

シエムリアップ省（カンボジア）における配電ネットワーク復旧 のための遺伝的アルゴリズムの適用

バン バニー*¹ 青木 秀憲*²

Application of a Genetic Algorithm to Electrical Distribution Network Restoration in Siem Reap Province, Cambodia

by

Ban VANNY*¹ and Hidenori AOKI*²

(Received on Sep. 27, 2014 and accepted on Dec. 18, 2014)

Abstract

This paper presents the application of a genetic algorithm to electrical distribution network restoration in Siem Reap Province, Cambodia. The electrical distribution network in Siem Reap Province has been providing energy for about 25 years, so that the distributed power is always encountering many kinds of failures on each power bank and line of the network. Thus, restoration service has become important for solving the electrical distribution network problems. On the other hand, in recent years, a Genetic Algorithm (GA) is being actively introduced into electrical distribution network restoration. The effectiveness of the proposed method is shown by the system when failure occurs.

Keywords: Distribution network restoration, Genetic algorithm, Section switch

1. まえがき

日本の配電システムにおける事故復旧問題に関しては系統から目標系統に到達できるように自動化に向けた研究が行われ、その研究成果が報告されている¹⁾⁻⁹⁾。配電システム事故復旧問題とは、配電システム内においてフィーダ事故や工事などにより系統の一部に停電区間が生じたとき、区分開閉器の開閉状態を切替えることにより、この区間へ再送電を行うための操作を決定する問題である。一般的には、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や配電損失の最小化などを目的とする最適化問題として取り扱われている。

このような場合に解析される系統事故には停電区間が理論上すべて復旧可能なケース(健全バンク容量 \geq 負荷容量)と、一部の区間が停電区間として残るケース(健全バンク容量 $<$ 負荷容量)に大別することができる。前者については、取り扱う事故ケースによって異なるが、ほぼ停電区間を復旧することが可能となっている。一方、後者の未復旧負荷最小化という問題については、系統内の区分開閉器数を N とすると、組み合わせ解候補数が 2^N となる膨大な最適化問題となる。そのため、最近注目されているメタヒューリスティックス手法^{5,6)}などを適用しても未復旧負荷を多く残す結果となっている。著

者らも、同様に遺伝的アルゴリズムによる手法を開発(IGA¹⁰⁾: Improved Genetic Algorithm, NIGA¹¹⁾: New Improved Genetic Algorithm)し、この問題について取り組んでいる。その結果、文献^{1,5,6)}にある事故ケースについては未復旧負荷量が、これまでの文献^{10,11)}よりも軽減できることを明らかにしている。しかしながら、このとき操作することになる系統内の区分開閉器の切替回数に関しては、これまであまり報告がなされていないものとする。また、本研究室で新たに開発した NIGA の汎用性についても十分な検討がなされていないものと思われる。

本論文は、これらの問題を調査するためにまず、NIGA の汎用性を確認できるカンボジア（シエムリアップ省）における配電システムのデータを入手することができたので、この時想定されるバンク事故について解析し、その有用性が考察されている。そしてその際、操作することになる区分開閉器の切替回数についても同時に探索が行われている。すなわち、本手法となる NIGA により、想定されるいくつかのバンク事故ケースに対する一連の探索を実行し、それぞれ未復旧負荷量が最小となる領域を決定することになる。さらに、切替回数や配電損失などを考慮した結果により、事故における最も効果的な配電システム事故復旧問題の改善が図られることになる。本稿では、これを検討するために本手法となる NIGA の汎用性と切替回数の解析結果から検討したものである。

*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. 配電システムの停電領域最小化

一般に、配電システム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一部の区分開閉器を開放した、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、簡単な系統事故復旧操作を示すために、Fig. 1(a)に示す例題配電システムモデルを用いて解説する。白丸印は区分開閉器の ON(閉)状態、黒丸印は OFF(開)状態、更に両端は電源(配電変電所バンク)をそれぞれ示したものである。そして Fig. 1(b)は、その配電システムにバンク事故が生じた時の停電区間を表わしたものである。Fig. 1(c)は、このとき区分開閉器 2 と 6 の切替え操作により停電区間を縮小し、復旧した事例である。この場合、区分開閉器数は系統内に 8 個存在しており、探索すべき組み合わせ数は $2^8=256$ 通りとなる。この程度であれば最適化は容易なものとなるが、本稿で後述検討する系統にある区分開閉器数は 82 となり、その組み合わせ数は $2^{82}=4.83 \times 10^{24}$ 通りを扱う膨大な組み合わせ最適化問題となる。このような場合に対しても、停電区間に残る未復旧負荷量を最小とするように区分開閉器を操作し、系統を構成する必要がある。その際、電力潮流の変化に伴い配電損失も随時変化するため、得られた未復旧負荷が最小であっても、できる限り配電損失の最小化が図れるような検討が実施されなければならない。さらには、機器の寿命に関わる区分開閉器の切替回数についても同時に考慮する必要があるものと考えられる。

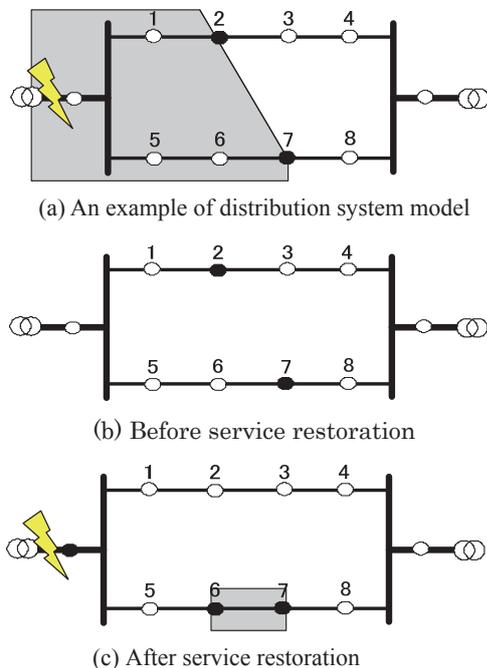


Fig. 1 An example of restoration.

2.1 本問題の定義

本問題は、系統運用上の制約条件を満足しつつ、未復旧負荷の最小となる系統状態を決定すると同時に、配電損失や切替回数についても可能な限り小さくなるような区分開閉器の開閉状態を決定することを目的としている。そのため、取り扱う配電系

統モデルは、次のような仮定で実施される。

- ・ 負荷は各区間に平等に分布しており、定電流で既知とする
- ・ 各区間のインピーダンスは既知とする

2.2 目的関数と適応度

本稿で取り扱うモデル系統に対して、未復旧負荷、配電損失さらに切替回数の最小化を図る系統を構成するための目的関数 J_i は次のように定義し、その逆数を適応度 f_i とする。

$$J_i = W_1 \sum_{m=1}^L inn_m + W_2 \sum_{n=1}^L loss_n + W_3 sw \quad \dots \dots \dots (1)$$

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

ここで、 $W_1 \sim W_3$: 重み係数、 inn_m : 区間 m の未復旧負荷、 $loss_n$: 区間 n の配電損失、 L : 負荷区間数、 sw : 区分開閉器の切替回数、 f_i : 適応度、 i は NIGA 内で生成される個体番号。

2.3 系統運用上の制約条件

復旧目標系統を構成する過程において、系統内の区分開閉器や潮流状態は、その都度に変化することになるが、如何なる場合も以下に示す制約を満足しなければならない。

- ① 放射状制約
配電システムは、配電用変電所バンクを最上位とする放射状を維持しなければならない。
- 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 バンク電流容量制約
あるバンクによって電力が供給されている負荷の総和が、そのバンクの容量を超えてはならない。
- ④ 電圧降下許容容量制約
系統最上位から各末端までの電圧降下が、許容容量以内となっていないなければならない。
- ⑤ 健全区間制約
事故時に健全であった区間が、復旧の過程及び復旧後に停電区間となってはならない。
なお、制約②、③、④および配電損失についての詳細は参考文献¹⁰⁾にある付録部分に記載されているので参照していただきたい。

3. NIGA による探索手法について

停電領域の最小化を図るために適用した NIGA を遺伝的アルゴリズムの手順に基づいてその詳細を記述する。

[手順 1: 個体の表現] パラメータとして用いる遺伝子長は系統内の区分開閉器の開閉状態に対応させる。すなわち、区分開閉器が閉状態を 1、開状態を 0 として開閉器番号と遺伝子番号を一致させ、順に並べたものを 1 個体として表現する。これに故障事故が生じた場合には、この事故区間が及ぼす開

閉器のみを開放し、これを事故状態の個体として表現する。また、効果的な復旧を図るためにパラメータの設定は 2bit として表現している。例えば、170 の区分別閉器をもつ個体は、Fig. 2 として表現されることになる。

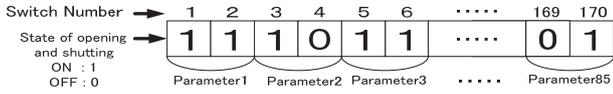


Fig. 2 Expression of an individual.

[手順 2：初期生物集団] 手順 1 で生成された事故状態の個体に対して、いずれかのパラメータを乱数で選択し、適当な状態に変化させた個体を m_0 個生成する。但し、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。また、評価した個体に対しても、いずれかの制約を逸脱している場合は、個体としては採用せず、これまでと同様な操作により m_0 個の個体が生成されるまで操作を実行することになる。このような操作は、以下の交叉及び突然変異についても同様である。

[手順 3：淘汰・交叉] 本手順では、世代を繰り返すごとに適応度の大きい順に並べられた個体の下位 4 割が淘汰される。交叉ではその淘汰された個体数を新たに生成する操作が行われる。その際、NIGA による区分別閉器の探索が行われることになる。そして最終的に目標となる復旧システムは、事故状態で生じていた停電区間のみとなるのが理想的である。このようなシステムに対して検討した文献¹⁾によると、停電区間が事故地点近辺に集中して存在することになる。また文献^{5,6)}では、最終的な停電区間が事故状態の停電区間内に分散する結果となり、この場合には後者が良好な結果を得ることができ

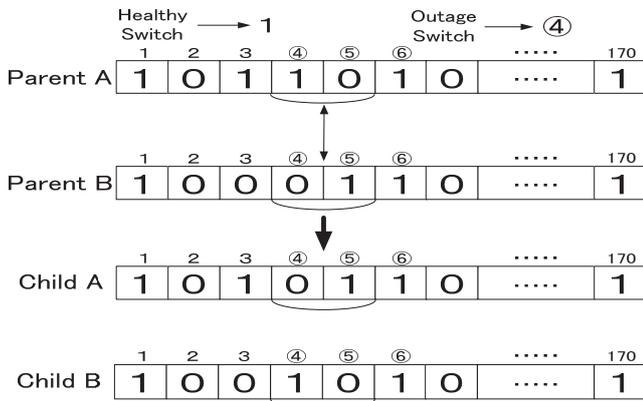


Fig. 3 Practice example of crossover.

ることが報告されている。NIGA では、上記事項を考慮し、交叉は停電区間内にあるパラメータのみ実施する。この操作は、事故状態にある停電区間内の探索回数を多くすることでその区間内の組み合わせ数を増加し、良好な解が得られる可能性を高めた

ものである。また、健全区間にある区分別閉器の切換えをできるだけ最小限に抑えたものである。このような操作を行う親個体は、ルーレット方式によって選択され、Fig. 3 に示す 2 点交叉によって子個体を生成することになる。

[手順 4：突然変異] Fig. 4 はバンク事故による初期の停電区間状態を示したものである。一般的な GA ならば、選択された遺伝子のみを変化させる操作だけであるが配電系統事故復旧問題においては、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、本手法となる NIGA では Fig. 5 に示すように開閉器番号 3 が選択されたときに、その分岐点で変更できる開閉器番号が 4 だけでなく、2, 7 についても切り替えが可能となっている。そのため、1 回の制御で大幅な停電区間の減少を期待できる探索アルゴリズムとなっている。さらに、Fig. 6 で示したように 2 番、5 番またはバンクに最も近い箇所(8 番)についても選択可能となっている。具体的には、システム内にある全ての分岐点の開閉器番号に隣接している箇所をプログラム内に記憶させ、突然変異により選択された箇所だけでなく、そこに隣接するすべての開閉器番号を変更することにより、その切替範囲を拡大したものである。

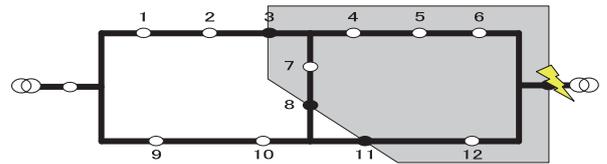


Fig. 4 Initial condition.

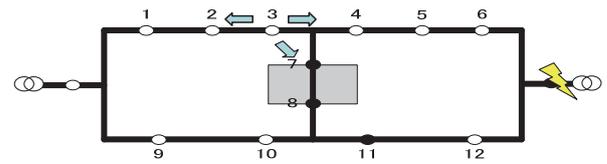


Fig. 5 Method of IGA.

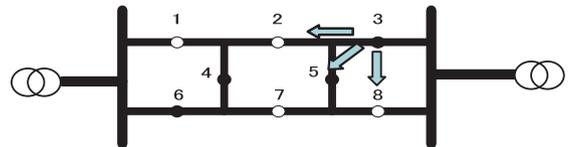


Fig. 6 Proposed method.

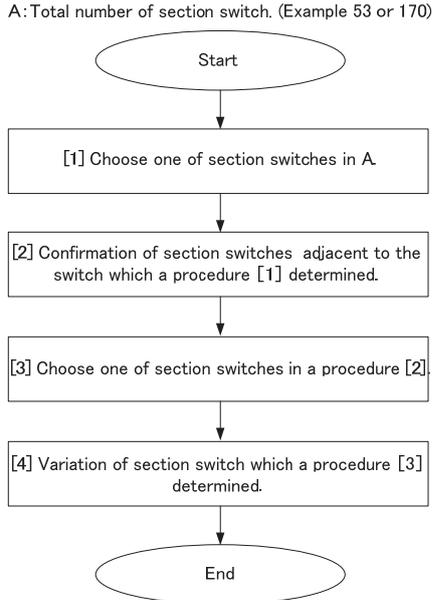


Fig. 7 Flowchart of mutation.

Fig. 7 は、NIGA による突然変異のアルゴリズムを示したフローチャートである。まず、[1]で一様乱数によって系統に存在する全ての区分開閉器（本問題では A に示した区分開閉器数）の中から1つ選択する。次に[2]で選択した区分開閉器に隣接する区分開閉器数を、前述したように予め記憶させておいたプログラムにより確認する。そして、[3]で隣接する区分開閉器の中から一様乱数によって1つ選択する。最後に[4]で、選ばれた区分開閉器の切替を行っている。すなわち、NIGA による突然変異によって、これまでよりも区分開閉器の制御箇所の選択範囲を広げ、その制御能力を向上することができる操作が追加されたものである。このアルゴリズムは一般的な GA が本来、苦手な探索とされている局所的な探索にも有効であり、これまでよりも精度の向上を図ることが期待できる手法となっている。

4. シミュレーションモデルとその結果

本稿では、まず未復旧負荷量の最小化を図るために NIGA によるアルゴリズムの汎用性を確認する。そのため、カンボジアのシェムリアップ省における配電系統に適用する。そして、この時想定されるバンク事故について解析を実行し、本手法の有用性が考察されている。次に、目的関数に新たな切替回数を導入していることから区分開閉器の遠隔操作不可の箇所を任意に考慮した動作設定に基づいた検討を実行している。以下、そのシミュレーション条件とそれらの結果について記述する。

4.1 カンボジア（シェムリアップ省）配電系統とその運用条件

本節は、カンボジアにあるシェムリアップ省の配電系統モデルに対してバンク故障事故（配電変電所事故）を想定し、検討を行ったものである。このときの区分開閉器の操作回数は、復旧時間を考慮し、遠隔操作不可能な開閉器における1回の操作を遠隔操作可能な開閉器の10回分の操作として換算している。さらに系統内に供給できる系統構成をバンク数：4 (Tr1：500 A, Tr2, Tr3：300 A, Tr4：600 A)、区分開閉器数：82、負荷区間数：122としている。その際、各バンクが供給する領域の負荷状況を色分けし Fig. 8 に記述する。供給負荷容量の総和値は1429 A (=398+251+240+540) である。また、これに対する送り出し電圧は6600 Vであり、その負荷は各区間平等分布とし、負荷力率を1.0とする。そして、このときの系統最上位から末端までの電圧降下許容容量制約は660 Vとする。本問題では、Tr1～Tr4 (CASE1～CASE4) の各バンクによる事故を想定している。例えば、Tr1 (CASE1) の故障事故では Fig. 8 に示すように黒枠内部分が初期状態の停電区間となり、この場合の未復旧負荷量は398 Aとなる。この状態から NIGA による探索が実行されることになる。また、図中の太線は幹線、細線は支線をそれぞれ表わし、そのときの線路電流容量はそれぞれ1000 A, 325 Aとなっている。CASE1の事故ケースでは、健全バンク電流容量の総和が1200 Aとなり、負荷容量の総和値である1429 Aを下回ることになる。したがって、一部(229 A以上)が停電区間として未復旧負荷量が残る配電系統モデルを取り扱うことになる。他の事故ケースについても同様に Tr2 と Tr3 では29 A以上、Tr4 では329 A以上の停電区間が NIGA による探索後においても未復旧負荷量を残す系統状態について検討することになる。さらに、図中にある星印(赤)は、遠隔操作不可能な区分開閉器の箇所を示している。これを評価するための目的関数となる(1)式の重み係数は未復旧負

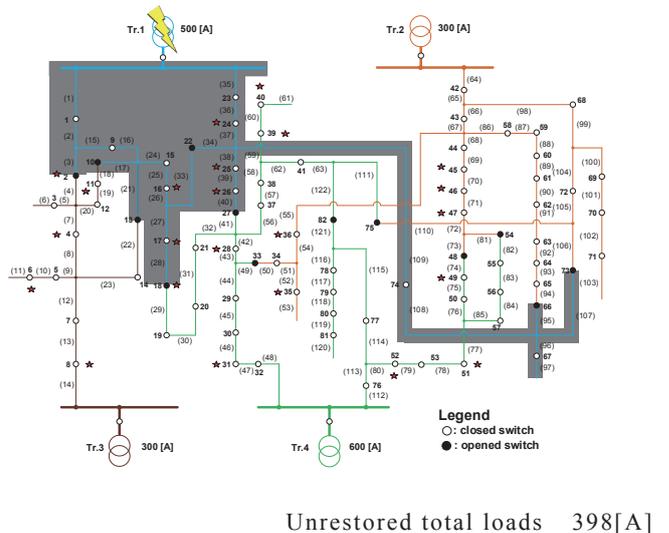
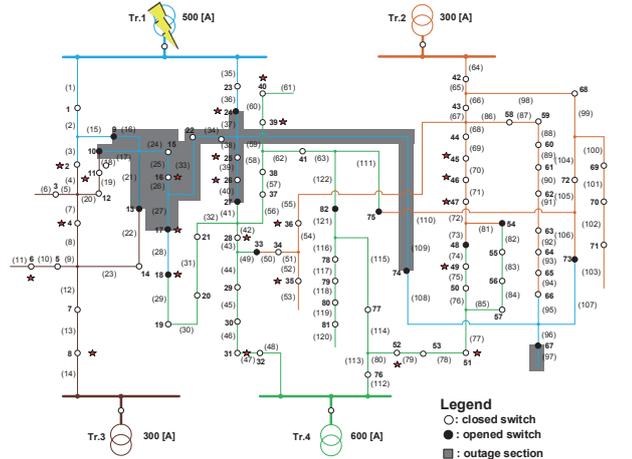


Fig. 8 Distribution system model (CASE1).

荷量の最小化を図るため $W_1=1$, $W_2=0.000333$, $W_3=0.003$ と設定している。これらに基づいて NIGA による計算では、個体数 40, 突然変異率 50%, (実施する突然変異は、一般的な GA とは異なるため、突然変異率を突然変異させる個体を選択する確率であると定義し、実行している。) 終了世代数 100 として実施し、これによる検討は一樣乱数の初期値を 1~100 まで変更し、解析を実施している。

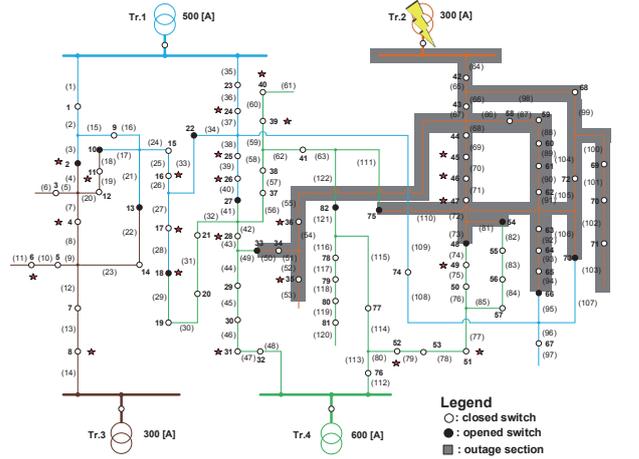
4.2 各事故ケースによる計算結果と考察

Fig.9 は著者らの NIGA によって得られた CASE1 の場合の事故復旧状態を示したものである。これによると、Fig.8 に対して 4 区間で区分開閉器の操作により停電区間の解消(青線部分)が図られ、未復旧負荷量 252[A]を残す結果となっている。同様に Fig. 10, Fig. 11 は、CASE2 における事故状態(251 A)からの復旧状態(57 A), Fig. 12, Fig. 13 は、CASE3 における事故状態(240 A)からの復旧状態(119 A), Fig. 14, Fig. 15 は、CASE4 における事故状態(540 A)からの復旧状態(397 A)をそれぞれ示したものである。いずれのケースも本問題で目標とする未復旧負荷量の改善が図られていることがわかる。Table 1 は各事故ケースに対して本手法の NIGA により求められる 100 回の施行による未復旧負荷量の最良値を示したものである。これによると未復旧負荷量の復旧率が最も高いのは、CASE2 の 77.3%であり、低いのは CASE4 の 26.5%となっている。この理由は、本システムの負荷容量総和値である 1429 A に対して各事故ケース後にある各バンクの供給能力差 (CASE1: 1200 A, CASE2: 1400 A, CASE3: 1400 A, CASE4: 1100 A) によるものと考えられる。さらに、表 1 には各事故ケースにおける事故復旧までの切替回数、復旧後の電力損失などが示されている。



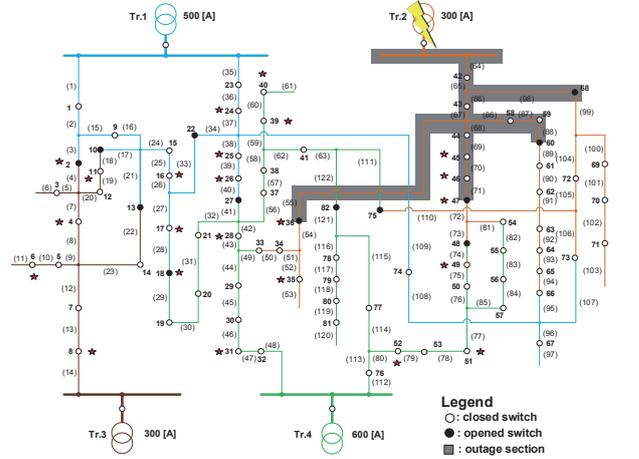
Unrestored total loads 252 A

Fig. 9 Service restoration result by NIGA (CASE1).



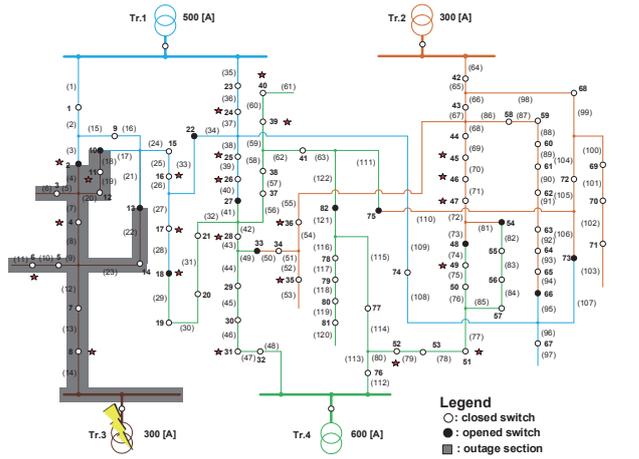
Unrestored total loads 251 A

Fig. 10 Distribution system model (CASE2).



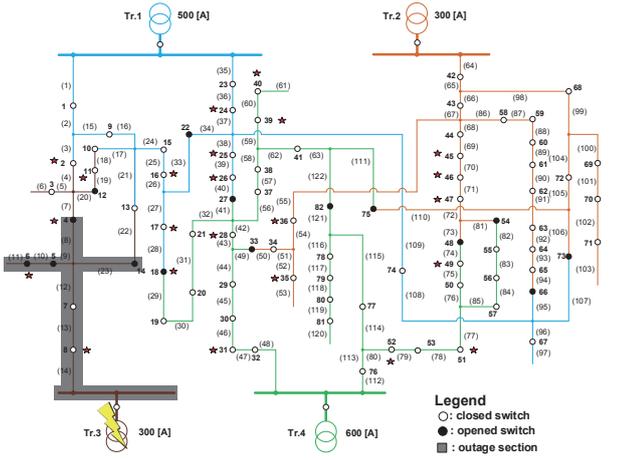
Unrestored total loads 57 A

Fig. 11 Service restoration result by NIGA (CASE2).

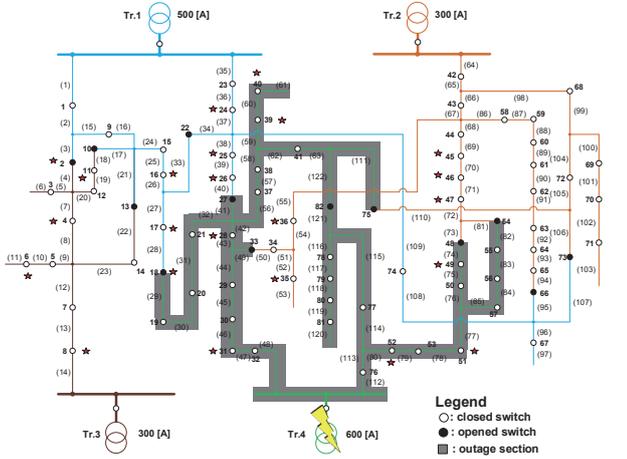


Unrestored total loads 240 A

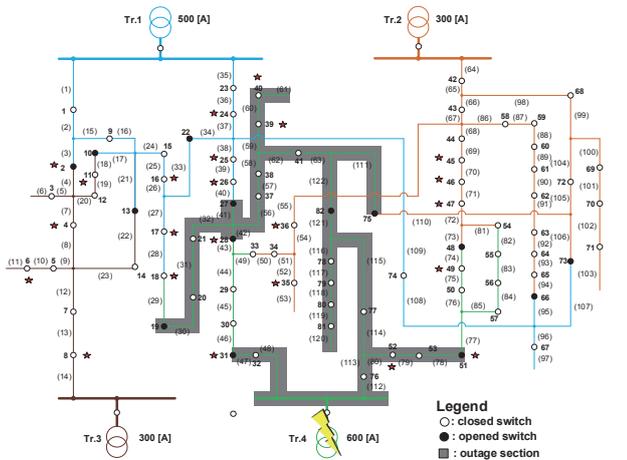
Fig. 12 Distribution system model (CASE3).



Unrestored total loads 119 A
Fig. 13 Service restoration result by NIGA (CASE3).



Unrestored total loads 540 A
Fig. 14 Distribution system model (CASE4).



Unrestored total loads 397 A
Fig. 15 Service restoration result by NIGA (CASE4).

Table 1 Best result of service restoration for each case

Case	Original Outage Section [A]	Unrestored Load [A]	Percentage of Restoration [%]	Number of Switching	Loss [W]	Difference with Residual Quantity Unrestored Load [A]
1	398	252	36.7	52	8,958.11	23
2	251	87	77.3	48	10,851.67	28
3	240	119	50.4	62	10,952.17	80
4	540	397	26.5	56	11,643.02	68

表の最後には、復旧後の未復旧負荷量の値が各ケースで、最大復旧できる負荷量の値に対してどの程度の残量値となっているかを検討したものである。(例えば、CASE1では $252-229=23$ となる。)これによると CASE1 の場合に行われた NIGA の探索結果が最も効果的な値を示しており、CASE3 時における探索効率も最も劣る結果となっていることがわかる。なお、本報告は、任意時間の負荷状態におけるシェムリアップ省事故に対する復旧状態を検討したものである。そのため、重潮流時には更に復旧が困難となり、本問題よりも未復旧負荷量が増加する傾向となる。一方、軽潮流時には逆に復旧が容易となり、本問題よりもさらに未復旧負荷量が軽減でき、良好な結果が得られることになる。

5. まとめ

本論文は、本研究室で開発した NIGA の汎用性を確認するためにカンボジア (シェムリアップ省) における配電システムのデータに対してバンク事故を想定し、事故時の負荷状態からの復旧後の負荷状態について解析した。その際、その切替回数や電力損失についても同時に検討している。結果として、いずれの事故ケースについても未復旧負荷量を軽減できることが明らかとなり、NIGA の汎用性が確認された。また、復旧効率については最も事故後に供給能力の少ない場合(CASE4)に、未復旧負荷量を軽減することが難しいものになることが明らかとなった。しかし、残量となる未復旧負荷量に対しての探索効率については、この手法の探索結果によると CASE3 の場合が最も悪い結果となっていることがわかる。さらに、これまでほとんど報告されてない各事故ケースにおける区分開閉器の切替回数についても未復旧負荷量が最良値となる操作回数をそれぞれ算出できることを明らかにしている。そして、その時の配電損失量についても同時に示されている。

しかしながら、配電システム事故復旧問題は、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、多くの考慮すべき事柄が存在するものと思われる。そのため、今後は未復旧負荷量だけでなく、区分開閉器の復旧手順・復旧時間など多くの事象を考慮できる多目的最適化問題に取り組んでいく予定である。また、より効果的なアルゴリズムを構築し、さらなる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, 110, 9, pp.710-718 (1990-9).
- 2) 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, 111, 5, pp.543-551 (1991-5).
- 3) 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).
- 4) 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理計画的方式」, 電学論 C, 120, 2, pp.229-235 (2000-2).
- 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, NLP2002-55, 68, pp.37-42 (2002-9).
- 6) 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, 124, 3 pp.404-412 (2004-3).
- 7) 濱上知樹・海野富士也・宍道 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」, 明電時報, 309 号, No.4 pp. 98-102(2006).
- 8) 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, PE-05-131 pp.19-22(2005).
- 9) 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, 126, 3, pp.336-346 (2006-3).
- 10) 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, 127, 7, pp809-816 (2007-7).
- 11) 道端郁夫・青木秀憲：「配電系統事故復旧問題への改良型遺伝的アルゴリズムの適用」, 電学論 B, 129, 1, pp.32-39 (2009-1).