

切替操作手順を考慮した復旧目標系統作成問題

01900940 電力中央研究所 *渡邊 勇 WATANABE Isamu
中央大学 野津 誠 NODU Makoto

1. はじめに

配電系統では、定期的な保守・点検時や事故発生時における過負荷（設備の許容電流を超過すること）の回避、および通常運用時における送電損失を最小化する目的で、電気を流す経路を変更する系統切替操作が必要となる。これらの操作は線路に設置されている多数の開閉器の入切状態を変更することにより実現しており、最終的な開閉器の入切状態の組み合わせ（目標系統）を決定する問題と実際の切替手順を決定する問題に分けられる。これまで個々の問題に対し様々な最適化手法が提案されているが、両方の問題を統一的に扱った研究は少ない。本論文では、目標系統を作成する過程で切替手順を考慮することにより系統切替操作全体を最適化する問題について論じる。さらに、本問題に対し遺伝的アルゴリズムを用いた解法を提案し、テストシステムを用いた実験結果についても報告する。

2. 切替手順を考慮した復旧目標系統作成問題

2.1. 問題の定義

本論文では、切替手順を考慮した復旧目標系統作成問題を、事故等による供給支障の発生直後から系統切替操作により供給支障が解消されるまでの供給支障電力量の最小化問題として定義する。図1に系統切替操作による供給支障電力の時間変化を示す。一般に配電系統はループ系統の一部の開閉器を開放して放射状系統として運用しているため、開閉器の入切状態の組み合わせを変更することは放射状系統の系統構成を変更

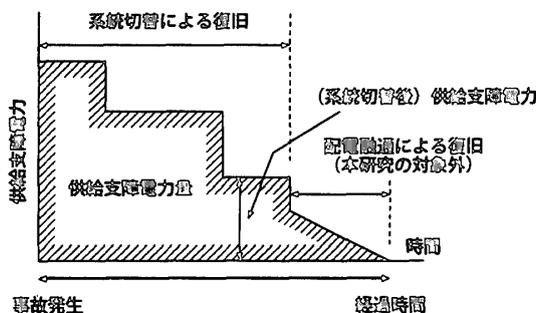


図1: 系統切替操作による供給支障電力の時間変化

することを意味する。図1で供給支障電力が階段状に変化しているのは、開閉器の入切状態の変更により放射状系統の系統構成が変化したためである。

2.2. 問題の定式化

第 k 回目の系統切替操作直後の供給支障電力を h_k 、切替えに要する時間を t_k 、切替回数を K とすると、最小化すべき供給支障電力量は次式で表される。ただし h_0 、 t_0 は事故発生直後の供給支障電力とその継続時間（第1回目の切替操作までの時間）である。

$$Z = \sum_{k=0}^K (t_k \times h_k) \quad (1)$$

制約条件としては、(1) 放射状系統制約、(2) 電源容量制約、(3) 線路容量制約を考慮する。一般には電圧降下に関しても制約として考慮する必要があるが、本論文では対象外とした。

2.3. その他の要求事項

上記の制約条件以外に、供給支障電力に関連した次の2つの項目について考慮し、これに該当する場合はペナルティとして式(1)に加算する。

- 切替操作の途中で供給支障電力が増加した場合
- 切替操作終了時に供給支障が解消できない場合

3. 遺伝的アルゴリズムを用いた解法の提案

前節で定義した問題に対し、2段階で遺伝的アルゴリズム(GA)を用いるアプローチを提案する(図2)。第1段階では最終的な放射状系統である目標系統を探索し、第1段階で得た仮の目標系統に対し切替操作手順まで含めて第2段階で評価し、評価値(供給支障電力量+ペナルティ)を第1段階に返す。

3.1. 放射状系統の染色体表現方式

配電系統をグラフ表現した場合、上位系統から電力を受ける配電用変圧器と負荷がノードとして表現され、開閉器はブランチ(エッジ)として表現される。これにより、系統内のすべての負荷に電力を供給する放射状系統はグラフ表現された配電系統の全域木(spanning tree)と対応づけることができる。これまでに放射状系統および全域木に対し数多くの染色体表現方式が提

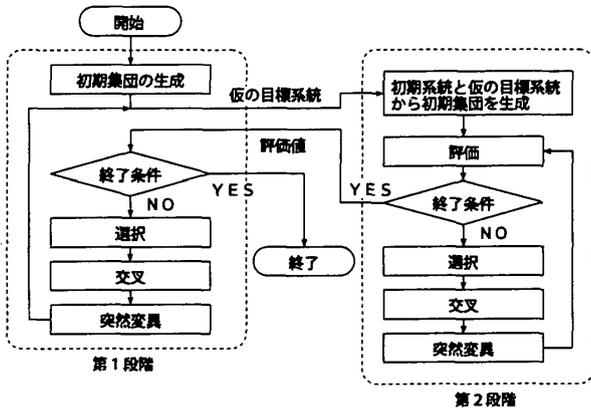


図 2: 2 段階 GA を用いた提案手法の流れ

案されているが、本論文では Raidl らによって提案されたエッジセット [1] を採用した。エッジセットは木を構成する枝の集合により全域木を表現する方式であり、致死遺伝子（実行不能解）を生成しないように交叉や突然変異に Prim 法などの最小全域木アルゴリズムを用いている点が特長である。他の染色体表現方式と比較して、全域木の表現方式として望まれる様々な性質を有する優れた表現方式である。

3.2. 切替操作手順の染色体表現方式

第 1 段階で得られる仮の目標系統と通常運用時における系統構成（初期系統）とを比較して、状態が異なる開閉器を切替えの操作対象とする。これは「同じ開閉器に対する切替操作は高々 1 回」という仮定に基づくものである。したがって、開閉器の切替操作手順の決定問題は、操作対象である開閉器をどの順番で操作するかを決める順列問題として捉えることができる。本論文では表現方式としてランダムキー [2] を採用した。

本問題では切替途中であっても放射状系統を維持させるために、切状態と入状態の開閉器に対する 2 回の操作を一連の切替操作とみなす。そして、切状態から入状態へ変更させる操作（切入操作）のみを染色体として表現し、指定された順番にしたがって切替操作を行う。入から切へ状態を変更させる操作（入切操作）は、切入操作によって生成されたループを切る操作が選択され切入操作の間に挿入される。

3.3. 供給支障電力の算出

切入操作と入切操作の組が完了した時点の放射状系統に対し、配電用変圧器に対応する電源ノードから全負荷ノードへの最大フローを求めることで供給支障電力が計算できる。第 k 回目の切替操作後の最大フローを f_k 、負荷ノード i の負荷量を l_i 、負荷ノード数を L とすると、供給支障電力 h_k は次式より計算できる。

$$h_k = \sum_{i=1}^L l_i - f_k \quad (2)$$

式 (1)(2) より、ある目標系統に対する供給支障電力を求めることができ、ペナルティ項とあわせて目標系統に対し評価値を与えることができる。

4. 計算機実験

提案解法を図 3 に示すテスト系統に適用した結果を示す。図 3 に示した放射状系統は通常運用時の系統構成であり、右上隅のブランチでの事故を想定した。GA のパラメータである個体数 N 、交叉率 p_c 、突然変異率 p_m 、最大世代数 g の設定は次のとおりである。また、式 (1) における t_k はすべて 1 とした。

- 第 1 段階： $N = 20, p_c = 0.8, p_m = 0.06, g = 30$
- 第 2 段階： $N = 8, p_c = 0.8, p_m = 0.1, g = 5$

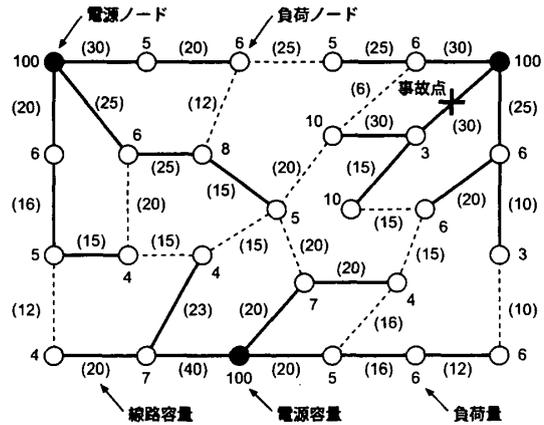


図 3: テスト系統（初期系統）

提案解法をテスト系統に 10 回適用した結果、すべての試行で最適解 46 (23 → 13 → 7 → 3 → 0) を獲得することができた。最適解が得られるまでの（第 1 段階の）平均世代数は 16.3 であった。

5. おわりに

今後はより大規模な系統への適用とアルゴリズムの高速化について検討を進める。

参考文献

- [1] Raidl, G. R. and Julstrom, B. A.: Edge Sets: An Effective Evolutionary Coding of Spanning Trees, *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, Vol. 7, No. 3, pp. 225–239 (2003).
- [2] Bean, J. C.: Genetic Algorithms and Random Keys for Sequencing and Optimization, *ORSA Journal on Computing*, Vol. 6, No. 2, pp. 154–160 (1994).