその部分の切換え選択確率が低いものとする。そのため、提案手法にある突然変異ではこの点について改良を加えている。すなわち、突然変異には、Fig.7 に示すように選ばれた点 S_i 及びそれに隣接する区分開閉器 S_{i+1} を同時に変化させる手法が適用されている。これにより各世代における区分開閉器の変化が交差部分だけでなく突然変異によっても効果的に実現できるような改善が図られている。

手順 5. 終了判定

全ての分散型電源が、最大出力を全て導入可能となった世代 η で探索を終了する。但し、200 世代探索を行ない、いずれかの分散型電源が最大出力を導入することができた場合、その時の出力を導入可能容量として得る。

7. シミュレーション条件

提案手法の計算は、C言語により実行し、DGの導入可能容量を算出する。この手法を適用した配電システムモデルは、Fig.9に示している。4配変バンク、132ノード、総負荷14.86[MW]、136区間開放ループ型を構成するシステムモデルである。初期状態時には、×印で示される区間の区分閉器が開放されており、フィードごとに放射状が構成されることになる。また、電圧上下限界は規定値の±300[V](±0.045[p.u])、各線路電流容量は450[A]、各バンク容量は5[MVA]とする。そして、このシステムには予め初期状態において図の黒矢印で示すノードに対してDGが導入されているものとする。そのときの各DGにおける出力はTable.1に示している。更に、新たに図の青矢印で示すノード16(DG1)及び30(DG2)にもそれぞれ最大出力1000[kW]のDGが設置されることを想定する。このとき、それぞれに最大出力が導入されると、Fig.10(a),(b)の■印で示すように、電圧上限値を逸脱するノードが生じるようになる。提案手法はこれらの改善を図り、DGの導入可能容量の算出と区分閉器の切替えにより、より多くのDGの容量を受け入れが可能となるシステム構成を決定する。

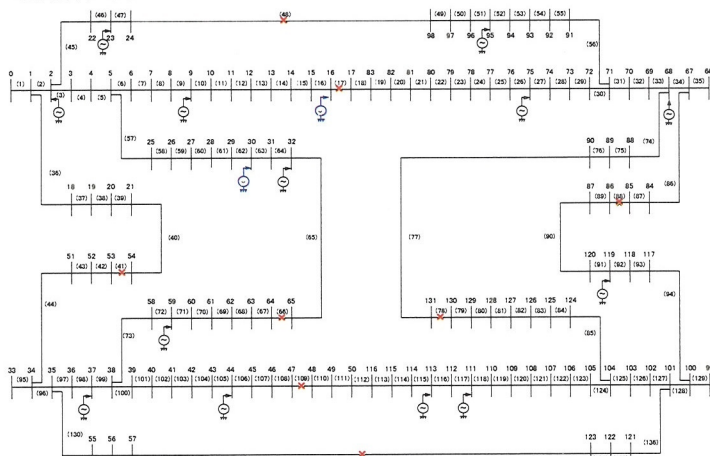


Fig.9 Model system

Table.1 Output of each DG

Node No.	Output[kW]	Node No.	Output[kW]
2	800	68	1000
9	800	75	1000
23	400	95	800
32	1000	111	500
37	1000	113	1000
44	1000	119	1200
59	1000	127	1000

8. 結果

最初に、Fig.10(a),(b)の■印の結果に対して電圧上限値を逸脱しないようにDGが導入できる最大可能容量は、Fig.8のA側(区分閉器)の切り替えを行わないことで、ノード16、ノード30において各々492[kW]、809[kW]として算出することができる。すなわち、初期状態にはこの値がシステム内に導入できる最大の容量となる。(Fig.10 ▲)これに対して提案手法により区分閉器の切替えとDGが導入できる容量の算出を実施して、一様乱数初期値1~10までの結果をTable.2に示す。適応度は、式(3)にある第1項(Fitness1)と第2項(Fitness2)に分け、記載し

Table.2 Result of simulation

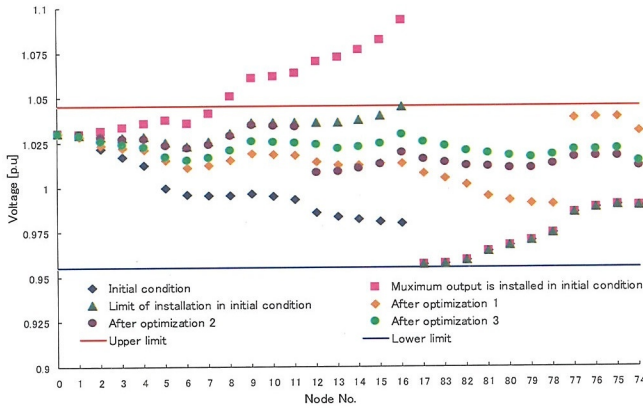
Initial value	Fitness1	Fitness2	Loss[MW]	Generation
1	0.186894	2000	0.628323	121
2	0.189797	2000	0.630402	122
3	0.179862	2000	0.631785	153
4	0.166713	2000	0.609595	114
5	0.183395	2000	0.595777	115
6	0.167306	2000	0.616724	113
7	0.143409	2000	0.623619	135
8	0.139397	2000	0.623212	108
9	0.161191	2000	0.642529	109
10	0.196595	2000	0.643085	112

ている。結果として、全ての初期値に対して各DGの最大出力が導入可能であることがわかる。

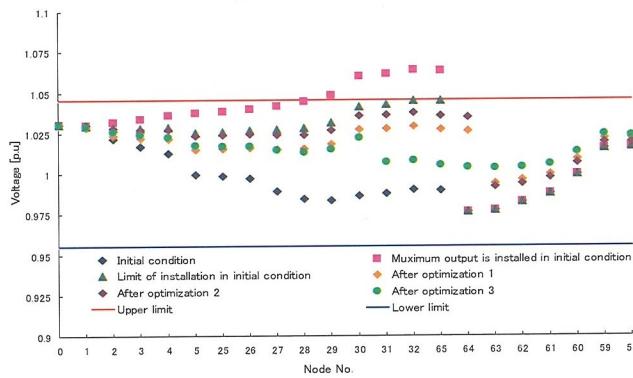
また、計算結果では様々な区分閉器の切替え状態を得たので、3パターンの系統図Fig.11及び電圧Fig.10(●◆●)について検討する。Fig.11(a)では、初期運転状態から緑矢印で示されるように×印が変更され、主フィード(ノード0→66)及び分岐フィード(ノード5→25,26・・・)でDGの導入地点以下の負荷を増加させる切替えが行われている。その結果、導入できるDGにこれまでより多くの容量が可能になったものとする。Fig.11(b)では、分岐フィードが末端側の負荷をやや増加させるに程度であるが、主フィードでは、導入できるDGを他のフィードに移行することになる。これにより、分岐フィードの逆潮流が主フィードに流入するが、末端側の負荷を負担する余裕があるため、ノード30により多くの出力容量を導入できたものとする。Fig.11(c)では、導入できるDGと既存のDGを他フィードへ移行する切替えが行われている。分岐フィードでは末端側にこれら2つのDGが配置されているが、同時に他フィードへの移行により、移動したフィード内において電圧逸脱を生じる可能性があり、既存DGのみの移行となっている。また、配変バンクノード99に接続されているシステムの区分閉器も、良好な評価関数値を算出するために変化されることになる。

さらに、区分閉器の切替えによりこのシステムに対して最大どの程度まで導入が可能であるかについてもFig.8のB側で扱う個体にて算出を行い検証している。その結果によると、ノード16には1587[kW]、ノード30には2000[kW]の導入が可能であることが明らかとなった。なお、そのときの区分閉器開放区間は(26),(44),(50),(71),(78),(86),(112),(133)である。主フィード、分岐フィード共に末端側負荷を増加させる切替えが行われ、区分閉器が他方のフィードに導入されている既存のDGに接近することになる。また、これ以外のフィードにおいても、同一配変に接続される負荷の増加を限界まで図られているものとする。これ以上の切替えは、他フィードからのDG移行により、逆潮流が増し逆効果を生じることになる。したがって、この状態が本システムのDG最大導入可能容量である。

以上のように、本来、電圧管理の制御には使用されていない区分閉器を逆潮流現象に適用し、電圧制御機器による調整前にこれを動作することは、その抑制効果とDGの導入可能容量の増大が図れることを立証した。このことから、DGを導入する際には、そのDGの設置箇所及び出力に応じた区分閉器の切替えを実行し、できるだけ電圧制御機器の投入量を軽減するコスト削減効果が期待できる。なお、本研究で使用した計算機はSycom(CPU: intel pentium IV 3.8[GHz])であり、DGの導入可能容量を算出するまでの計算時間は、6分程度となる。



(a) Main feeder



(b) Branch feeder

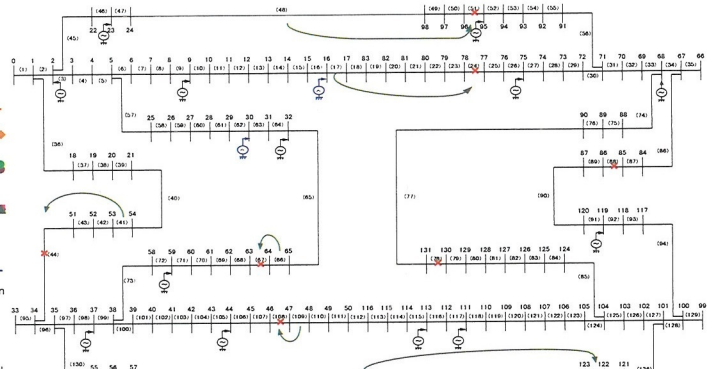
Fig.10 Voltage of each case

9. まとめ

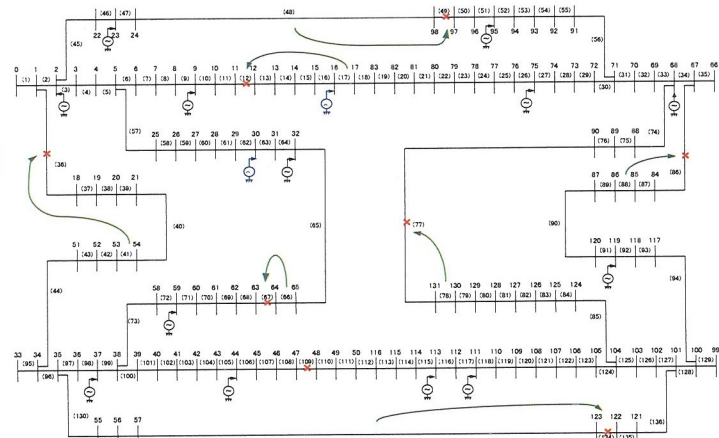
提案手法では、GA を用いて任意のノードに導入される DG の最大の出力を算出した。また、区分開閉器の切換えにより、DG の導入可能容量の増大効果が確認された。今回は、区分開閉器の効果のみを検証するために、他の電圧制御機器はパラメータから除外したが、今後は、それらのパラメータを加え、それぞれの最適な設置箇所や制値を同時に検討するアルゴリズムを開発していく予定である。そして、日負荷変動を考慮し、それら機器の協調的な操作手順を決定し、系統の運用計画を行うことが必要である。但し、区分開閉器に関しては、機器の性質や耐久性などを考慮すれば、頻りに用いることはできないため、日負荷変動等に対する瞬時の電圧制御ではなく、DG や負荷の新規導入などの電力潮流の大きな変化が生じる場合にのみ切換えることが好ましいと考えられる。

参考文献

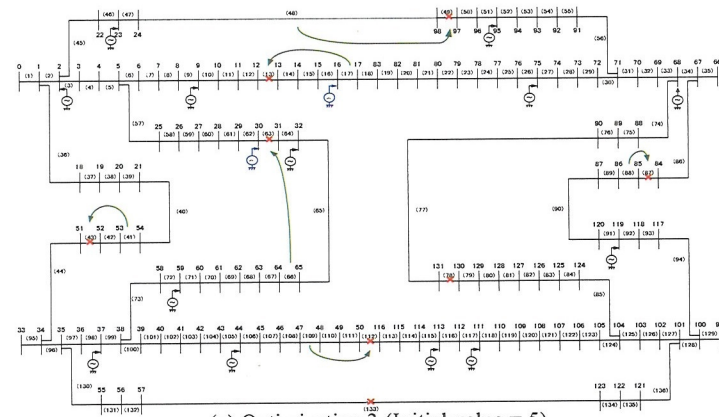
- (1)M.E.Baran, F.F.Wu: “Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol4, No2, pp.1401-1407 (1989-4)
- (2)H. Takano, Y. Hayashi, and J. Matsuki: “Determination Method for Loss minimum Distribution System Configuration Considering Disconnection of Installed Dispersed Generators”, T. IEE Japan, Vol.122-B, No.12, pp.1376-1383 (2002-12) (in Japanese)
- (3)Y. Mishima, K. Nara, T. Satoh, T. Ito, and H. Kaneda: “Method for Loss Minimum Re-configuration Problem of Distribution



(a) Optimization 1 (Initial value = 10)



(b) Optimization 2 (Initial value = 2)



(c) Optimization 3 (Initial value = 5)

Fig.11 Appearance of changing

System by Tabu Search”, T. IEE Japan, Vol.123-B, No.10, pp.1149-1155 (2003-10) (in Japanese)

- (4)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)
- (5)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)
- (6)W.Ohyoshi, H.Mori: “A New Power Flow Method in Radial Distribution systems” IEE Japan, Vol.126-B, No.3, pp290-296 (2006-3)