

複数負荷を考慮した SVR 最適配置

林田広和^{*1}, 大貫悟志^{*1}, 岩崎敬亮^{*1}, 青木秀憲^{*2}

Optimal Placement of SVR Considering Plural Load

by

Hirokazu Hayashida, Satoshi Ohnuki, Keisuke Iwasaki, Hidenori Aoki

(Received on Sep. 29, 2007 and accepted on Dec. 25, 2007)

Abstract

This paper presents a new approach to optimal placement of a step voltage regulator (SVR) considering the installation of distributed generators (DG) based on a genetic algorithm (GA). In this case, it is necessary to solve problems such as the upper and lower limits of voltage at each node and line capacity. In addition, considering that the load and output of DG changes, it is important to solve more than one of these problems. In order to solve these problems, the conventional GA was improved and the proposed method was applied to a complex operative condition of the distribution power system.

Keywords: Multiple Load, Optimal placement, SVR, Genetic algorithm, Distributed generation,

1. はじめに

近年、地球環境保全の観点から、再生可能な自然エネルギーを用いた太陽光発電や風力発電などに関心が高まり、それらを用いた分散型電源(Distributed Generator : DG)の普及が進められている。DG は、比較的小規模な電源として位置づけられており、電力システムの末端に位置する配電システムへ連系されることが一般的である。配電システムでは配電用変電所から送り出される電力は需要家まで一方向への潮流として想定されている。しかし、これに DG が過剰に連系された場合、末端側で消費しきれなかった電力の余剰分が、新たな逆方向潮流(逆潮流現象)を生み出す原因となる。この現象は、系統内電圧を上昇させ、電力品質の1つとして法規で定められる電圧規定値を逸脱してしまうことが懸念されている。そのため、系統電圧の維持・管理を行うことは、これまで以上に必要となっている。このように電力需要の増大、系統の複雑化が進む今日の社会において電力の安定供給とその品質管理は、運用上、最も重要な課題として位置づけられている⁽¹⁾。

これまで逆潮流問題に対しては、任意の負荷を想定し、電圧制御機器を用いた報告が多くなされている⁽²⁾⁻⁽⁶⁾。著者らも逆潮流問題に対して、高圧配電線の途中にも設置可能であるという自由度を有する制御機器のステップ式自動電圧調整器(Step Voltage Regulator : SVR)を用いた報告を行ってきた⁽⁷⁾。その際、任意の負荷状態(静止状態)を1つ想定し、その条件に対して SVR の最適配置箇所およびタップ整定値の決定という組み合わせ最適化問題を解くため、遺

伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm : GA)を適用し報告を行ってきた⁽⁸⁾。しかし、自然エネルギーを用いた DG 出力および、需要家側で消費される負荷は1日を通して変動している。そのため、DG の出力変動や負荷・力率変動等も考慮した計画的な最適制御をする必要がある。すなわち、従来の手法は、任意の時間に対する負荷状態において最適化を可能とするが、負荷状態が変動する電力システムでは、SVR の設置箇所および台数を変更しなければ健全なシステムを維持することが困難になるものとする。

本研究では従来の手法を改良し、時間断面毎の負荷変動や DG の出力変動等を考慮した検討を実施する。これにより1つの時間断面における SVR の最適配置ではなく、1日を通して生じる複数の負荷状態に対して、共通した SVR の最適配置位置を決定するアルゴリズムを提案する。本論文では、その成果を報告する。

2. 問題の定式化

〈2・1〉 系統モデルの構成

本研究では取り扱うモデルシステムを次のように仮定する。

- (1) 各ノードの負荷は定電力で既知である。
- (2) DG の設置箇所および出力は既知である。
- (3) DG は定電力源として扱い、力率は1.0とする。
- (4) 各区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。
- (5) SVR は全ての区間に配置可能である。

〈2・2〉 評価関数と適応度

本研究における SVR の最適配置問題に関しては、以下に示す式(1)のような評価関数を用いる。第1項は電圧安定性

* 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

維持、第 2 項は各ノードにおける電圧及び電流逸脱の回避を目的とした式である。適応度 $f_0(I_i)$ は、式(2)示すように評価関数 J_i の逆数とする。すなわち、電圧基準値からの偏差が小さいほど、良好な系統運用状態であることを意味する。なお、配電損失については SVR の設置だけでは改善効果は期待できない。そのため、本研究では評価関数に配電損失を考慮していない。

$$J_i = \sum_{t=1}^q \left(W_1 \sum_{j=1}^n (V_{jt} - V_{ref})^2 + W_2 \sum_{k=1}^{mm} g_{kt}(V, I) \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$f_0(I_i) = 1/J_i \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 q : 考慮する時間断面数、 W_1, W_2 : 重み係数、 n : ノード数、 V_{jt} : ノード j 、時間断面 t における電圧、 V_{ref} : 電圧基準値、 mm : 考慮する負荷状態数、 $g_{kt}(V, I)$: 地点 k 、時間断面 t における電圧・電流制約逸脱量の絶対値。

〈2・3〉 制約条件

SVR が設置されたフィーダでは、電圧プロフィールの変化に伴い、線路潮流も大きく変化する。そこで、系統運用にあたり次のように制約条件を設定する。

① 電圧上下限制約

$$V_{min} \leq V_{nt} \leq V_{max} \dots\dots\dots (3)$$

② 線路電流上限制約

$$|I_m| \leq I_m^{max} \dots\dots\dots (4)$$

③ SVR タップ上下限制約

$$T_{min} \leq T_j \leq T_{max} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 V_{nt} : ノード n 、時間 t における電圧、 $V_{max} \cdot V_{min}$: 電圧上下限值、 I_m : 区間 m の電流値、 I_m^{max} : 区間 m の線路電流定格、 $T_{min} \cdot T_{max}$: SVR タップ上下限位置、 T_j : j 個目の SVR タップ位置

〈2・4〉 SVR のモデル化

SVR は、配電線の電圧変動に対し、昇降圧信号をタップ切替器に送り、変圧器のタップを切り替えることにより電圧調節を行うが、タップ切り替え頻度を抑制するために数十秒～数分の動作時限をもっている。このため、緩やかな日負荷的な変動に対して用いられている。SVR の概略図を図 1 に示す。また、本研究では設置される SVR を次のようにモデル化する。すなわち、タップ付きの理想変圧器として取り扱う。SVR の変圧比および二次側電圧は次のように表される。

$$\alpha_i = 0.95 + S\beta \dots\dots\dots (6)$$

$$V_{(n+1)t} = \alpha_i V_{nt} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 α_i : SVR _{i} の変圧比、 S : 変圧比のきざみ幅、 β : タップ位置、 $V_{nt}, V_{(n+1)t}$: 1 次、2 次側の電圧。

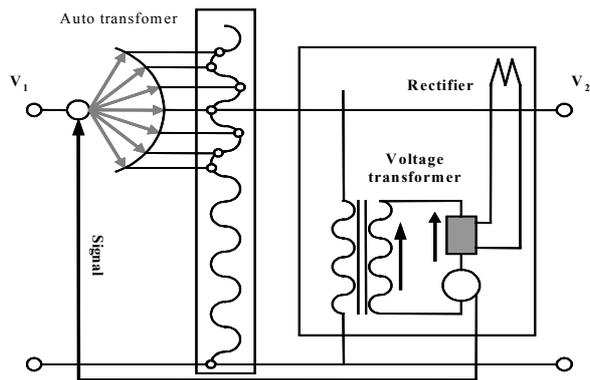


図.1 SVR の構造

Fig.1 Structure of SVR

本研究で用いる SVR はタップが 9 つありそのきざみ幅は、1.25% であるものとする。タップ位置とタップ比の関係を表 1 に示す。

表 1 タップ位置とタップ比の関係
Table 1. Tap position and tap rate.

Tap position	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Tap rate	95	96.25	97.5	98.75	100	101.25	102.5	103.75	105

3. 最適配置アルゴリズム

配電系統の運用状態は設置される電圧制御機器や、その整定値によって決定される。しかしながら、今日の電力自由化による DG の連系や、電力需要の増大による負荷変動など、電力潮流は複雑に変化し、それに伴い電圧も時々刻々と変動することになる。これに対処するために、SVR を配置し、同時に対処可能な整定値を決定しなければならないが、配置箇所及び整定値を同時に変数として取り扱う場合には、計算時間が増大し膨大な組み合わせ最適化問題となる。本研究で取り扱う組み合わせ数は 10^6 通りとなる。そのため、この解法には最近注目されているメタヒューリスティクス手法を適用する。この手法は工学的観点からの最適化手法であり、工学のさまざまな分野において現れる大規模な最適化問題を実用的な計算時間で解くための手法である。その際、本稿ではより効率的に最適解に近い解を早期に得るため、GA に近傍探索を加えたアルゴリズムを提案している。以下にその詳細を記述する。

まず、任意の時間断面に対して GA を適用する場合の、SVR の配置箇所、タップ整定値の変数のコーディングを行う。コーディングの様子を図 2 示す。

設置箇所に関しては遺伝子座番号と、モデル系統の区間番号を対応させ、SVR を設置している場合は 1、設置していない場合を 0 として表現する。また、それぞれの区間にはタップ整定値を表す遺伝子も同時に設ける。これらの遺伝子を一列に並べたものを 1 つの個体とすることで、SVR の設置箇所及びタップ整定値を表現する⁽⁴⁾。

しかしながら、この遺伝子の列は任意の負荷状態としての SVR の最適な配置位置とそのタップ整定値を決定することが出来るが、図 6 の負荷曲線に示すように、SVR の最適な配置位置とタップ整定値は負荷状態ごとに最適制御を行う必要がある。本稿では負荷曲線にある任意の時間の複数の負荷状態を考慮するために、図 3 のようなコーディングを行っている。

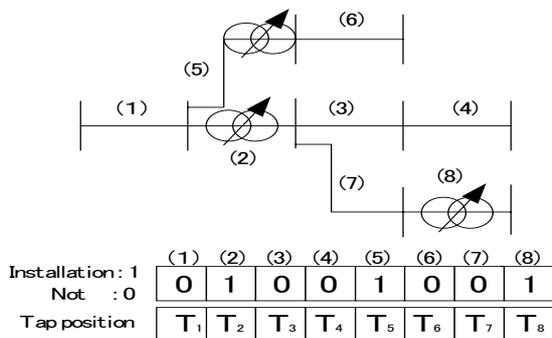


図 2 コーディングの例
Fig.2 A example of coding

SVR の設置箇所に関しては、これまでと同様に 1,0 で設置の有無を表現するが、タップ整定値はそれぞれの時間断面毎に異なる整定値を求めるために、設置箇所とは別に、時間断面毎に各 SVR のタップ整定値を決定する。すなわち、設置箇所に関する遺伝子と、時間断面毎に SVR のタップ整定値に関する遺伝子を持つ 1 つの個体を構成することになる。

複数の負荷状態を考慮するために、上記に示した遺伝子をもつ個体に対して本研究で実施したフローチャートを図 4 に示し、本研究のアルゴリズムの詳細な内容を以下に記述する。

[1] 初期生物集団の生成

初期生物集団の生成では、まずランダムに決定したタップ整定値を持つ SVR に着目し、この SVR をすべての箇所に設置し、最も効果的な設置箇所を探索する。ここで、最も効果的な設置箇所の探索方法として時間毎における系統内の電圧規定値逸脱箇所を探索し、最も逸脱箇所の総数が少ない設置箇所を最も効果的な設置箇所として決定する。また、SVR が設置されても系統内に制約逸脱箇所が存在する場合には、2 台目の SVR 設置箇所を決定するために、

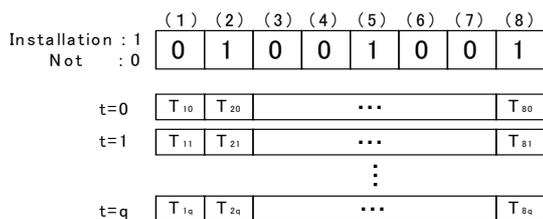


図 3 個体の表現
Fig.3 Represent of individual

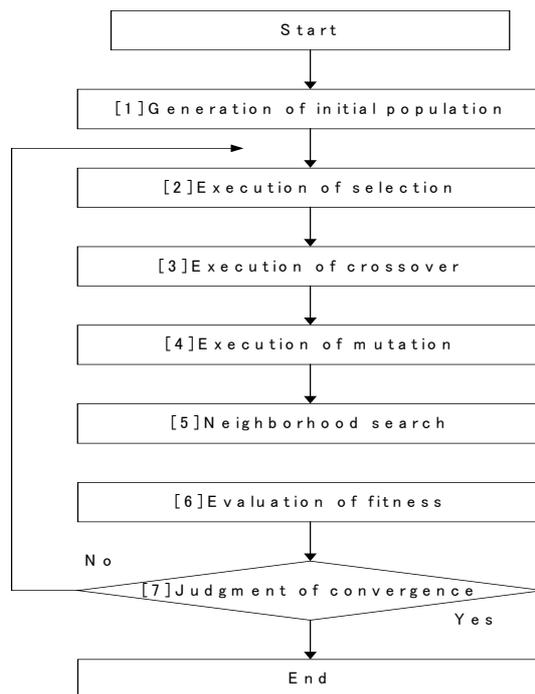


図 4 GA のフローチャート
Fig.4 Flow chart by genetic algorithm

1 台目の SVR 探索と同様な操作を実施し、これを決定する。このような探索が制約逸脱を解消するまで 1 個体に対して繰り返されることになる。他の生成する個体についても同様な探索を実行し、初期生物集団を構成することになる。

[2] 淘汰

初期生物集団あるいは世代ごとに生成された個体を SVR の台数が少ない順番に並び替えを行う。この操作は設置コスト削減を図ったものである。さらに、台数順に並び替えを行ったものを、適応度の高いものの並び替えを実行する。そして、生物集団の下位 4 割を淘汰する。

[3] 交叉

本研究における交叉では、親個体の選択を行う際に、評価関数で示された電圧の整定性維持を満足し、且つ設置コスト(SVR 設置台数)削減を図っている。そのため親個体の選択には、トーナメント方式を採用している。この二つの変数を同時に満足するためトーナメントの評価基準は次のように定めている。トーナメントサイズを 2 とし、ランダムに選ばれた親個体 ij は、次の条件を満足する時、親個体 i は親個体 j より優れていると定義する。

- ・親個体 i の SVR 設置台数が、親個体 j の SVR 設置台数よりも少ない場合。
- ・親個体 i と親個体 j の SVR 設置台数が等しく、親個体 i の適応度が親個体 j の適応度より優れている場合。

このようにしてトーナメント戦略によって選ばれた親個体同士に対して 2 点交叉を採用し、子個体を作成する。まず設置箇所については、時間帯による変化は含まれていな

いので、交叉は一樣乱数により決定した遺伝子の長さに対して実施する。次にタップ整定値の変更については、時間断面毎に負荷状態や DG 出力によって電力潮流が変化することになる。そのため、同一の時間断面毎にあるタップ整定値に対して設置箇所と同様な交叉を行っている。

[4] 突然変異

本研究による突然変異は、エリート戦略を採用している。そして、一般的な GA で用いられる確率(1/遺伝子長)に基づいて遺伝子を変化させている。

[5] 近傍解の探索

本研究における近傍探索は、SVR 設置箇所の隣接する設置可能箇所、そしてタップ整定値については上下のタップ整定値を近傍解と定義し探索する。この動作は、GA のアルゴリズムによって生成された個体中において同一個体が存在する場合にこのような近傍解操作を実行する。近傍探索中で最も高い適応度を持った個体とこれまでにある同一の個体の入れ替えを実施する。また、同一個体とその生物集団内に複数個存在する場合には、近傍解内で適応度の高い順に、順次個体を入れ替える操作が実施される。

したがって、本手法による近傍解の探索は、近傍の良質な解を取りいれると同時に、同一個体の削減が実現できるため、生物集団内の解の多様性を維持することができ、解の精度の向上が期待できる手法となっている。

4. シミュレーション

(4.1) シミュレーション条件

本研究では図5に示す32母線放射状配電システムモデルを用いてシミュレーションを実施する。図5内の各フィードにある地域を $f1 \sim f4$ にて分類し、枠で囲まれたそれぞれの地区を住宅地区 ($f2, f3$)、商業地区 ($f4$)、工業地区 ($f1$) として各々の運用状態を設定している。また、図6, 7は各地区の消費電力及び力率の時間毎の変動を示したものである。図6の負荷曲線は、地区ごとに15時を1.0として⁽⁸⁾⁽⁹⁾、それに対する各負荷の変動の割合を示したものである。また、図7の力率は、住宅地区では1日を通して遅れ力率、商業地区では9:00~22:00が遅れ力率、それ以外は力率改善用コンデンサの影響などによる進み力率、工業地区では9:00~19:00が遅れ力率、それ以外の時間帯を進み力率として設定している。そして、図8は配電システムに連系された太陽光発電の出力変動を示したものである。図9は先に述べた力率・負荷変動及び太陽光発電の出力変動を考慮した時の各フィードにおける末端の電圧値を、一日を通して表したものである。負荷状態によってそれぞれの地域で異なる電圧特性を示していることがわかる。そのため、これらの時間帯の中で最も厳しいと思われる3ヶ所について検討を実施する。まず、第1箇所目は2時の時点を選択する。この場合、進み力率によるフェランチ現象に加え、DGによる逆潮流が電圧上昇の原因となり、 $f1$ 地域では電圧上限値を逸脱している。第2箇所目は12時の時点を選択する。太陽光発電の出力増加に伴う大きな逆潮流による $f3$ 地域の電圧上限値逸

脱と、重負荷による $f4$ 地域の電圧下限値逸脱が同時に生じている負荷状態である。第3箇所目は20時の時点を選択する。住宅地区の消費電力の上昇に伴い、 $f3$ 地域と他の地域においても同時に電圧制約逸脱が生じている負荷状態である。これらの厳しい状態が予想される複数の負荷状態に

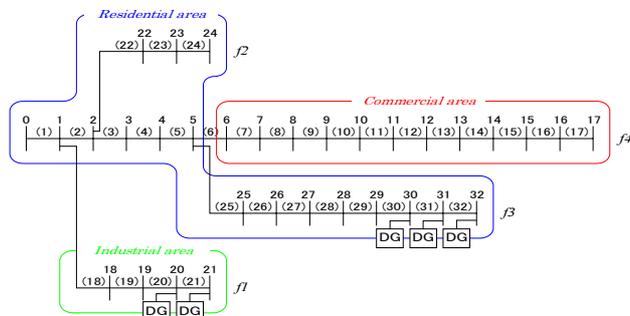


図 5 32 母線放射状配電システムモデル図

Fig.5 32 node distribution system model

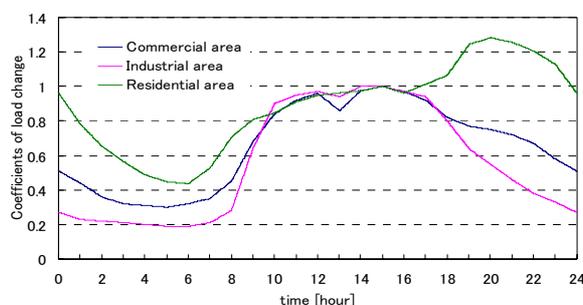


図 6 負荷曲線

Fig.6 Load curve at each area

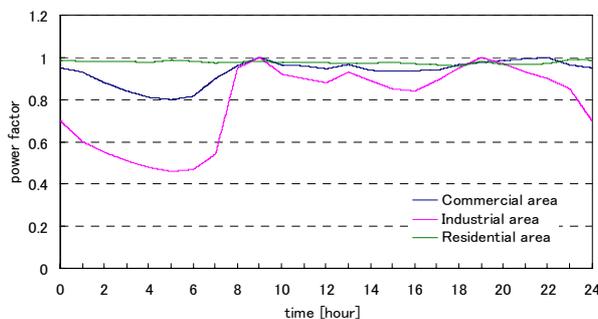


図 7 力率曲線

Fig.7 Power factor curve at each area

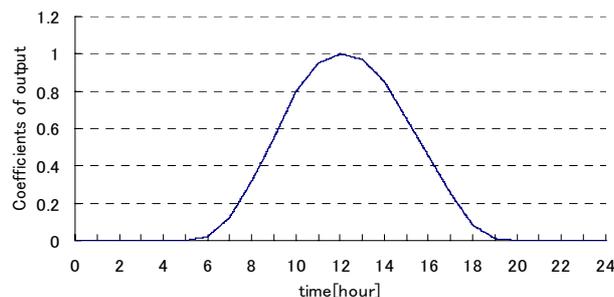


図 8 太陽光発電の出力変動

Fig.8 Change output of PV

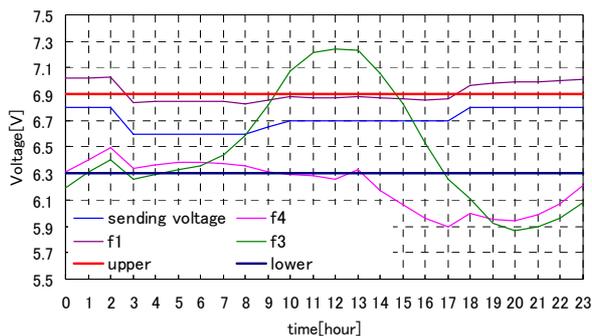


図 9 DG 導入時の電圧プロフィール
Fig.9 Voltage profile by initial of condition

表 2 最適配置結果

Table.2 Result of optimal placement

placement	tap rate at each time		
	2	12	20
(4)	1.0000	0.9875	1.0500
(8)	1.0125	1.0500	1.0375
(18)	0.9500	0.9625	0.9500
(27)	1.0250	0.9500	1.0500

対して、提案する手法を適用し、最適化を試みている。また、式(1)の重み係数 $W_1=1, W_2=10000$ とした。

その他 GA の設定パラメータは、個体数 40, 交差率 1.0, 突然変異率 1.0/遺伝子長, 終了世代数 200 として設定し、一様乱数初期値 1.0~100.0 までの 100 パターンを試行する。

〈4.2〉 シミュレーション結果

図 9 は複数の負荷状態に対して提案手法により得られた SVR の最適配置箇所である。また、表 2 はそのとき得られた時間断面毎に対するタップ比である。区間(18)に設置された SVR により、 $f1$ の昼夜における逆潮流現象と、夜間の

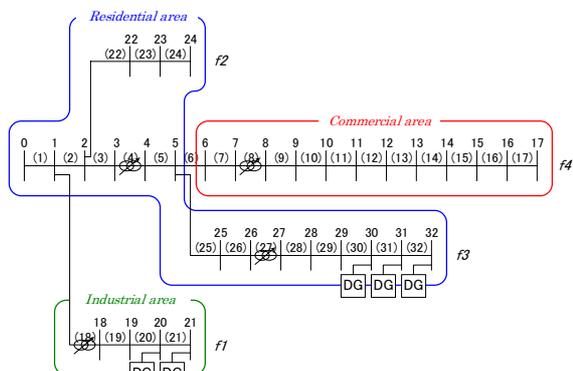


図 9 最適配置箇所
Fig.9 Optimal placement of SVR

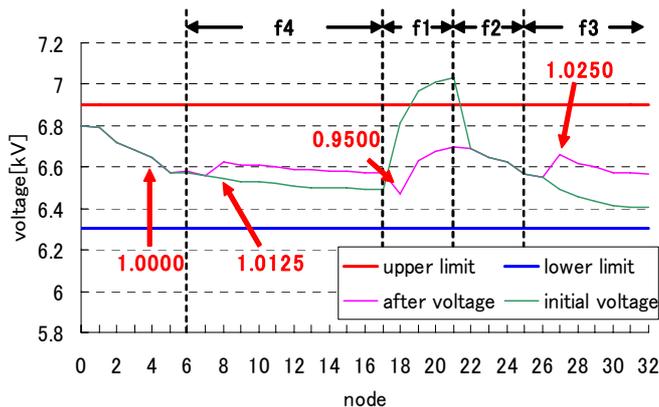


図 10 2時における電圧波形
Fig.10 voltage profile at 2:00

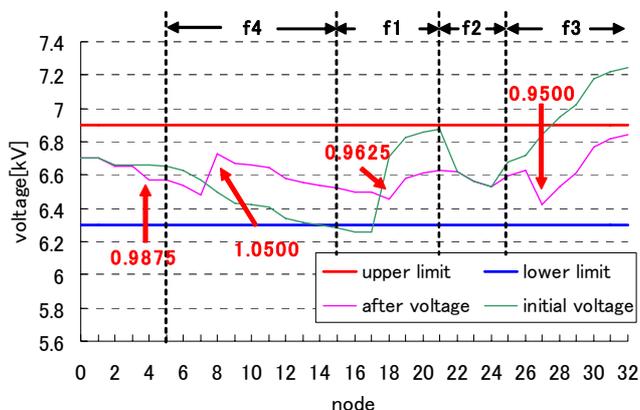


図 11 12時における電圧波形
Fig.11 voltage profile at 12:00

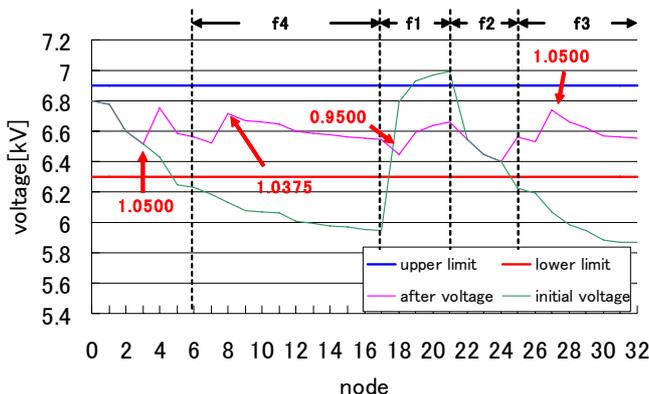


図 12 20時における電圧波形
Fig.12 voltage profile at 20:00

フェランチ現象による電圧上昇が抑制され、何れの負荷断面に対しても降圧のタップ比となっていることがわかる。一方、 $f3, f4$ 地域では、12時の時点で $f3$ が上限値を、 $f4$ が下限値を逸脱しているため、これらのフィーダに関しては、SVR が複数台設置する必要がある。さらに、20時の時点では、 $f3, f4$ のフィーダがいずれも大きく下限を逸脱してしまう状態が発生している。特に $f3$ では、

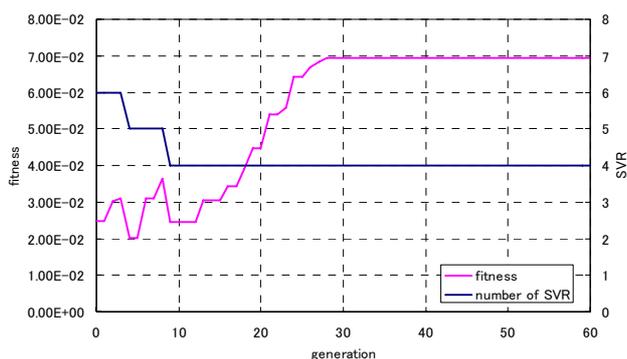


図 13 適応度の推移

Fig.13 Fitness and the number of SVR each generation

電圧の最小値が 5.88[kv]程度となり、これを 1 台の SVR で制約範囲内に抑えることは不可能となり、この対応に対しても複数台の SVR が必要となることがわかる。このような状況下に対して適用した本手法による結果は、図 9 と表 2 に示すように、これらの時間断面毎に必要な SVR の設置台数 4 台と、適切なタップ整定値を決定することになる。

まず、本手法によって、SVR が選択された位置について検討する。区間(4)にある SVR は 1 日を通して電圧の変動の激しい f3,f4 の電圧補償を補助するため、それぞれ共通のフィーダ上位に配置されることになる。次に f3,f4 に設置される他の SVR は、時間断面毎に、そのフィーダに対する電圧整定性を維持できるような制御が実行されることになる。また、区間(4)に配置された SVR は、f1,f2 に設置された SVR よって補償しきれない逸脱量の補償を可能としている。すなわち、提案した本手法は、可能な限り少ない SVR の配置台数で、妥当な配置箇所を決定することができる手法となっていることがわかる。それぞれの負荷状態における SVR の設置効果は図 10~12 に示している。いずれも配置後に各母線電圧が規定値内に抑えられていることがわかる。

図 13 は、提案手法によって得られた各世代における適応度と SVR 配置台数の推移を示したものである。適応度は SVR 台数が削減されるごとに改悪するが、本手法により台数にあった整定値を探索しているため、次第に向上していることがわかる。また、SVR 台数削減効果は、本手法にあるトーナメント戦略及び、淘汰により効果的に図られていることがわかる。これにより、評価関数に対して配置箇所、あるいはタップ整定値を適切に変更していることが確認できる。したがって、本手法は SVR 配置手法として妥当なものとする。

5. まとめ

本研究は、DG を配電系統に連系した場合の DG の出力変動や、負荷・力率変動等を考慮した SVR 最適配置手法を提案した。結果として複数の負荷状態に対して、共通した

SVR の最適配置位置を決定することができた。しかしながら、アルゴリズムに近傍解の探索を導入したことにより、解候補は多数存在しているが制約を満足しうる解は非常に少ないことがわかった。さらに、制約を満足すべき解候補は、任意の箇所に集中する傾向がある。このことから、今後はより多くの負荷状態を検討し、本手法の効果を確認する予定である。また、本稿では検討しなかった送り出し電圧やタップの制御回数についても考慮し、機器の耐久性の面からコスト削減を図り、配置制御機器のスケジューリングや運用計画を効果的に行うアルゴリズムの構築を行っていく予定である。

文 献

- (1) 山口 浩, 近藤 潤次, 安芸 裕久, 村田 晃伸, 石井 格: “分散型電源大量導入時の計電力変動に関する考察”, 電気学会電力技術研究会資料, Vol. PE-04-90 pp.27-32
 - (2) 杉本 淳司郎: “配電系統における SVR および SVC の協調配置手法”, 電気学会電力技術研究会資料, Vol. PE-05-57, No.52-66 pp.31-36(2005)
 - (3) 余利野直人, 三木崇裕, 造賀芳文, 佐々木博司: “分散電源の連系を考慮した配電系統における電圧制御に関する研究”, 電気学会電力技術研究会資料, Vol. PE-03-154, No.154-171,173-178 pp.1-5 (2003)
 - (4) 清水 慶一, 元治 崇, 宮里 健司(関西電力), 中沢 親志, 中西 要祐(富士電機): “配電系統における分散型電源, SVC と SVR の相互干渉に関する考察” 電気学会電力技術研究会資料, Vol. PE-03-147, pp.49-54
 - (5) 森 啓之, 五島 雄一郎: “並列タップサーチを用いた FACTS 最適配置の高速化”, 電気学会電力系統技術研究会資料, Vol. PSE-01 No.1-6 Page.19-24 (2001.01.18)
 - (6) 窪田 善之, 元治 崇(関西電力): “SVR 設置系統における電力密度モデルによる分散型電源の連系可能容量の検討” 電気学会電力技術研究会資料, Vol. PE-05-100 pp.61-69
 - (7) 長谷川巧, 青木秀憲, 水谷芳史: “遺伝的アルゴリズムによる SVR の最適配置”, 東海大学紀要. 電子情報学部, Vol.5, No.2(20060331), pp.39-43 (2006)
 - (8) 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)
 - (9) M.E.Baran & F.F.Wu: “Optimal capacitor placement on radial distribution systems”, IEEE Trans. Power Delivery, 14, No1, 725(1989-1)
 - (10) 周迪威, 安田恵一郎, 横山隆一: “遺伝的アルゴリズムに基づく分散型電源の最適配置” 電気学会電力技術研究会資料, Vol.1996, NO.60(19960910) pp.31-40
 - (11) J.Sugimoto, R.Yokoyama, and Y.Fukuyama: “Optimal Placement of Step Voltage Regulator Based on Reactive Tabu Search with Distributed Generator”, The Papers of Technical Meeting on PSE, IEE Japan, PSE-04-5, pp.25-30(2004)
- 杉本淳司郎・横山隆一・福山良和: 「分散型電源を考慮した利アクティブタップ探索手法による SVR 最適配置」 電気学会系統技術研資, PSE-04-5, pp.25-30