

スマートグリッドにおける送電経路の最適化

Optimization of Power Electric Supply Path in Smart Grids

小澤 貴也 大沢 英一
Takaya Ozawa Ei-Ichi Osawa

公立はこだて未来大学 システム情報科学部 複雑系知能学科

Department of Complex and Intelligent Systems, School of Systems Information Science, Future University Hakodate

The next generation next-generation electric grids called smart grids are attracting attention due to problems such as global power shortage and environmental load caused by power generation. One of the problems with the current power being used is that the power transmission loss is large due to the long power transmission path. From such a problem, it is possible to reduce the power shortage and reduce the power generation amount by reducing the power transmission loss. For this reason, it is required to optimize the power transmission path. In this paper, we propose to reduce the power transmission loss by minimizing the power transmission path by using the code optimization method used by the compiler by treating the power transmission path like a program. We compared power transmission loss by simulation using multi agent system and showed that the proposed method can reduce transmission loss. In addition, it shows that it can be used by measuring the execution processing time of the proposed method.

1. はじめに

現在、日本の電力使用量は、情報化の進展やエアコンの普及にみられるような快適な生活へのニーズが高まり、戦後一貫して伸びている。また、今後電気自動車などの普及が予測されるため、電力需要はさらに増加すると考えられる。このような世界的な人口増加や電力消費量の増加に伴う電力不足や、火力発電による CO_2 排出など発電による環境負荷が問題などによりスマートグリッドという次世代型電力網が注目を集めている。スマートグリッドとは、次世代型送電網と意味であり、電気自動車などの電力貯蔵システムや太陽光発電などの分散型電源とスマートメータという人工知能や通信機能を搭載した計測機器等を設置して電力需給を自動的に調整、最適化を可能にする電力網を構築するという概念で効率的な電力供給が可能になるとされている [谷口 10]。

また、現在の使用されている電力の問題点としては、その送電の過程で経路が長いことから送電損失が多いという点がある。日本では電力が家庭に届くまでに送電損失によって約 4.8% 失われている。年間では約 480 億 kWh 送電損失となっており、これは 100 万 kWh 級原子力発電所の約 7 基分の発電量に相当する。このような問題から送電経路の最適化を行うことで、送電損失量を削減することが可能であり、電力不足の改善や発電量の削減が可能であると考えられる。そこで、本研究では、電力の送電経路をプログラム言語のように扱い、コンパイラで利用されるコード最適化の手法を用いて送電経路の最適化を可能にして、送電損失を削減する手法を提案した。

2. 前提知識

本章では、本研究の内容で用いる特に必要な知識について述べる。

2.1 複雑ネットワークモデル

現実世界に存在するネットワークは多くは複雑ネットワークの性質が存在することがわかっている。電力網もまたスモールワールド性やスケールフリー性の性質を持っていることがわかっているため、本研究では複雑ネットワークモデルを使用する。

複雑ネットワークを生成するモデルとして「ワッツ・ストロガッツモデル (WS モデル)」と「バラバシ・アルバートモデル (BA モデル)」などが存在する。これらのモデルは単純なアルゴリズムより複雑ネットワークを生成することが可能であり、本研究では、送電網の形状が複雑ネットワークの特性を持つことから WS モデル、BA モデルを使用して送電網を構築する。

2.2 クラスター係数

クラスター係数は、任意のノードに隣接するノード同士が隣接ノードである割合で、クラスター係数が高いネットワークは関係密度が高いというものである。ノード v_i のクラスター係数 C_i は、ノード i の次数 k_i を用いて以下の式で算出する。

$$C_i = \frac{v_i \text{ を含む三角形の数}}{\frac{k_i(k_i-1)}{2}}$$

2.3 媒介中心性

媒介中心性は、ノードが情報を媒介することに関与している度合いを表す尺度である [Brandes 01]。ノード v_i の媒介中心性 B_i は、始点 v_{is} から v_{it} の最短経路の中で v_i を通るものを g_{isit}^i として、最短経路の総数を N_{isit} とするとき、以下の式で算出される。

$$B_i = \frac{\sum_{is=1; is \neq i}^n \sum_{it=1; it \neq i}^{is-1} \frac{g_{isit}^i}{N_{isit}}}{(N-1)(N-2)/2}$$

本研究では、媒介中心性が高いノードは送電線が多く集まるノードである。そのため、ノードの媒介中心性とそのノードから出ていく経路数との相関について 5 章で考察する。

連絡先: 小澤 貴也, 公立はこだて未来大学 システム情報科学部複雑系知能学科, 北海道函館市中野町 116-2, 0138-34-6448, b1015112@fun.ac.jp

2.4 電力に関する基本的な数式

本研究では、現在送電に使用されている導線の抵抗率からシミュレーションに必要な電力に関する数値を算出した。本章では、研究に必要な基本的な電力に関する数式を必要な知識について示す。電力とその送電による送電損失は以下の式によって算出される。

送電抵抗: $R = \rho \times l$

送電損失: $P(W) = I^2 \times R$

- W : 電力, I : 電流, ρ : 導線抵抗, R : 導線の長さ

本研究では、送電損失が導線の長さ に比例することから、導線の長さつまり送電距離を最適化することで送電損失量を削減可能と想定している。

3. 関連研究

3.1 経路探索を用いた電力損失を最小化する経路選択手法

スマートグリッドにより電力の流れを制御することで、電力を削減する研究がある [尾倉 14]。この研究では、ヨーロッパの 15 カ国を結ぶ実際の送電網のうち 2 カ国を繋げる経路を最短経路で電力を削減するというものである。

方法としては、エッジとノードの数を最小にするように経路を選択することで、送電損失量が最小になるという考えから幅優先探索により経路を決定する。また、シミュレーション環境としては、15 カ国をノードとし、送電網をエッジとする。また、それぞれのエッジには送電損失量を超伝導交流送電線を参考に設定している。

実験結果から表 2.1 および表 2.2 から必ずしも最小経路が一番電力損失が小さいわけではなく、各ノードの送電損失率も影響していることがわかった。

表 1: 供給地'n5', 需要地'n12' の場合 ([尾倉 14])

n8 ~ n14	距離	送電損失率
$n8 \rightarrow n4 \rightarrow n10 \rightarrow n13 \rightarrow n14$	2954.74km	35.93%
$n8 \rightarrow n9 \rightarrow n10 \rightarrow n13 \rightarrow n14$	2638.54km	36.30%
$n8 \rightarrow n12 \rightarrow n10 \rightarrow n13 \rightarrow n14$	3421.55km	41.14%

表 2: 供給地'n5', 需要地'n12' の場合 ([尾倉 14])

n5 ~ n12	距離	送電損失率
$n5 \rightarrow n4 \rightarrow n8 \rightarrow n12$	1866.53km	23.98%
$n5 \rightarrow n7 \rightarrow n10 \rightarrow n12$	1543.51km	23.99%
$n5 \rightarrow n4 \rightarrow n9 \rightarrow n12$	1931.14km	25.79%
$n5 \rightarrow n4 \rightarrow n10 \rightarrow n12$	2558.94km	29.60%

3.2 コード最適化手法を用いてトラック経路の効率化を行う手法

共同物流のトラックをコンパイラで利用されるコードの最適化を用いて、トラック経路の効率化を行い CO_2 を削減する研

究として佐藤による研究がある [SATO 08]。

この研究では、プログラム言語の実行フローとトラック経路の類似性があることからトラックの経路をプログラム言語として扱えるようにして、プログラムのための各種技術を通じてトラック経路を効率化を行った。経路の効率化として、コード最適化手法として逐次化と冗長コード除去を用いることでトラック輸送において同じ集配先に何度も行かないように経路を変更した。また、並列プログラムなどでは逐次実行プログラムの並列化とは逆に並列プログラムを逐次化 (直列化) することでトラックの数を減らすことを可能にした。

また、実際のトラック輸送経路に対して、所定の輸送条件を満足させながら効率化した結果、10% 程度の効率化できた。

本研究では、このコードの最適化手法によるトラックの経路の最適化を元に集配先を一般家庭とし、トラックの経路では、一つ経路最適化であったものを複数の経路による送電経路の最適化を行った。

4. 提案手法

本研究では、送電損失の削減のために送電経路の最適化を行う。最適化の方法として、佐藤の研究 [SATO 08] を参考に送電経路をプログラム言語として扱うことで、電力供給条件を満足させながらコンパイラのコード最適化手法として冗長コード除去や逐次化 (直列化) を用いる。本章では、提案する手法による経路選択方法について述べる。

4.1 コードの最適化

提案手法では、コンパイラで使われるコードの最適化手法である逐次化 (直列化) および冗長コードの除去の手法を用いている。

逐次化 (直列化)

逐次化とは、2つのコードを統合することにより冗長なコードを削除することで最適化を行うというものである。つまり、本手法では、図 1 のように送電を一括化して、経路の削減を行う。また、高電圧で送電を行うことで送電損失は削減が可能となる。

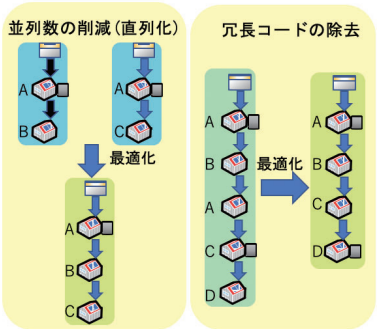


図 1: 電力網における逐次化 (直列化) および冗長コードの除去の例

冗長コードの除去

冗長コードの除去とは、コード内の冗長な使用されていないコードを削除することで最適化を行うというものである。電力網の場合、構造から送電経路が同じノードへ戻ってくることがあることからノードの重複する移動を除去する。つまり、図 1 のように電力要求のない経路内のエージェント削減を行う。

4.2 送電経路選択方法

提案手法による経路選択は以下のような流れで行う。
送電経路の選択方法：

- 1 すべての電力需要家を求めて、貯蓄設備から需要家を結ぶ経路を作成する。
- 2 コード最適化 (冗長コード除去や逐次化 (直列化)) を行う。
- 3 距離の短い送電経路を選択

例として、図 2 の 1 のような電力網の貯蓄設備から B,C への供給を考える。まず 2 のように貯蓄設備と B,C を結ぶ経路を作成する。次に、作成された経路に逐次化と冗長コードの除去を行うことで 3 のような経路が決定する。

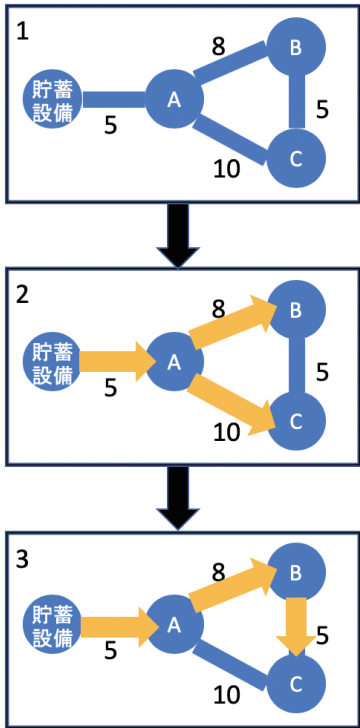


図 2: 提案手法の使用例

5. 実験

本実験には、多数の需要家をエージェントとする大規模エージェントネットワークを構築し、提案手法とダイクストラ法の送電経路を計測し送電損失量を比較した。

計測日数を 365 日とし、太陽光発電により発電した電力の融通可能であると想定する。また、送電による電力の損失は、送電線の導線抵抗のみを想定する。また、需要と供給源のマッチングには、空間マッチングを用いて行う [山本 11]。また、太陽光発電の発電量は函館市の一年間の日射量から算出した。

本研究では、潮流などをさけるため物理的制約として、電力は一方にしか流れないものとする。また、配電用変電所から家庭への送電を想定している。

5.1 実験パラメータ

実験にはエージェント数は 100~1000 でそれぞれ 3 回行う。その他のパラメータは、実際に使用されてるものを参考に以下のように設定した。

- 平均電力消費量：18.5kWh
- 発電システムの設置容量：4.5kWh と
- 送電線の許容電流：6600A
- 平均次数: $k = 4$

太陽光による発電可能エージェントの割合を約 8%とした。エージェントの電力需要量は、用意した電力消費需要パターンの朝型、夜型、中間型の 3 種類用意からランダムに設定した。シミュレーションの電力融通市場は、送電網を複雑ネットワークモデルである WS モデルと BA モデルで生成する。電力融通を行うエージェントは、蓄電池を持つ一般家庭と電力事業者とした。一般家庭を想定したエージェントの約 8%が、太陽光発電が可能と設定した。送電量は、送電線の許容電流以上の電流を流すことはできないとする。

5.2 実験結果 1：総経路削減率

エージェント数 500 を 3 回行ったときの平均削減率の結果を表 3 に示す。ダイクストラ法と提案手法を比較した結果、BA モデルでは提案手法によって 4.8% 削減が可能となった。WS モデル $p = 0.1$ の場合は 29.5% 削減が可能となった。

表 3: 削減率 1

	BA モデル	WS モデル ($p = 0.1$)
提案手法	3952.8km	9112.3km
ダイクストラ法	4153.63km	12926.8km
削減率	4.8%	29.5%
クラスター係数	0.096%	0.379%

また、レギュラグラフに近いネットワークが生成される $p = 0.05$ の WS モデルとランダムグラフに近いネットワークが生成される $P = 0.5$ の WS モデルで実験を行った結果は表 4 である。結果から $p = 0.05$ の WS モデルのほうが削減率が上がった。

表 4: 削減率 2

	WS モデル ($p = 0.05$)	WS モデル ($p = 0.5$)
提案手法	5991.9km	8931.0km
ダイクストラ法	14726.8km	11705.6km
削減率	59.3%	23.7%
クラスター係数	0.415%	0.073%

この結果ももっともクラスター係数が高い $p = 0.05$ の WS モデルが一番削減率が高く、クラスター係数をもっとも低い BA モデルが一番削減率が低いことから提案手法による経路削減率はクラスター係数が関係していることが考えられる。このことは、最適化手法の特に逐次化が関係していると考えられる。また、BA モデルと比べ WS モデルの削減率が著しく上がった要因として複雑ネットワークモデルの特性であるスケールフリー性に関係していると推測される。BA モデルはスケールフリー性を持つが WS モデルは持たない。このことから最適化手法が行われる区間が供給源から次数の高いノード特にハ

ブのようなノードまでとなり削減率が下がることが考えられる。

また、エージェント数 1000 で 3 回ずつ、2017 年度の北海道電力の電力使用量から算出した北海道内の送電損失量と提案手法による送電損失量を比較した結果、WS モデルでは約 49.8%，BA モデルでは約 45.49% の削減が可能となった。この結果から提案手法による経路選択は送電損失量の削減が可能であると考えられる。しかし、本研究では、送電損失は送電線の導線抵抗のみを想定している。実際の損失にはコロナ放電などの送電損失があるため実験結果よりも削減率は下がると考えられる。

次に、エージェント数 1000 の場合のノードの媒介中心性と提案手法による経路選択によって、そのノードを経由する経路の数の結果は図 3 および図 4 である。結果より、ノード媒介中心性とそのノードを経由する経路の数には相関が示唆された。

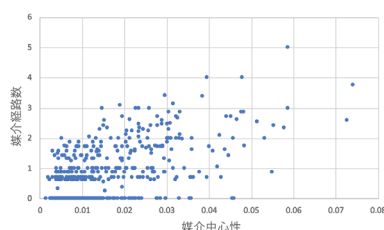


図 3: WS モデル

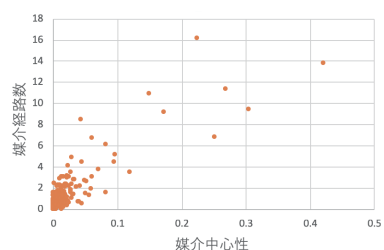


図 4: BA モデル

5.3 実験結果 2：実行速度

エージェント数 100～1000 までをそれぞれ 3 回行いその平均処理時間を表したグラフが図 5 である。結果から WS モデルより BA モデルの方が処理時間が短いことがわかった。また、平成 27 年の北海道内の世帯数と変電所数からひとつの変電所あたり約 6600 世帯の供給を行う。実験で得られた処理時間に最小二乗法を適用して推定した曲線から 6600 世帯への提案手法による経路選択にかかる処理時間は WS モデルでは約 1.64 秒で、BA モデルでは 0.85 秒であると推測される。よって、現在の送電網でも実行可能時間で提案手法を用いて送電経路を決定することは可能であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、現在の送電システムでは送電損失量が多いという問題に対して、コードの最適化手法を送電経路に用いることで経路の削減を行い、それにより送電損失量の削減を行った。ネットワークの生成には実際の送電網に近い構造を持つ複雑

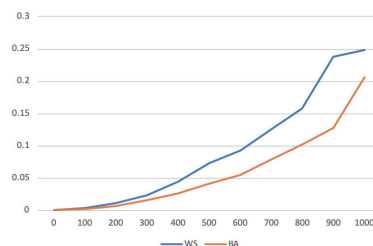


図 5: 平均処理時間

ネットワークモデルである WS モデルと BA モデルで生成した。送電損失の削減の評価方法としては、ダイクストラ法を用いて送電経路を生成したものと北海道の送電損失量を算出し、提案手法との比較を行った結果、提案手法ではダイクストラ法による経路と北海道の送電損失量に比べ送電損失量が少ないことを示した。

また、ネットワークの特性と提案手法との関係調べるためノードの媒介中心性とそのノードを経由する経路数との関係を調べた。実験結果から媒介中心性の高いノードには多くの経路が集まることが示された。そして、実際に使用可能であるか調べるため、提案手法の実行処理時間の計測した結果、実行処理時間から現在の送電網でも使用可能であることを示した。よって、このことから提案手法は、送電損失量の削減が可能であり、現在の送電網で使用可能であると考えられる。

また、本研究では、送電の全体の経路の削減を行ったがもともと送電損失量が少なくなる経路選択ではない。また、送電損失量の削減の最適解を取るには多くの処理時間が必要となる。よって、処理時間は変わらずに提案手法より送電損失量の削減方法の提案が必要となる。また、本研究では経路の削減を行ったが、さらに需要家と供給家の組み合わせによって送電損失量の削減をする方法を模索したい。

参考文献

- [谷口 10] 谷口忠大, 榊原一紀, 西川郁子: 自律分散型 スマートグリッド上の電力取引に対する自然方策勾配法によるマルチエージェント強化学習の有効性検証. 第 22 回自律分散システム・シンポジウム, 2010
- [尾倉 14] 尾倉康男, 篠宮紀彦: 送電網において電力損失を最小化する経路選択手法, 電子情報通信学会技術研究報告 = IEICE technical report: 信学技報, 113(427), 2014.2.6・7, p.63-65
- [SATO 08] SATOH I.: A Specification Framework for Earth-friendly Logistics. Proceedings of 28th IFIP WG6.1 International Conference on Formal Techniques for Networked and Distributed Systems (FORTE ' 2008), Springer June, 251-266, 2008
- [山本 11] 山本草詩, 石井大介, 岡本聡, 山中直明: スマートグリッドにおける送電ロスが最小となる発電源選択法の一検討. 電子情報通信学会技術研究報告 = IEICE technical report: 信学技報, 2011
- [Brandes 01] Brandes U.: A faster algorithm for betweenness centrality, Journal of Mathematical Sociology, Vol.25, No.2, pp.163-177, 2001