

停電する電力量を最小とする配電系統の復旧論理の開発

日大生産工 (院) ○ 神 直亨
日大生産工 佐藤 正弘

1. まえがき

図 1 (a) に示すように、配電系統は放射状に構成されている。配電系統において配電用変電所や幹線で事故が発生すると、変電所の下位系統が停電する。そのため、開閉器の ON/OFF の状態を切替えて、隣接する健全な系統から停電区間に電力を融通する。本研究の目的は、停電する電力量を最小とするように配電系統の各開閉器の ON/OFF 状態を選び、それを解として決定することである。各開閉器の ON/OFF の状態を、解のひとつの候補とすると、配電系統内の開閉器の総数が N の場合、候補の数は 2^N となる。全ての候補を探索すれば、停電区間の負荷量が最小となる解を選択することができるが、 N が大きくなると候補は膨大な数になるので、短時間で探索することはできない。そのため、遺伝的アルゴリズムやタブー検索などのメタヒューリスティクスなどを適用した多くの研究^{(1)~(6)}がなされている。しかし、これらの手法は候補の一部しか探索しないため、停電区間の負荷量が最小とならない場合がある。

本稿では、停電する電力量が最小となる候補を探索する方法および探索の高速化を検討した。

2. 配電系統の構成と事故復旧論理

図 1 (a) に配電系統モデルを示す。A, B, C はそれぞれ配電用変電所である。各変電所から放射状に構成された系統を、配電系統 A, B, C とする。配電系統は信頼性を確保するためにループを含んで構成されており、いくつかの区分開閉器を開放することにより放射状に接続され運用される。図 1 (a) において○で示されるものは区分開閉器であり、□は隣接する配電系統間の連系開閉器である。このうち●は開閉器の状態が ON であり、○は OFF を示す。連系開閉器は平常時においては OFF であるが、停電区間に他の健全な系統から電力を融通する際に ON となる。

変電所 B でフィードの断線や配電用変電所設備が故障した場合、図 1 (b) に示すように変電所 B の下位系統が停電する。停電した系統 B を停電区間、それ以外の系統を健全区間と言う。復旧のために配電線を一旦無充電とするため、停電区間の区分開閉器は全て OFF にされる。停電区間を復旧するために、図 1 (c) に示すように開閉器の ON/OFF 状態を切替えることにより、停電区間を分割して隣接する健全区間に接続する。

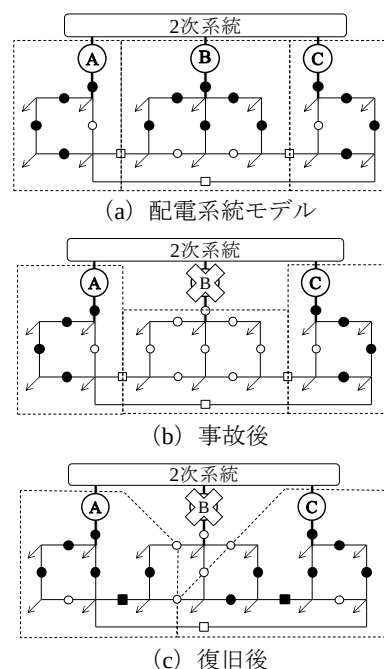


図 1 配電系統の構成と事故復旧

〈2・1〉配電系統の事故復旧 配電系統復旧において停電区間の接続の仕方によっては、変電所や各線路で過負荷となる、あるいは電圧降下によって電力品質を保てなくなることがある。そのため、配電復旧はこれらの条件を満たし、かつ、停電する電力量を最小にする開閉器の組合せを求める最適化問題となる。

配電系統を次のように仮定した。

- (1) 負荷は力率 1 の定電流とし、集中負荷とする。
 - (2) 各線路のインピーダンスは既知とする。
- 配電系統では以下の制約条件を満たす必要がある⁽¹⁾。

- (1) 放射状制約…配電系統は放射状でなくてはならない。
- (2) 健全区間制約…健全区間を復旧過程および復旧後に停電させてはならない。
- (3) 線路電流容量制約…各線路に流れる電流は、その線路の線路電流容量を超えてはならない。
- (4) 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、その変圧器の上限値を超えてはならない。
- (5) 電圧降下許容量制約…各配電用変電所から各末端までの電圧降下が、許容範囲内でなくてはならない。

3. 停電する電力量を最小とする復旧論理

〈3・1〉探索の基本的な考え方 本手法は、変電所で事故が発生し、下位の配電系統が停電した場合を復旧対象とする。提案する手法は、次の2段階から成る。一段階目では、過負荷などを無視したとき全ての負荷に電力を供給できる放射状構成となる候補のみを選択する。二段階目は、配電系統の潮流分布を見たとき、過負荷を生ずる場合、負荷の一部を解列しながら制約を満足する解を探索する。

(1) 一段階 放射状制約および線路容量制約を満たす候補を全数探索によりすべて選択する方法⁽⁵⁾や、開閉器に付帯情報を追加することで放射状構成を得られやすくする方法⁽⁶⁾が提案されている。それを基に本手法では、まず、図2に示すように、系統全体の開閉器を健全区間と停電区間に分け、表1に示すように健全区間内の各開閉器のON/OFFの状態を1/0表示情報の集合をサブ候補1（以下集合Xと称す）、表2に示すように停電区間の開閉器のON/OFFの状態を表す情報の集合をサブ候補2（以下集合Yと称す）とする。次に、多数のサブ候補1、2の中から図3(a)に示すように、全ての負荷に電力が供給できる放射状構成となるサブ候補1およびサブ候補2の以外は全て除外する。

(2) 二段階 まず、図3(a)に示すように、Xの中から一つのサブ候補1を選択する。次に、Yから一つのサブ候補2を選択し、サブ候補1と組合せ、系統全体の開閉器のON/OFFの状態を示す候補とする。候補により構成される系統に、過負荷が発生する場合、図3(b)に示すように、過負荷が解消でき、電圧降下許容量制約を満たし、さらに復旧電力量が最大となる組合せを探索し、それを解の候補とし、復旧した負荷量を復旧電力量Sとする。これを集合Yの全てのサブ候補2について繰り返し、さらに、集合Xのサブ候補1について繰り返すことで、全ての放射状構成を探索する。

最初に得た解の候補の復旧電力量Sを復旧電力量の最大値 S_{MAX} とする。その後、解の候補を得た時に(1)式のように復旧電力量Sが復旧電力量の最大値 S_{MAX} より大きい場合、復旧電力量Sを復旧電力量の最大値 S_{MAX} とする。これを繰り返すことによって、復旧電力量の最大値 S_{MAX} となる解の候補を復旧電力量が最大となる系統構成として選択することが可能である。

$$S > S_{MAX} \dots \dots \dots (1)$$

本手法により、すべての放射状構成となる候補を探索することが理想であるが、開閉器の数が膨大になるとすべての候補を短時間で探索することはできなくなる。そのため、探索する候補をさらに絞り込むことが重要となる。そこで、探索する候補を可能な限り減少させる方法を以下で述べる。

表1 サブ候補1の集合X

	開閉器番号										
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0
2	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0
3	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
⋮											

表2 サブ候補2の集合Y

	開閉器番号										
	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲	⑳		
1	1	1	0	0	1	1	0	1	1		
2	1	0	1	0	1	1	0	1	1		
3	1	1	1	0	0	1	1	1	0		
⋮											

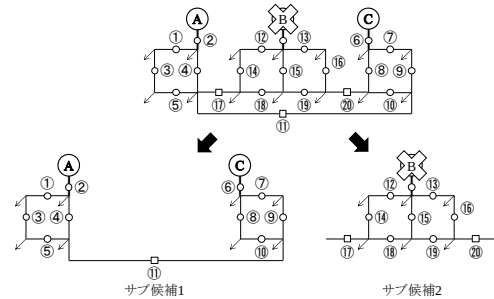


図2 サブ候補1およびサブ候補2

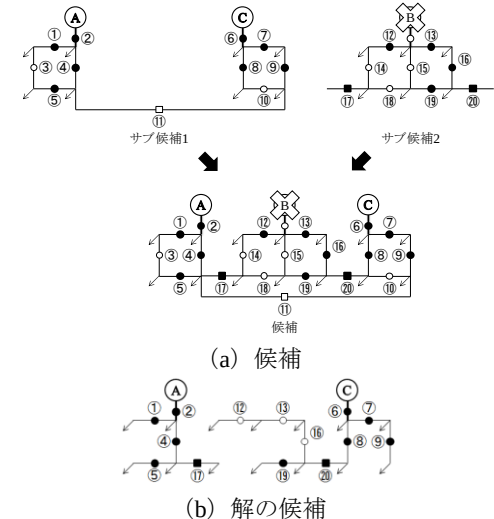


図3 探索方法の基本的な考え方

〈3・2〉探索する候補を減少させる方法 解を探索する過程で、すでに探索した候補の復旧電力量の最大値 S_{MAX} よりも探索する候補の停電区間に融通できる電力量が小さい系統構成は、探索する必要はない。そこで、解を短時間で得るために、既に探索した候補の復旧電力量と応援可能電力量を比較する方法で探索する候補を減らせることと、電力が供給できない負荷を切り離すことで探索範囲を絞り込む方法を例を用いて述べる。

(1) 復旧電力量が最大とならないサブ候補1 例として、図4(a)に示すサブ候補1の連系開閉器⑰の応援可能電力量 P_p は2[pu]、連系開閉器⑳の応援可能電力量 P_p は2[pu]であることから、応援可能電力量の総和 ΣP_p はその合計4[pu]となるので、復旧することができる負荷量は最大4[pu]なる。そのため、このサブ候補

1 を選択した時点で、すでに探索した候補の復旧電力量の最大値 S_{MAX} が 4[pu]より大きいとき、復旧電力量が最大とならないため、探索を打ち切ることこのサブ候補 1 を用いたすべての候補の探索を省略できる。したがって、(2) 式が成立するとき、探索を打ち切る。

$$S_{MAX} > \sum P_p \dots \dots \dots (2)$$

(2) 復旧電力量が最大とならない候補 例として、図 5 に示す候補の連系開閉器⑪に接続されている負荷量 ΣS_L は 1[pu]、応援可能電力量 P_p が 2[pu]であるので、接続されている負荷の内、復旧できる負荷量 S_T は最大 1[pu]となる。また、連系開閉器⑫に接続されている負荷量 ΣS_L は 5[pu]、応援可能電力量 P_p が 2[pu]であるので、復旧できる負荷量 S_T は最大 2[pu]となる。よって、復旧できる負荷量の総和 ΣS_T は 3[pu]となる。そのため、この候補を選択した時点で、すでに探索した候補の復旧電力量の最大値 S_{MAX} が 3[pu]より大きいとき、復旧電力量が最大とならないため、探索を打ち切ることこの候補の探索を省略できる。よって、(3) 式が成立するとき、探索を打ち切る。

$$S_{MAX} > \sum S_T \dots \dots \dots (3)$$

(3) 電力が供給できない負荷の切り離し まず、過負荷が生じている系統において、図 6 (a) に示すように、連系開閉器から系統内の末端までの最短ルートを通じて選択する。次に各ルートにおいて電力が供給できない負荷を切り離す。連系開閉器⑨ではルート 1、ルート 2 が考えられる。連系開閉器⑨の応援可能電力量は 2[pu]であるため、ルート 1 では末端負荷 (4) まで供給可能であるが、ルート 2 では負荷 (3) までが供給可能となるため、図 6 (b) に示すように、開閉器①、②を OFF にすることで負荷 (1)、(2) を切り離す。

このように、電力が供給できない負荷を切り離すことで探索する範囲を絞り込む。

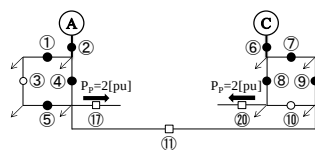


図 4 サブ候補 1 の応援可能電力量

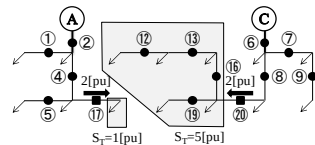
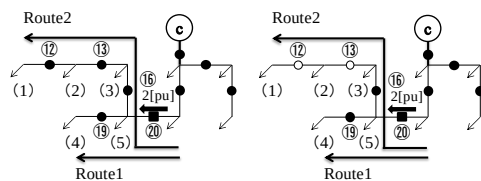


図 5 接続されている負荷量



(a) 電力が供給されるルート (b) 負荷の切り離し
図 6 電力が供給できない負荷の切り離し

〈3・3〉 解を探索する手順

〈3・1〉 節で述べた 2 段階目のサブ候補 1 の選択は次の 3Step で行う。

Step1…健全区間の開閉器の状態を変更しないサブ候補 1 を選択する。

Step2…一次隣接系統の開閉器の状態を変更するサブ候補 1 を選択する。

Step3…一次隣接系統と二次隣接系統の連系開閉器の状態も変更するサブ候補 1 を選択する。

健全区間の開閉器の操作回数を最小にするために、全ての停電区間を復旧できる解が得られた Step で、探索を打ち切る。

〈3・1〉 節に示した探索方法と 〈3・2〉 節に述べた方法を組合せて、以下の手順で解を探索する。

(手順 1) Xの中からサブ候補 1 を選択し、過負荷の確認を行う。過負荷が生じている場合、次のサブ候補 1 を選択する。

(手順 2) $\sum P_p$ を求め (2) 式が成立するか判断する。(2) 式が成立するとき、探索を打ち切り手順 1 に戻る。

(手順 3) Y からサブ候補 2 を選択し、サブ候補 1 と組合せ、系統全体の開閉器の ON/OFF の状態となる候補とする。次に、応援できない負荷を切り離す。

(手順 4) $\sum S_T$ を求め (3) 式が成立するか判断する。(3) 式が成立するとき、探索を打ち切り手順 3 に戻る。

(手順 5) 手順 4 で得られた候補に、過負荷が生じているか確認する。過負荷が発生しない場合、候補を解の候補とする。過負荷が発生する場合、過負荷を解消するために、電圧降下許容量制約を満たし、かつ、復旧電力量が最大となるように負荷の一部を切り離し、解の候補とする。解の候補の S を求め、(1) 式が成立するとき、 S_{MAX} を S とする。

(手順 6) サブ候補 2 を全て選択するまで手順 3～5 を繰り返す。

(手順 7) 探索を打ち切るまでサブ候補 1 を選択し、手順 1～6 を繰り返す。

(手順 8) 復旧電力量が S_{MAX} となる解の候補の中から、開閉器の操作回数が最小かつ配電損失が最小となる解の候補を解とする。

4. シミュレーション

〈4・1〉 小規模系統 図 1 に示す 17 ノード、20 ブランチの配電系統モデルを用いた。提案手法と全ての候補 (2²⁰) を探索した結果を検討し、提案手法の有効性を確認した。結果を表 3 に示す。本ケースでは全ての候補の探索により、復旧電力量が 13[pu]となる解が 12 個存在することが確認できる。提案手法では復旧電力量が 13[pu]となる 12 個の解をすべて得ることができた。計算時間については、全ての候補の探索した場合約 3[s]程度であるが、提案手法は 10⁻⁷[s]以下となった。

〈4・2〉 47 ノード、57 ブランチの配電系統モデル 文

献 (1) を参考に、図 6 に示す 47 ノード、57 ブランチの配電系統モデルを用いて検討した。表 4 に示す Case1~4 は変電所 1~4 で事故を仮定したものである。各 Case において、各 Step の未復旧電力量および解を得るまでの時間を示す。また、図 7 に Case4 の復旧系統図を示す。

(1) 得られた解の供給電力についての検討

(Case1) Step1 では全復旧できないため、Step2 を行い、未復旧電力量が 2.05[pu]となる解が 2 つ得られた。Step3 を行う系統が存在しないため探索を終了した。

(Case2) Step1 で全復旧できる解が 4 つ得られた。

(Case3) Step2 で全復旧できなかったため、Step3 を行った。未復旧電力量が 0.99[pu]となる解が 4038 個得られた。Step3 でも Step2 より復旧電力量が増えなかった。未復旧電力量が同じ解が複数得られたため、解は開閉器の操作回数を最小とするため、Step2 の解の候補が選択された。Step3 で Step2 より損失が小さくなる解を確認できた。

(Case4) Step2 を行った結果、未復旧電力量が 1.42[pu]となる解が 1 つ得られた。

(2) 計算時間についての検討 各 Case における解を探索する計算時間は、Step1 では 0.1 秒程度、Step2 では 2.2 秒以下、Step3 では 50 秒程であり、短時間で未

表 3 小規模系統による結果

全ての候補の探索			提案手法		
S _{MAX} [pu]	解の数	計算時間[s]	S _{MAX} [pu]	解の数	計算時間[s]
13	12	3.04	13	12	10 ⁷ 以下

表 4 57 ブランチの配電系統による結果

Case	Step 1		Step 2		Step 3	
	未復旧電力量[pu]	計算時間[s]	未復旧電力量[pu]	計算時間[s]	未復旧電力量[pu]	計算時間[s]
1	2.45(41%)	0.015	2.05(34%)	0.765		
2	0(0%)	0.001				
3	1.86(58%)	0.001	0.99(31%)	0.279	0.99(31%)	14.694
4	2.33(48%)	0.062	1.42(29%)	0.688		

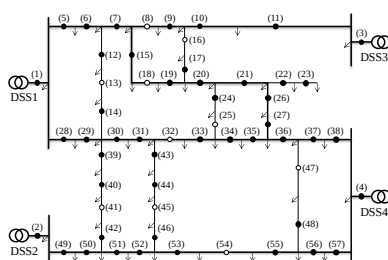


図 6 配電系統モデル

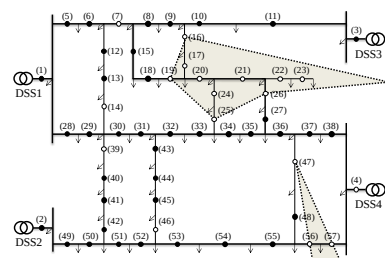


図 7 復旧系統図 (Case4)

復旧電力量が最小となる系統構成を得ることができた。

5. まとめ

本稿では、配電系統が停電した時に、隣接する健全系統から電力の融通を受け復旧する場合に、停電する電力量が最小となる開閉器の ON/OFF の状態を決定することを目的とし、停電する電力量が最小となり得る候補を効率的に探索する方法を提案した。

まず、配電系統の構成から、放射状構成にするために、サブ候補を選択した。そして、選択したサブ候補を用いて、停電する電力量が最小とならないサブ候補 1 や候補の探索を打ち切り、解を短時間で探索する方法を提案した。提案した手法の有効性は、モデル系統を用い、停電する電力量の最小化と計算時間について検討し確認できた。

文 献

- (1) I. Michibata and K. Aoki: "Application of Improved Genetic Algorithm to Service Restoration Problem for Distribution Systems", T. IEE Japan, Vol. 129-B, No. 1, pp. 32-39 (2009-1) (in Japanese)
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)
- (2) A. Furuta and H. Mori: "Application of Parallel Tabu Search Based Hierarchical Optimization to Distribution System Service Restoration", T. IEE Japan, Vol. 126-B, No. 1, pp. 21-28 (2006-1) (in Japanese)
古田 篤広・森 啓之:「配電系統復旧制御への並列タブサーチを用いた階層的最適化手法の適用」, 電学論 B, 126, 1, pp. 21-28 (2006-1)
- (3) H. Fudo, S. Toune, T. Genji, Y. Fukuyama, and Y. Nakanishi: "An Application of Reactive Tabu Search for Service Restoration in Distribution Systems and its Comparison with Genetic Algorithm and Parallel Simulated Annealing", T. IEE Japan, Vol. 199-B, No. 3, pp. 317-325 (1999-3) (in Japanese)
不動 弘幸・藤根 栄・元治 崇・福山 良和・中西 要祐:「負荷融通問題に対する Reactive Tabu Search の適応と GA 及び PSA との比較検討」, 電学論 B, 119, 3, pp. 317-325 (1999-3)
- (4) T. Nagata, J. Jin, S. Hatakeyama, and H. Sasaki: "A Mathematical Programming Approach to Service Restoration for Distribution Systems", T. IEE Japan, Vol. 120-C, No. 2, pp. 229-235 (2000-2) (in Japanese)
永田 武・金 鈞・畠山 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な方法」, 電学論 C, 120, 2, pp. 229-235 (2000-2)
- (5) H. Takano, Y. Hayashi, J. Matsuki, and S. Sugaya: "A Determination Method of the Restoration Configuration Considering Many Connections of Distributed Generators", T. IEE Japan, Vol. 131-B, No. 2, pp. 187-195 (2011-2) (in Japanese)
高野 浩貴・林 泰弘・松本 純也・菅谷 周平:「分散型電源導入拡大に対応した復旧目標構成の決定手法」, 電学論 B, 131, 2, pp. 187-195 (2011-2)
- (6) T. Sawa, T. Furukawa, Y. Kobayashi, and S. Tamura: "Radial Network Configuration Method Using Genetic Algorithm", T. IEE Japan, Vol. 121-C, No. 11, pp. 1780-1787 (2001-11) (in Japanese)
澤 敏之・古川 俊行・小林 康弘・田村 滋:「遺伝的アルゴリズムを用いた最適放射状系統の作成手法」, 電学論 C, 121, 11, pp. 1780-1787 (2001-11)