

遺伝的アルゴリズムによる配電系統事故復旧問題に関する研究

道端 郁夫*¹ 岩崎 敬亮*¹ 青木 秀憲*²

Research on Service Restoration Problem in Distribution Systems Using Genetic Algorithm

By

Ikuko Michibata*¹, Keisuke Iwasaki*¹, Hidenori Aoki*²

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

Abstract

The problem of recovery from power-system failures is the problem of handling operations that make it possible to supply power from other lines in response to power-system failures or construction by switching between the opened and closed states of sectionalizing switches. Considerable research has already been conducted with regard to this issue. This paper addresses the issue of determining target systems for final recovery in cases when some sections remain subject to power failure (i.e., sound bank capacity < load capacity). For this purpose, intersection is conducted only for parameters within such power-failure sections. In such research, calculations are implemented by setting a value of 2 to the sectionalizing switches of a single parameter. It is clear that the proposed method consisting only of GA is superior in terms of average fitness values.

Keywords: service restoration problem, genetic algorithm, sectionalizing switch

1. まえがき

近年、配電系統制御の自動化が進められている。このため、配電系統内に起こる停電事故に対して自動的に事故復旧を図るための最適探索問題に研究^{(1)~(9)}が多く行われている。これらは、配電系統事故復旧問題と呼ばれ、配電系統においてフィーダ事故や工事により系統内の一部が停電した場合、これらの区間へ再送電を行うための操作を決定する問題となる。一般的には、系統内の区分別開閉器の開閉状態を切替えることにより、停電区間の負荷に対して他の健全フィーダから電力を融通することで未復旧負荷最小化を目的とした組み合わせ最適化問題となる。このような問題に対しては、メタヒューリスティック手法を適用することで効率良く、最適化を行うことが期待できる。しかしながら、これまでの報告^{(1)~(5)}では未復旧負荷を多く残す結果となり、より効果的なアルゴリズムを構築する必要がある。

本論文は、未復旧負荷量をこれまでより軽減するため、著者らによる文献^{(3), (4)}で示した遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm:以下 GA と略す) による系統事故復旧手法に対して、更に改良を加え改善を図る。具体的には、アルゴリズム内にある突然変異部分に新たな改良を加えた手法が提案されている。本手法は、文献(1)~(5)にあるモデル系統とそれを拡張した系統に対して適用し、その有用性を実証したので報告する。

2. 問題の定義

一般に、配電系統は信頼性確保のためループ状に構成され、系統保護の観点から1部の区分別開閉器を開放した、

開放ループ型放射状配電線として運用されている。本稿では、まず簡単な系統事故復旧操作を示すために、Fig. 1 (a)に示す例題配電系統モデルを用いて解説する。白丸印は区分別開閉器のON(閉)状態、黒丸印はOFF(開)状態をそれぞれ示している。Fig. 1 (b)は、その配電系統に線路事故が生じた時の停電区間を示したものである。Fig. 1 (c)は、区分別開閉器5, 6, 8を切替えることにより事故区間以外を系統から切り離し、復旧した例である。この場合、区分別開閉器数が系統内に8個あるため、区分別開閉器の開閉状態の組み合わせ数は $2^8=256$ 通りとなり、この中から目的関数の最適化を図ることは容易である。しかし、本稿で適用した実規模並みに拡張した系統によると、区分別開閉器数を170個使用することになるので、その組み合わせ数は $2^{170}=1.5 \times 10^{51}$ 通りとなる。従って、この膨大な組み合わせに対する最適化は非常に困難であり、確立した手法の開発が不可欠となる。

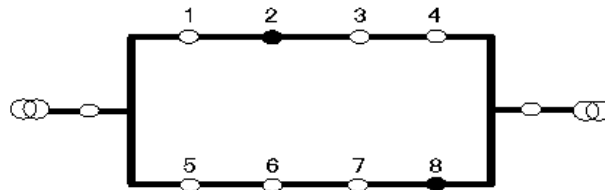


Fig. 1(a) An exercise distribution system model.

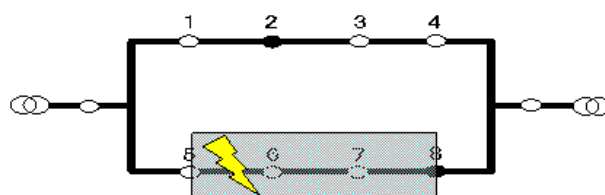


Fig. 1(b) Before service restoration.

* 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

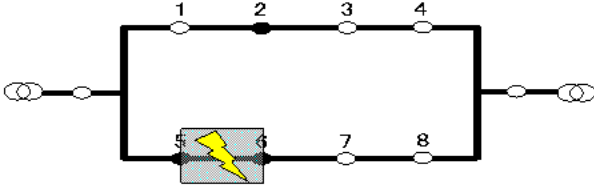


Fig. 1(c) After service restoration.

3. 問題の定式化

<3・1> 目的関数

GA では、個体を生成するごとに適応度が与えられることになる。また、アルゴリズムは、後述の<3・2>に示す制約条件を満足しながら適応度を最大化とする区分別閉器の開閉状態を決定するものとなる。そのため、式(1)にある配電用変電所の容量逸脱量、線路電流容量逸脱量、系統末端の電圧下限値逸脱量が0となる系統を構成し、停電区間のみが軽減される復旧目標系統を算出することになる。以下にその目的関数と適応度を示す。

$$J_i = W_1 \sum_{i=1}^T (igg_i)^2 + W_2 \sum_{j=1}^J (ill_j)^2 + W_3 \sum_{k=1}^F (vll_k)^2 + W_4 \sum_{m=1}^J inn_m \quad \dots (1)$$

$$f_i = 1 / J_i \quad \dots (2)$$

ここで、 $W_1 \sim W_4$ ：重み係数、 igg_i ：配電用変電所 i の容量逸脱量、 T ：配電用変電所数、 ill_j ：区間 j の線路電流容量逸脱量、 J ：負荷区間数、 vll_k ：系統末端 k の電圧の下限値の逸脱量、 F ：系統末端数、 inn_m ：区間 m の未復旧負荷、 f_i ：適応度である。

<3・2> 制約条件

復旧目標系統を作成する過程で、系統内の区分別閉器や潮流状態は、切替えの都度変化することになるが、如何なる場合においても以下の制約は満たさなければならないものとする。

① 放射状制約

配電系統は放射状となっていなければならない。

② 線路電流容量制約

各区間の線路に流れる電流の大きさが、その区間の線路電流容量を越えてはならない。

③ 変圧器電流容量制約

各変圧器に接続されている負荷の総和が、その変圧器の電流容量を超えてはならない。

④ 電圧降下許容量制約

変電所引出し口から系統末端までの電圧降下の総和が電圧降下許容量を超えてはならない。

⑤ 健全区間制約

事故が生じた場合に健全であった区間が、復旧の過程又は復旧後に停電してはならない。

<3・3> 制約条件の定式化

前節の制約条件②、③、④は以下に定式化される。

$$\text{線路電流容量制約} : \sum_{j \in J_{ik}} I_{ij} x_{ij} \leq b_{ik} \quad \dots (3)$$

$$\text{変圧器電流容量制約} : \sum_{j \in J_t} I_{ij} x_{ij} \leq b_t \quad \dots (4)$$

$$\text{電圧降下許容量} : \sum_{i \in T_l} \left(\sum_{q \in J_{il}} I_{iq} x_{ij} \right) z_{ij} \leq V_{il} \quad \dots (5)$$

ここで、 x_{ij} ：フィーダ i の区間 j が停電中の時 0、充電中の時 1 をとる 0-1 変数。すなわち、 x_{ij} は区分別閉器の開閉状態の関数である。 I_{ij} ：フィーダ i 、区間 j の負荷の大きさ。 b_{ik} ：フィーダ i の k 番目の監視店の電流容量、 b_t ：変圧器 t の電流容量、 z_{il} ：フィーダ i 、区間 l のインピーダンス、 $u_{iq} : q \neq l$ の時、 $u_{iq} = I_{iq}$ 。 $q = l$ の時、 $u_{iq} = I_{iq}/2$ 。但し、負荷は平等分布負荷。 V_{il} ：フィーダ i の末端 l における電圧降下の許容量、 J_{ik} ：フィーダ i 、区間 k より末端側にある区間の集合 (k を含まない)、 J_{il} ：フィーダ i 、区間 l より末端側にある区間の集合 (l を含む)、 J_t ：変圧器 t に接続されている区間の集合、 T_l ：フィーダの末端区間 l と母線を結ぶ経路上にある区間の集合である。

4. GA の適用

<4・1> 個体の表現

本稿では、パラメータは区分別閉器の開閉状態を表し、区分別閉器の開状態を 1、閉状態を 0 として個体を表現する。これにより、1 個体の遺伝子長は区分別閉器数となる。また復旧する際に、停電区間をできるだけ分散させ、効果的な復旧を図ることを目的とする。これを効率的に実現するために、パラメータの設定は 2bit として表現する。よって、本稿で適用した拡張系統よると 1 個体は、2 bit ずつに区切られた 85 パラメータをもつ個体となる。その様子を Fig.2 に示す。

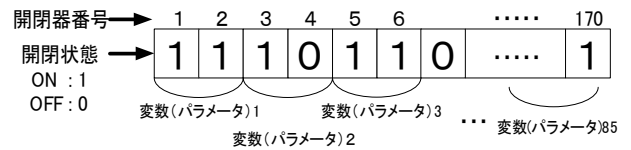


Fig. 2 Expression of an individual.

<4・2> 初期生物集団

まず、定常運転状態を初期状態として読み込み、これに事故区間を入力して初期個体を生成する。次に、1つのパラメータを乱数によって変更し、設定する個体数を生成する。その際、各々の個体は、目的関数と制約条件によって適応度が割り当てられる。

<4・3> 淘汰、交叉 (増殖)

まず、適応度の大きい順に並べた個体の下位 4 割を淘汰する。次に、交叉ではその淘汰された個体数を新たに生成することになる。親個体の選択方式はルーレット方式を適用し、2つの親個体を選ばれることになる。それ

らの個体に基づいて、2点交叉による親個体同士の入れ替えを実施する。制約条件を満足して生成される2つの子個体の総和が淘汰された個体数と同数になるまでこの操作を繰り返す。この時、できるだけ効果的な復旧を図るために探索は、停電区間とその周辺のみ交叉となる。この操作は、健全区間にある区分開閉器の切換えを最小限に止めたものである。Fig.3は、その交叉例を示したものである。

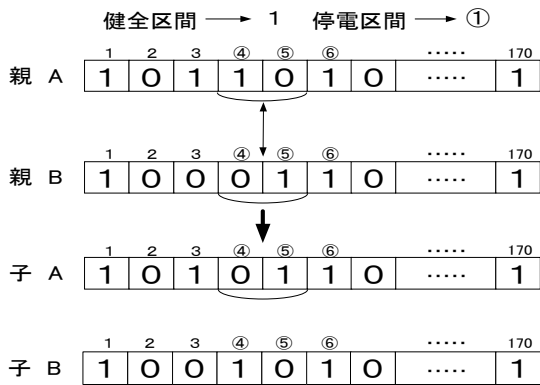


Fig. 3 Practice example of crossover.

<4・4> 突然変異

まず、本手法で実施する突然変異は、一般的なものは異なるため、突然変異発生率を、突然変異させる個体を選択する確率と定義する。これは、二義的なものとされている突然変異を、本問題において効果的な役割を持たすために採用したものである。従って、突然変異発生率は一般的には数%程度であるが、本問題に対してはかなり高めとなる90%に設定している。具体的には、最も高い適応度を持つ個体を除いた個体に対して一様乱数によって突然変異発生率90%未満の個体であるか否かを判定するものである。そして、選択された個体に対して、乱数によりその個体の持つ任意のビットの遺伝子を選択し、その遺伝子とその隣の遺伝子を0あるいは1に変化させる操作が実行されている。本来ならば、選択された遺伝子のみを変化させるだけであるが、本問題のような配電系統事故復旧においては、放射状制約を逸脱してしまう可能性が非常に高くなる。そのため、選択された遺伝子の隣の遺伝子も同時に変化させることで、放射状制約を解消する可能性を高めたものであり、この方法によるとこれまで報告されたもの^{(1),(2),(5)}より効果的なものとなること、著者らの報告^{(3),(4)}で明らかとなっている。Fig.4は、これに基づいた突然変異の様子を示したものである。

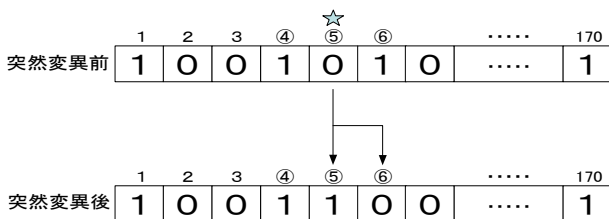


Fig. 4 Practice example of mutation.

5. 提案手法

これまでのGAによる事故復旧手法を適用し、事故復旧前後における系統状態を比較すると、ほとんどの解において停電区間が分岐点箇所に多く残る傾向が見られた。即ち、系統内に振り分けられた開閉器番号が連続的に繋がる部分のみが主に復旧されていた。その理由は、これまでのGAでは分岐点における関連性が一切考慮されていなかったためと考える。そのため本論文では、まず系統内にある全ての分岐点の開閉器番号が隣接している箇所をプログラム内に記憶させ、突然変異によりその箇所が選択された場合には選択箇所だけでなく、そこに隣接する全ての開閉器番号中の一箇所を変更させる新しい手法を提案している。この手法により、GAのアルゴリズム内にある突然変異で区分開閉器を切り替える際の選択数が増加され、これまでより探索範囲を広げることが可能となる。さらに、GAが従来から苦手とされている局所的な探索精度の向上を図ることができる手法となっている。これらのことから、これにまでより効果的な復旧を期待したものである。その様子をFig.5に示している。

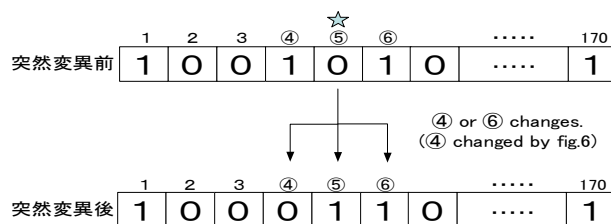


Fig.5 Mutation of proposed method.

6. シミュレーション

<6・1> シミュレーション条件

提案手法の有用性を検証するため、文献(1)~(5)で用いられている配電系統を、バンク数：10、区分開閉器数：170、フィーダ数：18、負荷区間数：322に拡張し、大規模配電系統モデルを作成する。Fig.7は、その配電系統モデルを示したものである。負荷は各区間に平等分布とし、負荷力率は0.8としている。幹線の電流容量は455[A]、支線の電流容量は125[A]、送り出し電圧6600[V]、電圧降下許容量を660[V]とする。また、バンク1~10の電流容量は、Tr1, Tr10を455[A]、Tr2~Tr9を910[A]としている。GAにおいては、個体数40個体、突然変異発生率は90%、終了世代100世代として、探索を実行している。

<6・2> シミュレーション結果

本問題ではTr3, Tr4の2つのバンク事故を想定する。そのため、この時の停電区間はFig.6の網掛け部分となる。このような系統状態にあるときの未復旧負荷量は1028[A]、事故バンク以外の変圧器電流容量の総和は6370[A]となる。また、健全状態時の負荷電流総和は5110[A]である。この状態から、理論上では全ての停電区間を復旧できるものと考えることができる。Table.1は、この事故状態に対して、文献(3)のGA(以後、従来手法のGAとする)を適用して得られた上位3つまでの適応度、

未復旧負荷量, 平均値, 更に一様乱数初期値をそれぞれ示したものである。これらは, 従来手法の GA を 100 世代まで計算し, 一様乱数初期値を 1~100 まで変更したときに得られたものである。Fig.7 は, Table.1 にある初期値 50 の時に得られた復旧状態である。この結果は, 未復旧負荷量が多く残っていることを示している。ここで, Fig.6 と Fig.7 の復旧状態を比較することで, 横部分の未復旧領域は減少しているが, 縦部分の未復旧領域が改善されていないことがわかる。一方, Table.2 は提案手法により, Table.1 と同様な計算を行ったときの値である。Fig.8 は, Table.2 の初期値 11 の時に得られた復旧結果である。Fig.7 と比較し, 提案手法によると, 大幅に未復旧負荷領域が減少し, 未復旧負荷量が軽減できていることがわかる。これは, 探索過程において近傍探索の概念が加えられており, この効果により分岐点付近で, 区分閉器の適切な切り替えが行われ, 良好な解を得ることができたものと思われる。Fig.9 は, 従来手法の GA と提案手法により得られる解の標準偏差を検討するために横軸を初期値, 縦軸を適応度としたものである。結果として, 提案手法が従来手法の GA よりも大きくなっていることが分かる。これは, 本手法による突然変異で, 変異する可能性がある遺伝子が連続番号ではなく離れた箇所において, 開閉器番号の変更があるために, 解にバラツキが多く現れたものと考えられる。

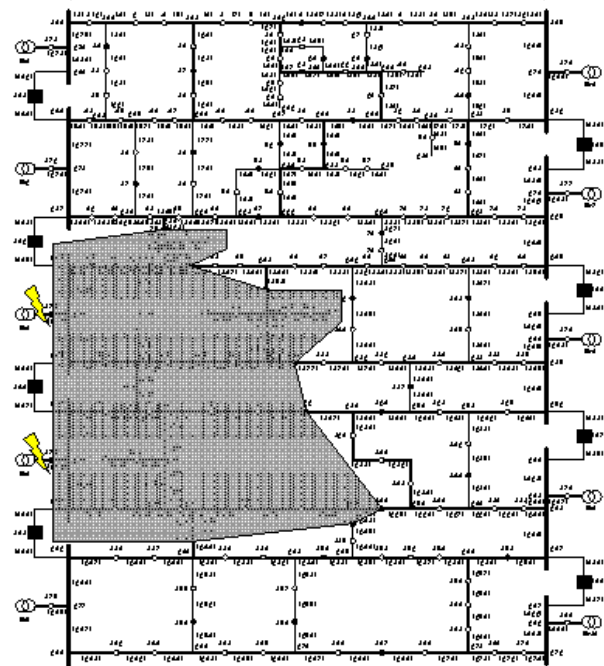


Fig.6 Distribution system model.

Table.1 A result of service restoration by the reference(3).

	Fitness	Unrestored total loads [A]	Initial Value
Solution1	1.65563	604	50
Solution2	1.62866	614	19
Solution3	1.62866	614	1
Average	1.4127	707	

※復旧前 1028[A]

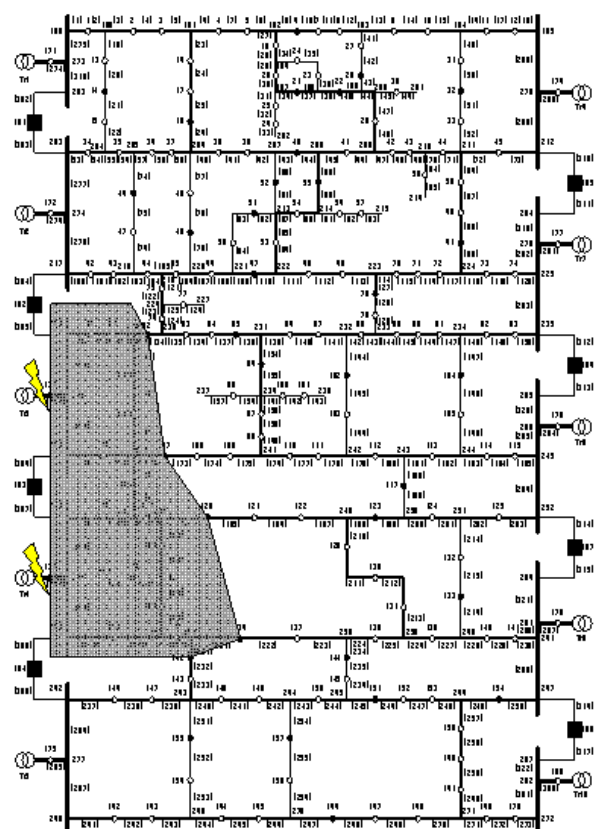


Fig.7 Service restoration result of reference (3)GA.

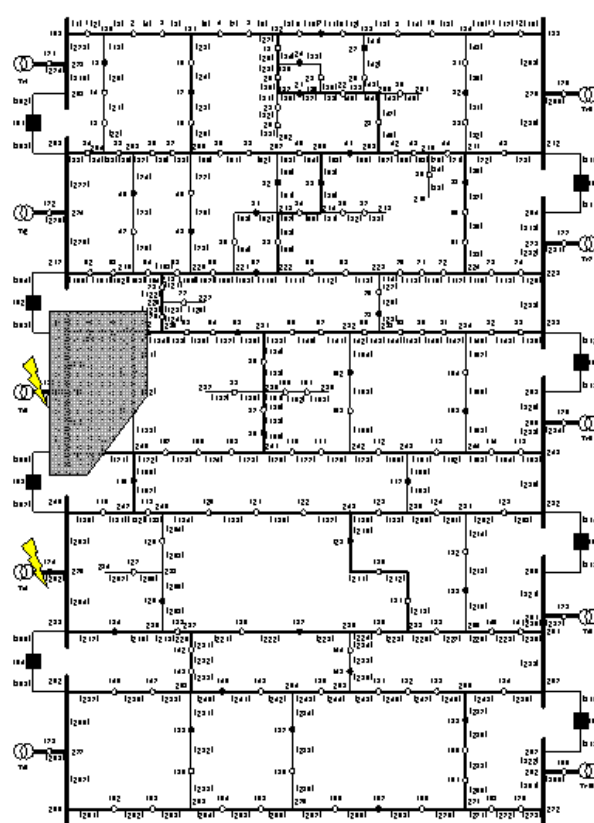


Fig.8 Service restoration result of proposed method.

Table.2 A result of service restoration by the proposed method.

	Fitness	Unrestored total loads [A]	Initial Value
Solution1	8.47458	118	11
Solution2	8.47458	118	12
Solution3	6.75676	148	7
Average	3.62654	290	

※復旧前 1028[A]

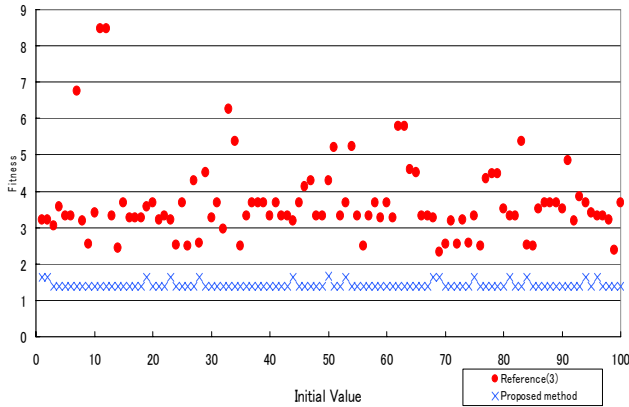


Fig.9 Reference(3) and comparison of proposed method.

提案手法は、文献(1)~(5)で適用されているシステムに対しても検討し、比較を行った。Fig.10 には、復旧前の系統状態を示しこれまでの報告事例^{(1)~(5)}と同じ Tr4 の事故を想定している。Table.3 には、これまでと同様に初期値 1~100 まで実行したときの提案手法による最良値と各文献で報告されている結果を示す。Fig.11 は従来手法の GA で得られた最良の復旧結果である。これによると、停電区間が 3 区間、未復旧負荷量 159[A]である。一方、Fig.12 は提案手法で得られた最良の復旧結果である。この場合、停電区間 5 区間、未復旧負荷量 154[A]となっている。Fig.11 と比較すると、結果として停電区間は若干増加するが、未復旧負荷量の最小化という点においては改善が図られていることが分かる。Fig.13 のグラフには、Fig.9 のグラフ同様、横軸に一樣乱数初期値、縦軸にそれに対する適応度を示した結果である。これにおいても、文献(1)、(2)の最良値を上回る解が多数見られ、従来手法の GA よりも良好な解が得られた。従って、小規模システムにおいても提案手法は、これまでにある従来手法の GA よりも効果的な解が得られていると言える。

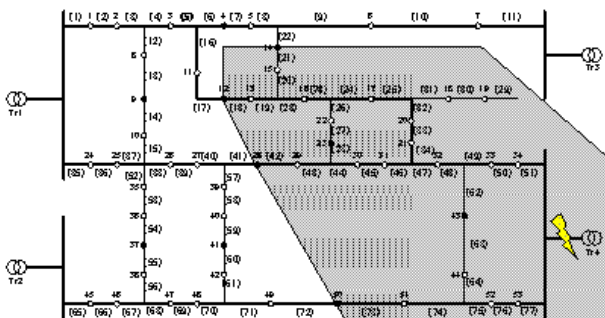


Fig.10 Distribution system model.

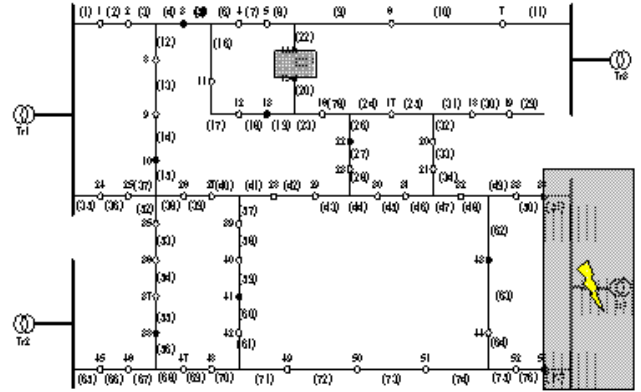


Fig.11 Service restoration result of reference (3) GA.

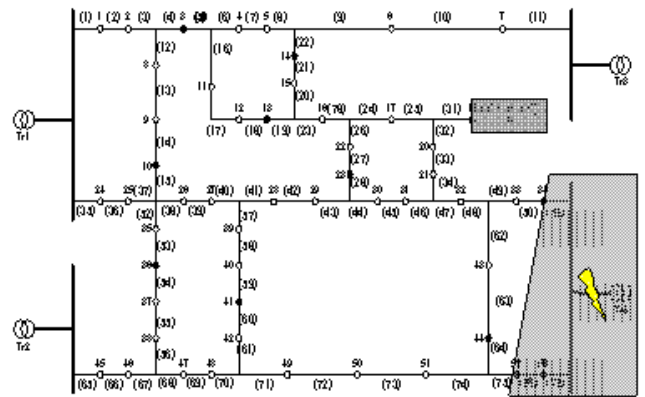


Fig.12 Service restoration result of proposed method.

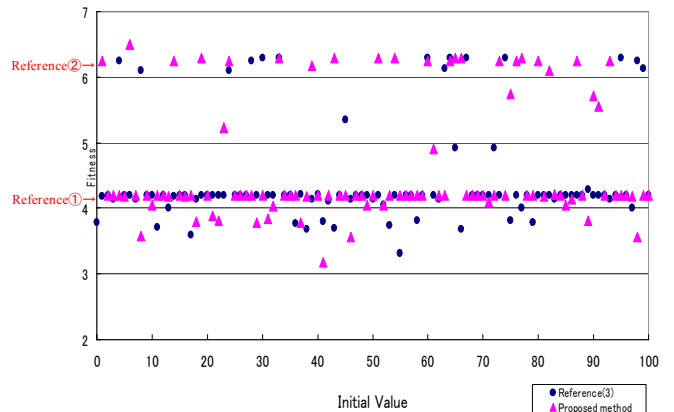


Fig.13 Reference(3) and comparison of proposed method.

Table.3 The best value by each reference and proposed method.

	Unrestored loads[A]
Reference(1)	238
Reference(2)	161
Reference(3)	159
Proposed method	154

※復旧前 488[A]

7. まとめ

本論文は、配電系統事故復旧問題において従来手法の GA と比較し、これまでよりも良好な解が得られることを明らかにした。しかしながら、配電系統事故復旧最適化問題は、未復旧負荷量の減少だけではなく、運用者側のニーズに応えるためには他にも、多くの考慮すべき事柄があるものと考えられる。そのため、今後は未復旧負荷量のみでなく、区分開閉器の切換え回数・配電損失・復旧時間など数多くの事を考慮する多目的最適化問題に取り組んでいく予定である。また、更なるアルゴリズムの改良を施し、未復旧負荷量の最小化を図る予定である。

参 考 文 献

- (1) 青木兼一・奈良宏一・佐藤泰司：「復旧の優先順位を考慮した配電系統の事故時負荷切換え」, 電学論 B, Vol.110, No.9 pp.710-718 (1990-9)
- (2) 稲垣 潤・中島 純・長谷山美紀・北島秀夫：「配電系統事故復旧問題の遺伝的アルゴリズムを用いた多目的最適化に基づく解法」, 電学論 B, Vol.124, No.3 pp.404-412 (2004-3)
- (3) 岩崎敬亮・青木秀憲：「遺伝的アルゴリズムを用いた配電系統事故復旧に関する研究」, 平成 18 年電気学会全国大会, No.6 pp.115-116 (2006-3)
- (4) 岩崎敬亮・青木秀憲：「改良型 GA を用いた配電系統事故復旧問題」, 電学論 B, Vol.127, No.7 pp.809-816 (2007-7)
- (5) 中島 純・稲垣 潤・長谷山美紀・北島秀夫：「GA を用いた配電系統事故復旧問題の解法に関する考察」, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.CAS2002, No.68 pp.37-42 (2002-9)
- (6) 中村静香：「最小木ならびに過負荷情報に基づく探索機構を用いた電力系統復旧における最終復旧系統立案方式」, 電学論 B, Vol. 巻数, No.5 pp.543-551 (1991-5)
- (7) 長谷修次・木下智夫：「遺伝的アルゴリズムを用いた配電線事故融通手法の開発」, 平成 11 年電気学会電力・エネルギー部門大会, A13-202, pp.514-515 (1999)
- (8) 永田 武・金 鈞・鼻山秀一・佐々木博司：「復旧戦略を導入した配電系統事故復旧の数値計画的な方式」, 電学論 C, Vol.120, No.2 pp.229-235 (2000-2)
- (9) 濱上知樹・海野富士也・穴道 洋・田邊隆之・舟橋俊久：「マルチエージェントによる配電系統の復旧制御」, 名電時報, 309 号, No.4 pp.98-102(2006)
- (10) 青山貴紀・永田 武・藤田秀紀・久世康人・岩間真也：「分散型電源を考慮した配電系統事故復旧マルチエージェントシステム」, 電気学会電力技術研究会資料, Vol.PE-05 No.127-129.131-136.138-139 pp.19-22(2005)
- (11) 高野浩貴・林 泰弘・松木純也・小林直樹：「配電系統のバンク事故による分散型電源の一斉解列を考慮した事故復旧手法」, 電学論 B, Vol.126, No.3 pp.336-346 (2006-3)