

配電損失最小化問題に対する組合せ遷移的アプローチ

非会員	東北大学	畠山 航	HATAKEYAMA Wataru
非会員	東北大学	*鈴木 顕	SUZUKI Akira
非会員	東北大学	伊藤 健洋	ITO Takehiro
非会員	東北大学	周 暁	ZHOU Xiao
非会員	株式会社 明電舎	杉村 修平	SUGIMURA Shuhei
非会員	株式会社 明電舎	田邊 隆之	TANABE Takayuki

1. 研究の背景

本研究では、組合せ遷移の応用先のひとつである、配電網の損失最小化について扱う。配電網は冗長性を持たせるために複数の経路で電気を供給できるように設計されている。例えば配電網の日本標準モデル [1] は電気制約を満たすものに限ってもネットワーク構成に約 10^{58} 個の選択肢があり、その構成によって配電損失は異なる。その中から最適な、すなわち配電損失の最も小さい供給経路を選び出すだけでも難しい問題であり、ZDD を用いた手法 [2] や、IP ソルバを用いた手法 [3]、動的計画法を用いた手法 [4] 等、様々な方面から研究がされてきた。

一方で、例え最適な供給経路を計算できたとしても、今度は途中で停電が起きないように現在の構成を最適な構成に変更するための切替手順が必要になる。本研究では、配電網の損失の最小化と切替手順を同時に求めるアルゴリズムを与え、そのアルゴリズムの性能について計算機実験を行った。

2. 定義

まずは静的な問題設定である配電損失最小化問題について厳密な定義を述べる。**配電損失最小化問題**は、入力として配電ネットワークが与えられた際に、配電損失が最小となるような電气的制約を満たす供給森を出力する問題である。**配電ネットワーク**は以下の複数の情報を持つ無向グラフとして与えられる。ここで、頂点集合はそれぞれ供給点、需要点のいずれかであり、辺集合の一部は削除可能辺である、各需要点は非負実数の需要量、各辺は非負実数の抵抗値と、電流容量を持つ。また、配電ネットワークから削除可能辺をいくつか削除して得られる部分グラフの内、各連結成分がちょうど1つの供給点を含むような森のことを**供給森**と呼ぶ。

供給森の各連結成分は供給点をちょうど1つ含む木であるため、供給森が1つ定まると、各辺 e を流れる電流 $I(e)$ を求めることができる。具体的には、辺 e を削除した際に出来る2つの連結成分の内、供給点を含まない側に含まれる頂点の需要量の合計が $I(e)$ である。さらにその値 $I(e)$ および与えられた辺 e の抵抗値 $r(e)$ を利用して、その辺での電圧降下量 $r(e)I(e)$ 、配電損失 $r(e)I(e)^2$ を求めることができる。

次に供給森が満たすべき**電气的制約**について述べる。本研究では電气的制約として電流制約と電圧制約の2つを考慮した。**電流制約**は各辺に対する制約であり、各辺 e に流れる電流 $I(e)$ が、与えられた電流容量以下である必要がある。**電圧制約**は各需要点に対する制約であり、各需要点 v に対して、同じ連結成分内の供給点から v までのパス上の各辺の電圧降下量の合計が、許される電圧降下量（本研究では300V）以下である必要がある。以降では、供給森の内、電气的制約も満たしているもののみを**供給森**と呼ぶこととする。

本研究では配電ネットワークと共に、供給森 F_0 が与えられる。この供給森 F_0 は現在の配電方法に該当し、この供給森を初期状態として、より配電損失の少ない供給森へ変更することを考える。次の2つの条件を満たすような供給森に対する操作を、**可能な操作**と呼ぶ。

1. 既に削除している辺を1つ復活させ、同時に削除可能辺から辺を1つ削除する。
2. 変更した後も供給森となっている。

本研究では、与えられた供給森 F_0 に可能な操作を繰り返し適用することで得られる供給森の内、最も配電損失の小さい供給森と、その供給森を得るための可能な操作の列（切替手順）を求める問題を考える。

3. アルゴリズム

3.1. 全列挙アルゴリズム

本問題を解くための素朴なアルゴリズムとして、全列挙アルゴリズムを考える。この全列挙アルゴリズムは、与えられた配電ネットワークに対する解空間グラフを作成することで動作する。解空間グラフの各頂点は配電ネットワークの各供給森に対応し、各頂点对間には、その2頂点に対応する供給森同士が可能な操作によって行き来することのできる時かつその時に限り辺が引かれる。解空間グラフさえ得ることができれば、あとはその解空間グラフ上で与えられた供給森 F_0 と同じ連結成分にある頂点の内、最も配電損失の小さい供給森 F_r が求めたい供給森であり、 F_0 から F_r へのパスが求めたい操作の列（切替手順）となる。

しかし、例えば配電網の日本標準モデルには468個の開閉器（削除可能辺）が存在し、供給森の個数は 10^{58} を超える。そのため、本アルゴリズムは最適性の保証はされるものの、現実的な時間で動作するとは言いづらい。

3.2. 部分最適化アルゴリズム

そこで本研究では、配電ネットワークの一部に対して全列挙アルゴリズムを適用するという操作を繰り返し行うアルゴリズムを考えた。このアルゴリズムは、初めは小さい部分に対して適用し、徐々に大きな部分に対して適用していく。最終的に全体に対して適用することになり、(とても長い時間が必要ではあるが、) 停止するまで待てば必ず最適解を得ることができる。また、途中で実行を停止した場合も、その時点で求めた最も良い解が得られる。

4. 計算機実験

配電網の日本標準モデルに含まれる24時間分の需要データそれぞれに対して部分最適化アルゴリズムを適用し、その性能を確かめた。使用した計算機は通常のデスクトップパソコン (Core i5 6500, DDR4 16GB, Windows 10) であり、コンパイラには Microsoft Visual Studio 2017 を使用した。与える供給森 F_0 として、実際に運用されている供給森 (基準解) と、配電損失が最大であるような供給森 (最悪解) の2つを利用した。

基準解から開始した場合には、多くの時間帯で1秒以内に最適解に到達し、最も時間のかかった時

間帯でも8秒以内に最適解に到達した。また、得られた切替手順の中には、理論的に最短の手順であると示せるものもあった。本アルゴリズムは切替手順も算出する点や、入力として供給森を受け取るという点で既存のアルゴリズムとは異なるため、一概に比較はできないが、既存手法と比較しても見劣りしない計算時間で最適解に到達できることが分かった。

最悪解から開始した場合にも、全ての時間帯で14秒以内に最適解に到達した。 10^{58} 以上の頂点のある解空間グラフから、少なくとも100手以上かかるような切替手順を導出できている。

5. まとめ

本実験で得られた供給森は、実際に運用されている供給森と比較して約0.79%改善した。この効果を日本全国規模に単純換算すると、年間で約13.7GWh (二酸化炭素排出量にして6800トン) もの配電損失を減らせる計算になる。また、今回行ったのはスイッチの切り替え操作のみであり、この配電損失の削減には、追加の設備投資を必要とせず、現有設備の運用のみで実現することができる。

参考文献

- [1] Y. Hayashi, S. Kawasaki, J. Matsuki, H. Matsuda, S. Sakai, T. Miyazaki and N. Kobayashi, Establishment of a standard analytical model of distribution network with distributed generators and development of multi evaluation method for network configuration candidates, IEEJ Transactions on Power and Energy 126(10), pp. 1013–1022, 2006.
- [2] T. Inoue, K. Takano, T. Watanabe, J. Kawahara, R. Yoshinaka, A. Kishimoto, K. Tsuda, S. Minato and Y. Hayashi, Distribution loss minimization with guaranteed error bound, IEEE Transactions on Smart Grid 5(1), pp. 102–111, 2014.
- [3] 安田宜仁, 湊真一, 竹延祐二, 林泰弘, 配電損失最小化問題のスケラブルな厳密解法, 平成28年電気学会全国大会論文集6(156), pp. 250–251, 2016.
- [4] 山口 勇太郎, 配電損失最小化 一実グラフに潜む性質の活用一, 第17回情報科学技術フォーラム (FIT 2018), 2018.