

# LRT と SVR の協制御による最適配置問題

江井 翔吾<sup>\*1</sup> 青木 秀憲<sup>\*2</sup>

## Optimal Placement Problem by Cooperative Control of SVR and LRT

by

Syogo EI<sup>\*1</sup> and Hidenori AOKI<sup>\*2</sup>

(Received on Sep. 30, 2016 and accepted on Jan. 12, 2017)

### Abstract

This paper presents an adaptation of a meta-heuristic method (MH) to a genetic algorithm (GA) and the Tabu search technique (TS) for optimizing the method as a problem solving technique. In this study, a daily load curve is considered to examine the reliability of the voltage value in the distribution system of each territory. Using the daily load curve, it is possible to control the system on an hourly basis in a specific area, and it is possible to install the primary item, which is a step voltage regulator (SVR), in the proposed method at a lower cost. In this method, with mass connection of distributed generation (DG) in the distribution system, the most suitable placement of the SVR, tap positions, and reduction in number are studied with the aim of stabilizing power supply to consumers. It is also necessary to address changes in current power demand and output voltage. A load ratio control transformer (LRT) is used to simultaneously determine the output voltage and optimal placement of the SVR. A memetic algorithm (MA), which is a combination of local retrieval method and a GA, is used to solve a combination of optimization problems.

**Keywords:** Load ratio control transformer, Step voltage regulator, Genetic algorithm

## 1. まえがき

近年、様々な分野において地球環境保護の観点からエネルギーの有効活用や温室効果ガスの削減が進められている。電力業界では自然のエネルギーを活用した太陽光発電や燃料電池、風力発電、バイオマス発電などのクリーンなエネルギーによる様々な発電システムが分散型電源 (Distributed Generator: DG)として、今後ますます大量に系統連系されるものと予想されている。特に、簡単に設置でき多種多様な場所での発電がおこなえる太陽光発電の普及が顕著に増加しており、大規模電源として活用されるメガソーラー、住宅地区や商業地区での小規模電源多量導入などが進められている。このような大量導入における問題点として配電系統内の逆潮流や気象や天候に左右されやすいことなどが電圧制御の困難さを招く要因になっている。また、配電系統内におけるエネルギー使用は、多種多様な電気機器の導入によって増加傾向にあり時間当たりの負荷の変化も激しく系統電圧を維持・管理する運用者側にとって重要な課題となっている。

これらの解析には、これまでも様々な最適化手法

が適用されてきているが近年ではメタヒューリスティック手法の適応が注目されている。メタヒューリスティック手法には、遺伝的アルゴリズム (GA) や、タブサーチ (TS) などがあり、多くの問題を解決するために利用されてきた。

配電系統で発生する逆潮流などの電圧制御の問題に対し、本研究では地域ごとにある配電系統の電圧規定値の信頼性を高めるために、日負荷曲線に着目し、検討する。これにより、その領域での時間ごとに必要な制御が可能となり、このときの装置として安価で配電系統に容易に設置可能な自動電圧調整器 (Step Voltage Regulator : SVR) をまず適用する。この設備は過剰に連系された DG に対して、最適設置箇所やタップポジションを決定し、できるだけ少ない設置台数により系統の電圧を制御する装置である。次に、電力需要は時々刻々と変化することから配電用変電所には負荷時タップ切替装置 (Load Ratio Control Transformer : LRT) が存在している。これは系統に供給する送りだし電圧を常に変化させ、逐次制御されている装置である。

本論文は、これまでほとんど報告されていない LRT と SVR の協制御を GA により最適配置と設置台数について日負荷曲線に基づいて検討したものである。これにより本手法の有用性を報告する。

\*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

## 2. 問題の定式化

### 2.1 配電システムモデルの構成

本稿で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 の出力は、日射強度に比例する太陽光発電システムが存在するものとする。但し、雲による出力変動および、設置箇所の違いによる出力のばらつきは考慮しないこととする。
- (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

本稿における SVR 最適配置問題に関しては、評価関数として (1)式を用いた。第 1 項は電圧基準値からの偏差、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  $f_o(I_i)$  は、(3)式に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、良好なシステム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。

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

$$g(V, I) = \sum_{j=1}^{ff} ((V_{max} - V_{jt})^2 + (V_{min} - V_{jt})^2) + \sum_{j=1}^{ff} (I_j^{max} - I_{jt})^2 \dots (2)$$

$$f_o(I_i) = 1/J_i \dots (3)$$

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、 $g(V, I)$ : 電圧・電流制約逸脱量、 $ff$ : ブランチ数、 $V_{max} \cdot V_{min}$ : 電圧上下限值、 $I_j^{max}$ : 区間  $j$  の線路電流上限値、 $I_{jt}$ : 区間  $j$ 、時間断面  $t$  における線路電流

### 2.3 制約条件

SVR が設置されたフィーダでは、線路電圧の変化に伴い、線路潮流も大きく変化する。そこで、システム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

$$V_{min} \leq V_{nt} \leq V_{max} \dots (4)$$

#### ② 線路電流上限制約

$$|I_m| \leq I_m^{max} \dots (5)$$

#### ③ SVR タップ上下限制約

$$T_{min} \leq T_j \leq T_{max} \dots (6)$$

#### ④ LRT タップ上下限制約

$$T_{min} \leq LRT_t \leq T_{max} \dots (7)$$

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

### 2.4 SVR, LRT 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。LRT も同様に動作する機器である。SVR は配電システム内において配置する機器であり、LRT は変電所内において使用される機器で、取り扱い容量などが異なっている。その SVR, LRT の概略図を Fig. 1 に示す。また、本稿では設置される SVR, LRT を次のようにモデル化する。タップ付きの理想変圧器として取り扱う。すなわち、SVR の変圧比および二次側電圧は次のように表される。

$$\alpha_i = 0.95 + S\beta \dots (8)$$

$$V_{(n+1)t} = \alpha_i V_{nt} \dots (9)$$

$$\alpha_{LRT} = 0.99986 + S''\beta \dots (10)$$

$$V_{(LRT)t} = \alpha_{LRT} V''_{nt} \dots (11)$$

ここで、 $\alpha_i$ : SVR <sub>$i$</sub>  の変圧比、 $S$ : 変圧比のきざみ幅、 $\beta$ : タップ位置、 $V_{nt}, V_{(n+1)t}$ : SVR の 1 次、2 次側の電圧、 $\alpha_{LRT}$ : LRT の変圧比、 $S''$ : 変圧比のきざみ幅、 $V''_{nt}, V_{(LRT)t}$ : LRT の 1 次、2 次側の電圧。

本稿で用いる SVR のタップ位置とタップ比の関係を Table 1 に示す。LRT は  $S''$  を 1 タップ当たり 0.2% で変換させている。

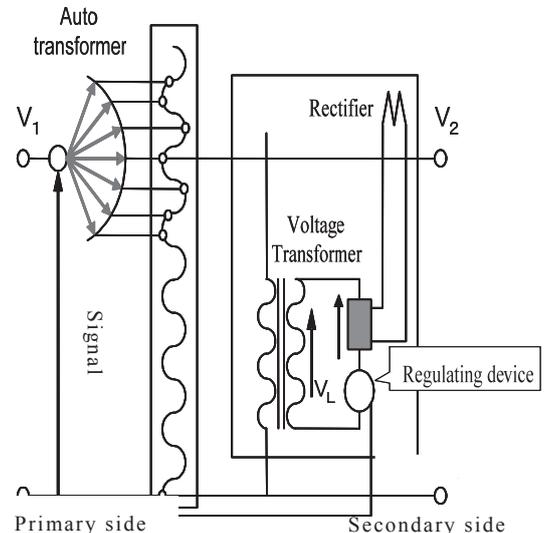


Fig. 1 Structure of SVR and LRT.

Table 1 Tap position and tap rate (SVR).

Tap position	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Tap ratio	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 (提案手法)

配電系統内の運用状態は、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 と LRT 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、膨大な組み合わせ最適化問題となる。

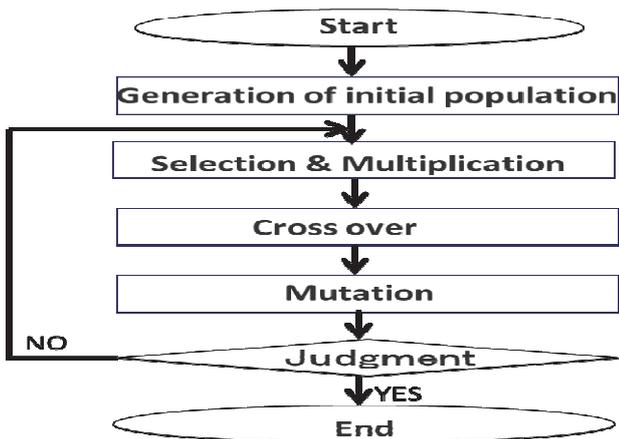


Fig. 2 Flow chart of algorithm.

そこで、厳密な解を得ることを諦め、大規模な解空間の中から効率良く準最適解を探索し、最適解に近い解を早期に得るために、GA を用いる。次にその詳細について記述する。GA のフローチャートを Fig. 2 に示す。

まず、任意の時間断面に対して GA を適用する場合の、LRT の配置箇所、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。配置箇所に関しては、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は 0 として表現する。また、タップ位置をそれぞれの区間に設け、同時に表現する。しかし、1 日の負荷は一定ではないので、複数の時間を考慮する場合は負荷状態ごとに最適制御を行う必要がある。t はそれぞれ探索する時間断面であり、複数の時間を考慮したタップ位置のコーディングの様子は配置箇所と同時に実施する。この関係を Fig.3 に示している。

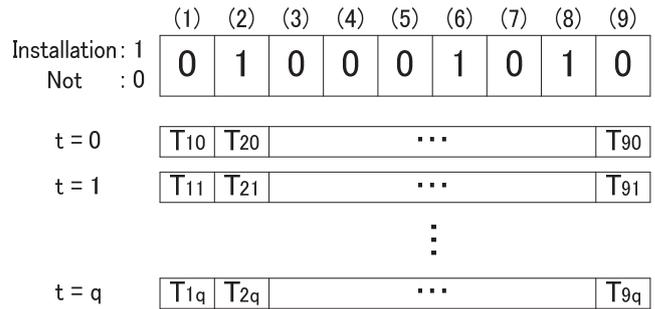


Fig. 3 Example of coding.

#### 3.1 初期生物集団の生成

通常の GA は初期生物集団をランダムに生成するものが多いが、本問題において初期生物集団をランダムに生成した場合、制約を満足する個体を作成することが非常に困難となる。そのため本手法では初期生物集団の生成に改良を加え効率化を図っている。具体的には LRT を配置して系統内の電圧を安定化させる。次に、一様乱数を用いランダムに SVR のタップ位置を決定する。その後、この SVR を Fig. 4 に示すように最初の設置箇所から順にすべての箇所 (1, 2, ..., n) に設置し、この図では 1 箇所の SVR 設置による最も効果的な設置箇所を探索する様子が示されている。また、Fig. 4 は縦を電圧、横を線路番号と見立て、1 個の SVR の位置を任意の設置箇所に移動させたときの電圧上昇の様子を同時に示している。なお、横軸は下位系統になるにしたがって電圧が低下する様子を示している。さらに、Lower Limit は配電系統の下限電圧値(6.3 kV)を意味している。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、その総数が最も少なくなる設置箇所を効果的な設置箇所とする。また、SVR が設置されても系統内の電圧規定値逸脱が解消されない場合は、SVR を 1 台増加し同様の操作を繰り返すことで新たな SVR の効果的な設置箇所を探索する。このような探索を制約逸脱が解消されるまで繰り返す。

しかし、日負荷曲線を考慮する場合、探索範囲が膨大になりすぎるため、SVR を全線路に設置しても制約を満足する可能性は極めて低い。そのため、SVR が全線路設置状態で制約を満足しない場合でも、個体として採用する。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。以下に初期生物集団生成のアルゴリズムについて示す。

- Step 1: 時間毎における系統内の電圧規定値逸脱箇所を探索する。
- Step 2: 上限への電圧規定値逸脱が多い場合には低いタップ位置 (0~3) をランダムに、下限への電圧規定値逸脱が多い場合には、高いタップ位置(5~8) をランダムに作成し、SVR のタップ位置を決定する。但し、上限下限逸脱が等しい場合にはタップ位置 0~8 をランダムに決定する。
- Step 3: Step 2 で作成した SVR を線路 1 から線路 n まで 1 箇所ずつ移動させながら設置していく。

- Step 4: 全ての設置箇所の中で最も電圧逸脱の少ない箇所を Step 2 で作成した SVR の最も効果的な配置箇所として決定する。
- Step 5: Step 4 の状態で制約を満足しているならば、次の個体を生成し、制約を満足していなければ、Step 1 へ戻り、もう 1 台の SVR を作成する (台数の増加)。
- Step 6: 全ての箇所に SVR が設置されても制約満足しない場合はその状態で個体として採用する。

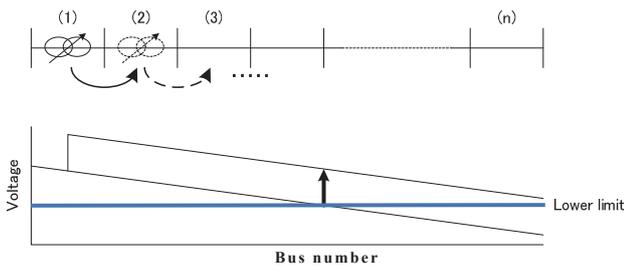


Fig. 4 Judgment of placement.

### 3.2 評価

式(1), 式(2)に基づき, 各個体を評価する。

### 3.3 選択

3.1 で生成した集団を基に, 遺伝的操作に用いる親個体を選択する。

本稿では, 電圧基準値からの偏差だけでなく, 設備投資費も考慮し, 設備投資を可能な限り抑え, 最低限のコストにするという観点から, SVR の設置台数も加味し, 二つの評価基準について考慮する。そこで本手法では, トーナメント戦略を用いて親個体の選択を行う。

本手法では個体選択時に, ある一定の閾値  $t(t < 1)$  を設け, 一様乱数初期値によって決定された値が閾値以上ならば制約満足の有無, 適応度および, SVR の設置台数で解を選択し, 閾値未満ならば制約満足の有無に関係なく, 適応度のみで解を選択する。また, 本手法ではこの閾値を 0.5 としている。これを行うことにより, 電圧基準値からの偏差および, SVR 設置台数を同時に最適化できるアルゴリズムとなる。具体的には, 以下に示すような定義を満足するとき, 個体  $i$  は個体  $j$  より優れていることとする。

閾値以上

- 個体  $i$  は制約満足しており, 個体  $j$  は制約逸脱している場合
- 個体  $i, j$  共に制約逸脱しており, かつ個体  $i$  が個体  $j$  よりも適応度が優れている場合
- 個体  $i, j$  共に制約満足しており, かつ個体  $i$  が個体  $j$  よりも SVR 設置台数が少ない場合

閾値未満

- 個体  $i$  が個体  $j$  よりも適応度が優れている場合

### 3.4 交叉

本問題は SVR 設置箇所に対し 0 か 1 の変数をと

るバイナリー表現であるが, SVR のタップは変数を 0~8 とする実数離散値表現である。このような実数値で表現された遺伝子に対し, バイナリー用に作られた交叉を使用すると, 交叉によって変化する領域が大きすぎるため, スキーマが保存・進化されない可能性がある。また, 実数ベクトルをビットストリングに変換した後, 一様交叉などで子個体を生成し, 実数値ベクトルに逆変換しても, この過程において変数間依存性などの情報が失われるため, 最適化における性能は低い水準に留まる。そこで本手法における SVR タップの交叉においてはランダムに選択された親個体の遺伝子座値の間の一様乱数を取り, 子個体としている。SVR タップ部の交叉例を Fig. 5 に示す。星印は個体を偏らせないようにランダムに変化させる場所の一例である。なお, SVR 設置部の交叉には通常の二点交叉を採用している。

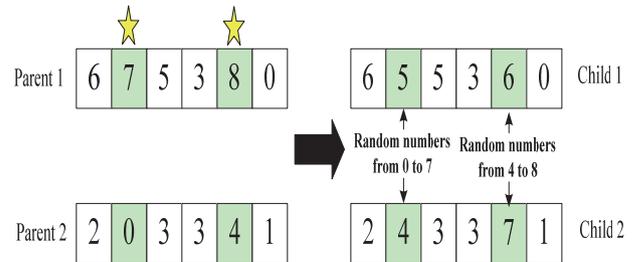


Fig. 5 Example of crossover (Tap).

### 3.5 突然変異

交叉により得られた優秀な個体を破壊しないよう最上位の個体をエリート解とし, 突然変異の対象外として保存している。なお, 突然変異は設置箇所に関しては対立遺伝子へ置き換え, タップ位置は乱数によりランダムに決定する。通常, 実数値を扱った GA は突然変異などの補助的手段を用いないが, 本手法においては, [3,4]で実行される交叉だけでは解が局所解へ陥る可能性があるため, 突然変異を実行している。

### 3.6 近傍探索

本手法では, GA の得意とする大域的探索に近傍探索を導入することにより, さらなる効率的な解探索を図っている。例えば, 現在設置されている SVR 設置箇所に隣接する箇所に SVR を設置し SVR の上下のタップ位置を近傍値で探索する。Fig. 6 は, この探索の様子を示したものである。さらに, 現在設置されている SVR の台数を 1 台ずつ削減した状態のパラメータを生成する。この近傍探索を用いることで, 近傍の良質な解を生物集団に取り入れるると同時に, 同一個体の削除が実現できるため, 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。

近傍探索は GA の主要オペレータによって生成された個体中において, 同一の個体が存在する場合に実行する。近傍解の中で最も高い適応度を持った個体とこれまでのアル

ゴリズムにおいて生成された同一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、順次同一個体と入れ替える操作が実施される。Fig. 7 に近傍探索実施例を示す。図中に示した Same individual A, B, C が同一個体集団に当たる。A の近傍解が図中の Neighborhood solution で示される適応度があった場合、同一個体 2 個分を上位近傍解 (0.52, 0.49) と入れ替える。

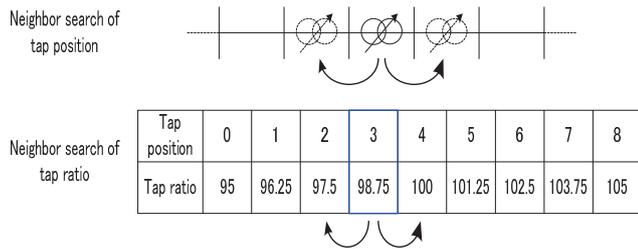


Fig. 6 Neighborhood example of placement and tap ratio.

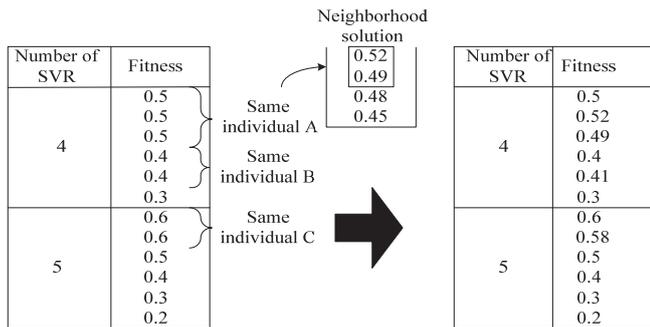


Fig. 7 Example of neighbor search.

### 3.7 SVR の削減

GA 探索では、ある一定の世代数を超えると解が収束し始める。それは、評価項目に SVR コストが考慮されていないため、最小台数の探索をせずに解が収束してしまうことがある。そこで、100 世代の間、エリート解が同一の適応度である場合にはエリート解以外の個体に対して、SVR を 1 台削減する。この操作を行うことで、最小台数の探索を実行させる。

### 3.8 終了条件判定

終了条件を満たしていれば次のステップへ移行し、満たしていなければ満たすまで [3.2]~[3.6] の動作を繰り返す。

## 4. シミュレーション

Fig. 8 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。この配電システムモデルでは、図中の枠で囲まれた地区をそれぞれ住宅

地区(母線番号 1~5, 22~32), 商業地区(母線 6~17), 工業地区(母線 18~21)として各々の運用状態を設定している。なお,  $f1 \sim f4$  はそれぞれ主フィーダ及び分岐フィーダを, DG1~DG11 は分散型電源をそれぞれ表している。DG1~DG11(各々最大出力 500kW, 500kW, 900kW, 400kW, 500kW, 500kW, 500kW, 500kW, 500kW, 1000kW, 1000kW)は日射強度に比例する PV とする。また, Fig. 9 に連系された太陽光発電の出力変動であり, Fig. 10 はそれぞれの地区における負荷曲線を示したものである。このときの配電システムモデルにおける初期状態の電圧特性は Fig. 11 となる。この図から負荷変動や DG 連系により各フィーダ ( $f1 \sim f4$ ) の母線電圧は 24 時間内において電圧制約条件 6.9~6.3kV (赤破線と青点線) を逸脱していることがわかる。本稿ではこれを第 3 章による提案手法により 2000 世代まで探索したものである。

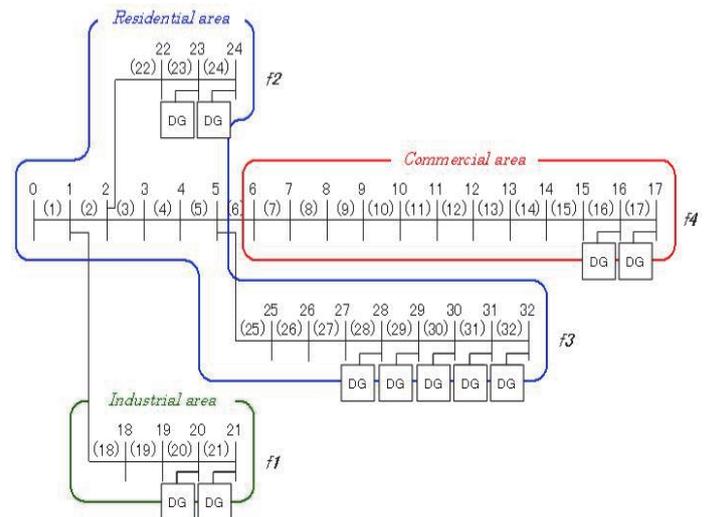


Fig. 8 32 Node distribution system model.

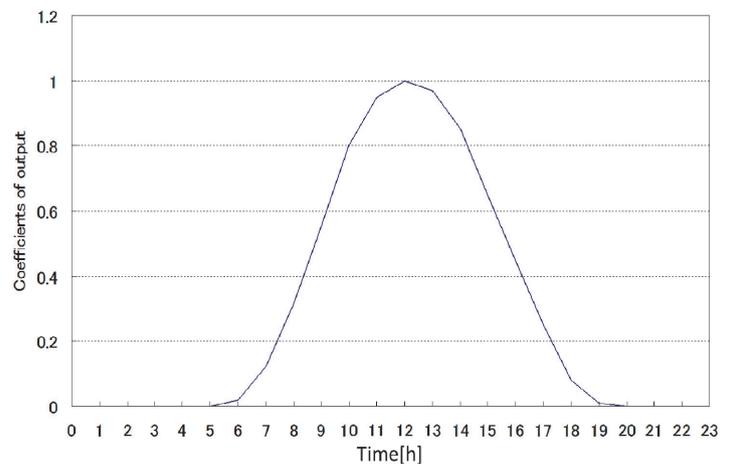


Fig. 9 Change output of photovoltaic.

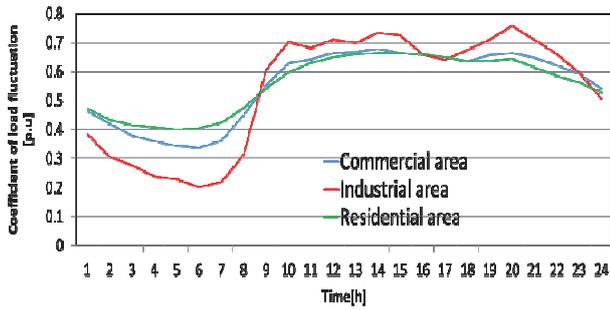


Fig. 10 Load curve at each area.

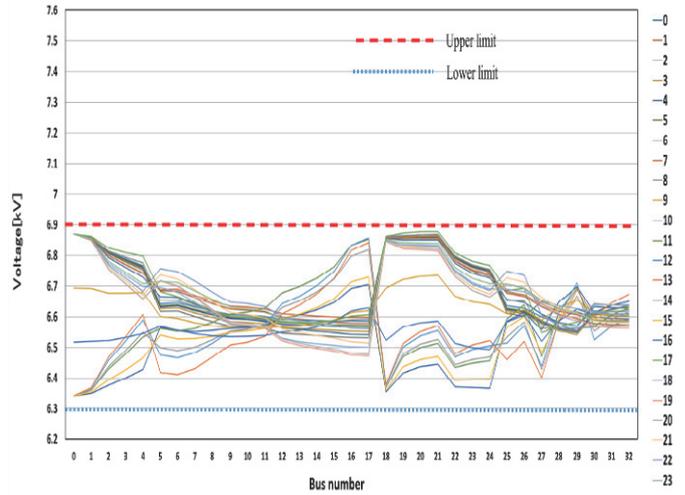


Fig. 13 Voltage profile after the optimal position.

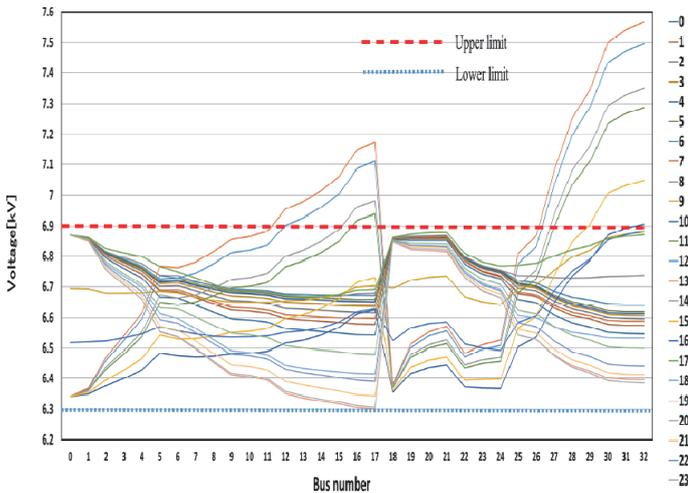


Fig. 11 Voltage profile of initial state.

もの(27, 30)に加え, SVR タップ上下制限約のため, それぞれのフィーダ毎では規定値逸脱の解消が図れなかったフィーダ(f3, f4)の規定値逸脱を解消するために, 上位にもう 1 台(5)の計 3 台が設置されることになる. SVR のみの探索では計 5 台必要となることから<sup>3)</sup>, 協調制御が効果的であることがわかる.

Fig. 13 は, SVR と LRT 協調による最適配置箇所における電圧の時間分布を示したものである. Table 2 は, そのときの時間ごとの SVR および LRT のタップ位置の変動である. LRT は 13 タップあり, SVR は 9 タップ存在し, タップ

### 5. シミュレーション結果

Fig. 12 は, 探索により得られた LRT と SVR 協調による設置台数を示したものである. このとき区間(5), (27), (30)に計 3 台の SVR が設置された. これは電圧規定値の逸脱が確認された 1 つのフィーダ(f3)において, 規定値逸脱を解消する

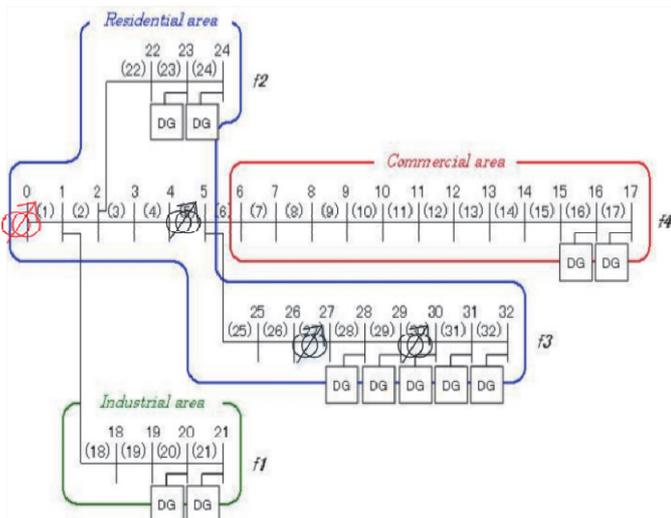


Fig. 12 Optimal placement of SVR and LRT.

Table 2 Result of optimal placement.

Time	LRT	SVR no.5	SVR no.27	SVR no.30
0	12	4	4	5
1	12	4	4	4
2	12	3	5	4
3	12	3	4	5
4	12	3	4	5
5	12	3	4	5
6	12	3	4	5
7	12	4	4	4
8	12	3	3	4
9	7	3	3	3
10	0	5	2	2
11	0	3	0	1
12	0	1	0	0
13	0	0	0	1
14	0	2	0	1
15	0	4	1	2
16	4	4	2	3
17	12	3	2	4
18	12	4	4	4
19	12	6	4	4
20	12	6	4	5
21	12	6	4	4
22	12	6	3	5
23	12	5	4	4

番号が大きければ2次側の電圧が上昇し、小さければ2次側の電圧は減少することになる。このことからLRTでは基準タップは6として示され、SVRでは基準タップが4で表されることになる。LRTによる送り出し電圧が昼夜により大きく異なっていることがわかる。Fig. 11にある昼間の時間帯においては逸脱が多くあることから提案手法によりLRTの送り出し電圧のタップ位置を下げていることがわかる。他の時間帯においてはLRTの送り出し電圧のタップ位置を上げSVRとの協調制御により電圧が制御されている結果となっている。

## 6. まとめ

本研究はDGが配電系統に連系された場合に生じる逆流現象やDG出力の変動も考慮し複数の負荷に対するSVRの最適配置手法を提案し、これによって決定したSVRとLRTのポジションにおけるタップ比の変更から送り出し電圧の幅を探索し、より安定的な系統の構築が可能となり、SVRとLRTの協調制御によりSVRの設置台数も削減できることを明らかにした。

本手法によるとLRTの切替回数の削減も実現でき、機器の耐久性の面に対するコスト削減を検討することが可能と

なった。今後は、さらなる配電系統拡張モデルに大量のDGが導入された場合について検討する予定である。

## 参考文献

- 1) 大貫悟志, 林田広和, 道端郁夫, 青木秀憲:「SVRとSVCの協調動作に関する研究」東海大学紀要、工学部 Vol.48, No.1, pp. 87-92, 2008.
- 2) 椎野輝晋, 森野忠, 青木秀憲:「日負荷変動を考慮したSVR最適配置」電気学会電力・エネルギー部門大会 Vol.2009, Page. ROMBUNNO 151 (2009.08.18)
- 3) 平田陽介, 青木秀憲:「日負荷曲線を考慮したSVR最適配置問題」平成23年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集 B pp.13-14, 2011.
- 4) 芳澤 信哉 他 3名:「バンク事故復旧対応型LRT・SVR協調電圧制御手法」電気学会論文誌. B, 電力・エネルギー部門誌 pp. 333-342, 2015.
- 5) 後藤隆太 他 8名:「太陽光発電出力の平滑化効果を考慮したLRTおよびSVR制御の制定手法」電気学会研究会資料,分冊2, pp.95-100, 2015.