

配電損失が最小となる系統構成を構築するための ループ投入を考慮した復旧論理の開発

日大生産工（院） ○ 神 直亨

日大生産工 佐藤 正弘

1. まえがき

配電系統は図 1 に示すように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（DSS）や幹線（フィーダ）で事故が発生すると、変電所の下位系統が全て停電する。そのため、開閉器の開閉状態を切り替えて、隣接する健全な系統から停電区間に対して電力を融通し停電区間を最小にする必要がある。また、電力品質を高めるためには、停電時間も最小となることが望ましい。

本問題については、開閉器の総数を N とすると開閉状態の組合せ数が 2^N となる大規模な問題を対象とした最適化問題であるため、遺伝的アルゴリズム（GA）やタブー検索（TS）などのメタヒューリスティクスを用いた多くの研究⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾がなされているが、これらの手法は真の最適解を得ることができない。また、配電復旧は「復旧目標系統決定」と「復旧操作手順決定」に分けることができ⁽⁷⁾多くの研究では前者のみを考えている。しかし、復旧目標系統決定のみを考えると、実際にその目標系統に切り替えることができない場合がある。

本論文では、停電区間の解消および停電時間を短縮するための「復旧目標系統決定」と「復旧操作手順決定」を検討した。

2. 配電系統の構成と事故復旧論理

図 1 に示すように、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 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（閉）であり、○は OFF（開）を示す。連系開閉器は平常時には OFF であるが、停電した配電系統に他の配電系統から電力を融通する際に ON となる。

図 1 の DSS-B でフィーダの断線や配電用変電所設備が故障した場合、図 2 に示すように DSS-B の下位系統の負荷が全て停電する。事故のない配電系統（DSS-A および DSS-C）を健全区間、停電した配電系統（DSS-B）を停電区間と言う。この時、配電線を一旦無充電とするため、DSS-B の下位系統の区分開閉器は全て開放される。停電区間を復旧するために、図 3 に示すように区分開閉器を開閉し、連系開閉器を閉めることにより、停電区間を分割して隣接する健全

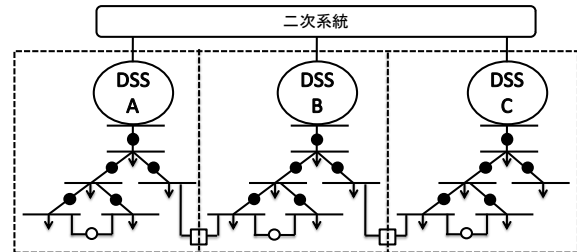


図 1 放射状系統

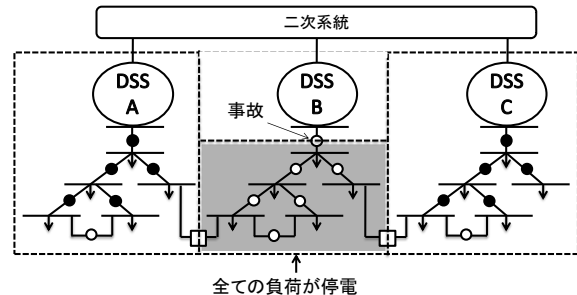


図 2 事故後

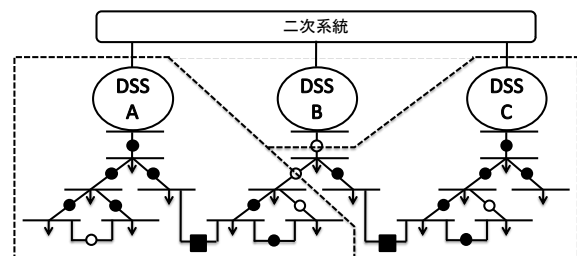


図 3 復旧後

区間に接続する。

2.1 現状の事故復旧手順

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、健全区間の系統構成を変更（系統切り替えと言う⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾）し、停電区間に供給できる電力を大きくする場合がある。系統切り替えには、投入していた開閉器を開放し、一旦停電してから開閉器を投入する方法と、切り替え中の一時の停電を防止するため、切替先の系統の開閉器を投入（ループ投入）し、一旦ループ状態にしてから、投入していた開閉器を開放（ループ開放）する手法がある。本論文では、電力品質の観点から健全区間が停電しない後者の方法を用いている。したがって、配電復旧はこれらの条件を復旧の過程と復旧後に満たしつつ、停電区間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。

2.2 問題の定義

本論文では、配電系統に以下の仮定をおく。

- (1) 負荷の P, Q は既知とする。
- (2) 負荷は復旧が終わるまで変動しない。
- (3) 線路インピーダンスは既知とする。
- (4) 停電区間が全て復旧可能なケースのみを扱う。

2.3 制約条件

配電系統では以下の制約条件を満たさなければならない⁽⁴⁾。

- (1) 放射状制約…配電系統内でのループおよび配電用変電所同士が電氣的に接続されてはならず、放射状でなければならない。
- (2) 健全区間制約…停電発生時に健全だった負荷が、復旧の過程および復旧後に停電してならない。
- (3) 線路電流容量制約…各配電線に流れる電流が、線路電流容量を超えてはならない。
- (4) 変圧器容量制約…変圧器から供給されている電流の総和が、変圧器電流容量を超えてはならない。
- (5) 電圧降下許容量制約…配電用変電所から末端負荷までの総電圧降下が許容量を超えてはならない。

3. 復旧操作手順を考慮した復旧論理の提案

3.1 健全区間と停電区間

配電系統は放射状に構成されているため、負荷区間数 N 、開閉器数 B 、ループ数 L とすると

$$L = B - N + 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

の関係がある。全ての開閉器を ON とすると、ループが L 個含まれるため、 L 個の開閉器を OFF にする必要がある。そのため、配電復旧において全ての負荷を

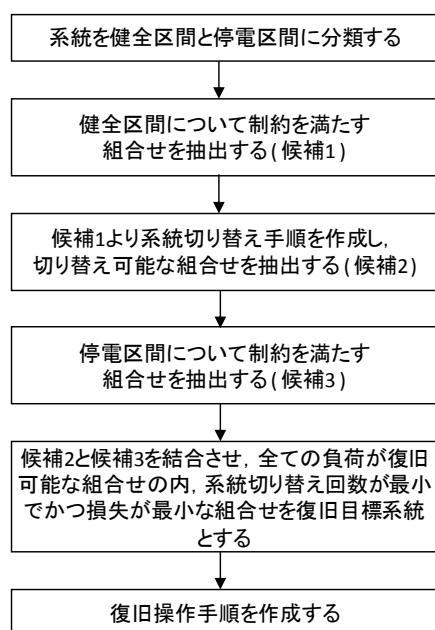


図 4 復旧論理のジェネラルフロー

復旧できたと仮定すると、解となる ON/OFF の組み合わせ（候補）の数は

$$\text{解の候補数} = {}_N C_L \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表される組合せとなる。負荷区間数:51ヶ所、開閉器数 57 台とすると解の候補数は 8.996×10^9 となり全ての候補を短時間で確認することできない。

図 4 に復旧論理のジェネラルフローを示す。系統全体で制約条件を満たす必要があるため、健全区間で制約条件を満たさなければ、その系統構成は停電区間を接続しても制約条件を満たすことはない。停電区間についても同じことが言える。そのため、制約条件を満たさない組合せを除外することで、解の候補数を大幅に少なくすることができる。

3.2 ループ投入・開放を含む復旧操作手順

電力系統においてループ投入が可能なのは、投入する開閉器の両端の位相差 $\Delta\theta \leq \pm 15 \sim 30^\circ$ 、電圧差 $\Delta V \leq 5 \sim 10\%$ の場合である。ループ開放を行うためには、開放する開閉器の両端の開放前と開放後の位相差を $\Delta\theta \leq \pm 15^\circ$ 電圧差 $\Delta V \leq 5 \sim 10\%$ の場合である⁽⁷⁾。配電系統においても同じことが考えられるため、切り替え条件としてループ投入・開放時の位相差を $\Delta\theta \leq \pm 15^\circ$ 電圧差 $\Delta V \leq 5\%$ とする。また、ループ投入・開放は系統に影響を与えることや、切り替えに時間がかかるため停電時間が長くなる。そのため、本論文ではループ投入時に Newton-Raphson 法による潮流計算を行い切り替えの判定後、切り替え回数が最小

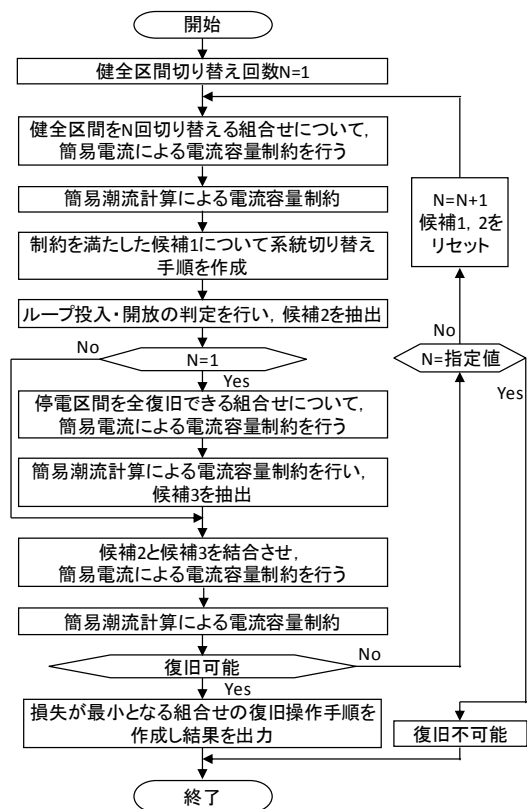


図 5 提案手法によるフローチャート

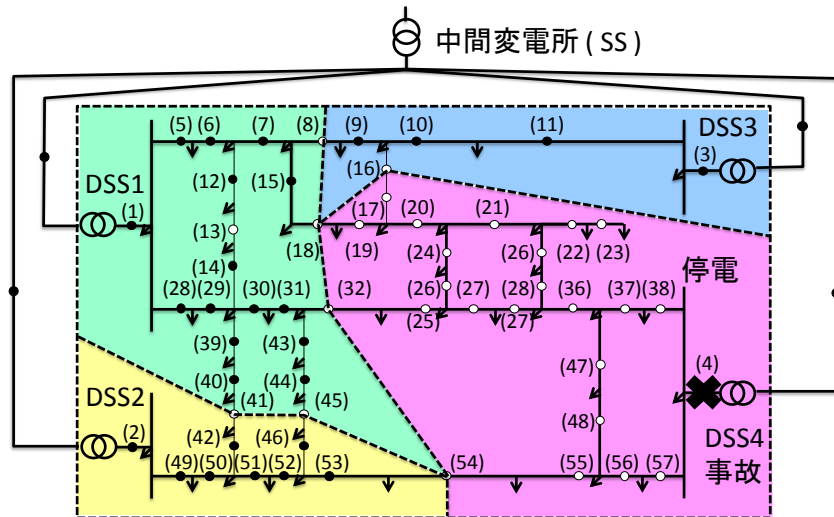


図 6 シミュレーションモデル

となるように復旧を行う。

図 5 に高速化のフローチャートを示す。系統切り替え回数は、健全区間の候補の開閉器 OFF の場所と事故時の開閉器 OFF の場所と比較したときの不一致の数である。したがって、

- (1) 系統切り替え前と目標系統との開閉器 OFF の不一致の数を比較する。
- (2) 不一致の数が最小の目標系統から、切り替え手順を作成し、ループ投入・開放を行い切り替え可能か判定する。
- (3) 切り替え可能な健全区間の候補と停電区間の候補を結合させ、復旧を行う。
- (4) 復旧不可能な場合には、系統切り替え回数を増やし(2)~(3)を繰り返す。

ことによって、切り替え回数が少ないケースほど、計算を高速化でき、系統切り替え回数が最小でかつ停電時間を短縮できる。

3.3 簡易電流計算法による高速化

線路電流は簡易潮流計算法⁽⁸⁾によって各開閉器に流れる電流を求めなくてはならないが、線路電流容量は逸脱しやすい傾向にある。そこで、各ノード電圧をフラット電圧 $V_f=1.0$ [pu]とし、各負荷に流れる電流を簡易計算

$$I = \left(\frac{P + jQ}{V} \right) \dots\dots\dots (3)$$

より算出する(以下簡易電流と呼ぶ)。実際の各ノードの電圧は線路による電圧降下によって、フラット電圧よりも小さくなる。そのため、実際の電流は簡易電流よりも大きくなる。よって、簡易電流による電流容量制約を逸脱する組合せは、簡易潮流計算を行った場合にも制約を逸脱する。したがって、簡易電流による電流容量制約を行うことで高速化することができる。

実際の電流は簡易電流よりも大きいため、簡易電流による電流容量制約を行った後に、簡易潮流計算によ

る電流容量制約を行った。

4. シミュレーション

図 6 に示すモデル系統を用いて、シミュレーションによる提案手法の有効性を確認した。モデルの系統構成は、中間変電所 (SS) 1 ヶ所、配電用変電所数 4 ヶ所、区分開閉器数 57 台、負荷区間数 51 ヶ所である。各配電用変電所の送り出し電圧は調相設備によって、約 1.0[pu]としている。

4.1 シミュレーション条件

シミュレーションの条件として、配電系統は復旧が完了するまで制約条件を満たし、かつ系統切り替えを行う場合は切り替え条件を満たさなければならない。

これらの条件のもと、DSS4 で事故が起きたと仮定し、以下の 2 つのケースについて、それぞれ高速化を適用しなかった場合と適用した場合についてシミュレーションを行った。

- (1) 配電用変電所の容量をそれぞれ DSS1:2.6[pu], DSS2:1.6[pu], DSS3:1.6[pu], DSS4:3.0[pu]とした場合 (以下ケース 1)
- (2) 配電用変電所の容量をそれぞれ DSS1:2.6[pu], DSS2:2.0[pu], DSS3:1.0[pu], DSS4:3.0[pu]とした場合 (以下ケース 2)

4.2 シミュレーション結果

図 7 にケース 1 の復旧目標系統を示す。図 8 にケース 2 の復旧目標系統を示す。また、表 1 にケース 1 およびケース 2 の復旧操作手順を示す。表 2 にシミュレーション結果を示す。提案手法では 2 つのケース共に、高速化を適用しなかった場合の系統切り替え回数が最小でかつ配電損失が最小である復旧目標系統と復旧操作手順と同一のものが得られた。

表 2 に示すように提案手法を適用することによって、高速化を適用しなかった場合に対しケース 1 では 67.7%、ケース 2 では 54.5%計算時間を短縮できた。

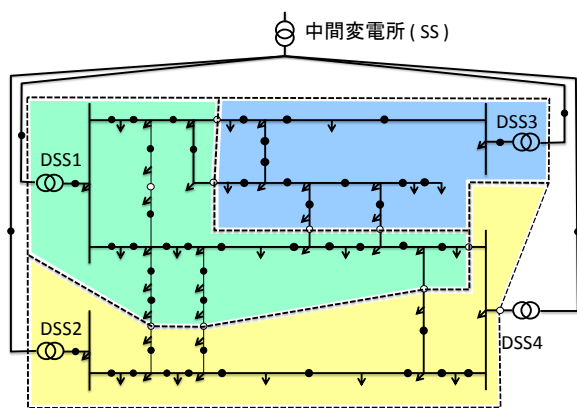


図 7 ケース 1 の復旧目標系統

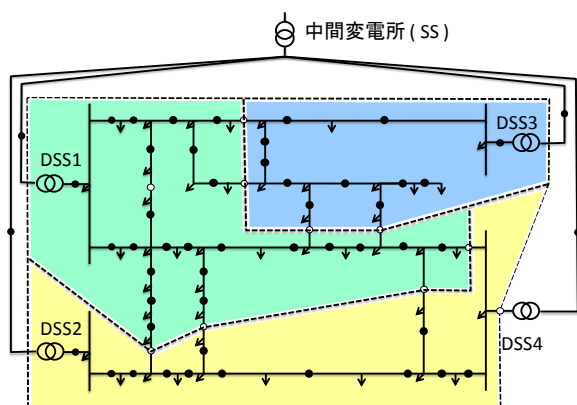


図 8 ケース 2 の復旧目標系統

表 1 復旧操作手順

ケース1		ケース2	
操作	開閉器番号	操作	開閉器番号
ループ投入	なし	ループ投入	41
ループ開放	なし	ループ開放	42
開閉器投入	25	ループ投入	8
開閉器投入	45	ループ開放	9
開閉器投入	10	開閉器投入	25
開閉器投入	26	開閉器投入	11
開閉器投入	46	開閉器投入	45
開閉器投入	12	開閉器投入	10
開閉器投入	27	開閉器投入	26
開閉器投入	47	開閉器投入	46
開閉器投入	13	開閉器投入	12
開閉器投入	11	開閉器投入	27
開閉器投入	28	開閉器投入	47
開閉器投入	31	開閉器投入	38
開閉器投入	14	開閉器投入	13
開閉器投入	19	開閉器投入	28
開閉器投入	29	開閉器投入	31
開閉器投入	15	開閉器投入	14
開閉器投入	20	開閉器投入	19
開閉器投入	30	開閉器投入	29
開閉器投入	38	開閉器投入	15
開閉器投入	16	開閉器投入	20
		開閉器投入	30
		開閉器投入	16

表 2 シミュレーション結果

ケース	計算時間 [s]		比率 [%]
	高速化なし	高速化あり	
1	2.563	0.827	67.73
2	2.638	1.201	54.47

5. まとめ

本論文では、ループ投入・開放を考慮し停電区間を解消するための、系統切り替え回数が最小でかつ、配電損失が最小となる復旧目標系統と復旧操作手順を開発した。また、停電時間を短縮するためのアルゴリズムによる高速化を提案し、シミュレーションによりその有効性を確認した。2つのケースによる検討では提案手法を用いることによって、高速化を適用しなかった場合と同一の復旧目標系統と復旧操作手順を約55%の計算時間で得ることができた。

今後の課題は、大規模系統での有効性の確認と、全ての負荷が復旧できない条件での停電区間を最小化にする復旧論理およびその高速探索手法を検討することである。

「参考文献」

- (1) 道端郁夫・青木秀憲：「配電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) 古田 篤弘・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) 三島 裕樹・奈良 宏一・佐藤 泰司・伊藤 考充・金田 裕敏：「配電系統損失最小化問題のタブー検索を用いた解法」，電学論 B,123,10, pp.1149-1155 (2003-10)
- (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値計画的な方式」，電学論 C,120,2,pp.229-235 (2000-2)
- (5) 川上 潤三・関根 泰次：「放射状二次系統における系統切替操作順序の一決定法」，電学論 B,94,1,pp.33-40 (1974-1)
- (6) 磯田 八郎：「配電系統の自動操作プログラムの開発と系統シミュレータによる実証研究」，電学論 B, 97,8, pp.489-496 (1977-8)
- (7) 電力系統の事故復旧操作調査専門委員会編：「電力系統の事故復旧操作」，電気学会技術報告，No354 (1990)
- (8) Shirmohammadi, D., Hong, H. W., "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction", IEEE Transactions on, On page(s): 1492-1498, Volume: 4, Issue: 2, 1989