

解集合プログラミングを用いた配電網問題の解法

山田 健太郎¹, 湊 真一², 田村 直之³, 番原 睦則¹

¹ 名古屋大学大学院情報学研究科
{yken66, banbara}@nagoya-u.jp

² 京都大学大学院情報学研究科
minato@i.kyoto-u.ac.jp

³ 神戸大学情報基盤センター
tamura@kobe-u.ac.jp

概要

1 はじめに

電力網の構成制御は、エネルギーの節約や安定した電力供給を支える重要な研究課題である。電力網は、高電圧で発電所と変電所を結ぶ**送電網**と、低電圧で変電所と家庭や工場といった需要家を結ぶ**配電網**に分類される。配電網は変電所と需要家との間で構成される電力供給ネットワークであり、その構成技術はスマートグリッドや、災害時の障害箇所の迂回構成などを支える重要な基盤技術である。

配電網問題は、供給経路に関する**トポロジ制約**と、電流・電圧に関する**電気制約**を満たしつつ、電力の損失を最小にするスイッチの開閉状態を求めることが目的である [4]。トポロジ制約は、短絡 (供給経路上のループ、複数の変電所と結ばれる需要家) と停電 (変電所と結ばれない需要家) が発生しないことを保証する。電気制約は、供給経路の各区間で許容電流を超えないこと、電気抵抗による電圧降下が許容範囲を超えないことを保証する。本稿ではトポロジ制約のみの配電網問題を対象とする。

配電網問題の例を図1に示す。この例は、3つの変電所 $\{s_a, s_b, s_c\}$ ¹, 16個のスイッチ $\{sw_1, \dots, sw_{16}\}$, 22箇所の配電区間 $\{s_1, \dots, s_{22}\}$ から構成されている。また、各配電区間にかかる負荷電流は、表1の通りである。例えば、区間 s_1 にかかる負荷は、 $I_1 = 40$ (A) である。配電網問題の実行可能解は閉じたスイッチの集合で表すことができる。

配電網問題は求解困難な組合せ最適化問題の一種であり、これまでフロンティア法を用いた解法等が提案されている [6]。トポロジ制約のみの配電網問題は、与えられた連結グラフと根と呼ばれる

表 1. 負荷電流の一覧 (A)

$I_a = 16$	$I_b = 41$	$I_c = 16$	$I_1 = 40$	$I_2 = 5$
$I_3 = 34$	$I_4 = 0$	$I_5 = 11$	$I_6 = 34$	$I_7 = 24$
$I_8 = 31$	$I_9 = 45$	$I_{10} = 24$	$I_{11} = 0$	$I_{12} = 45$
$I_{13} = 21$	$I_{14} = 20$	$I_{15} = 0$	$I_{16} = 0$	$I_{17} = 0$
$I_{18} = 0$	$I_{19} = 35$	$I_{20} = 20$	$I_{21} = 35$	$I_{22} = 20$

¹本稿では、変電所に直接つながっている配電線を変電所として扱う。

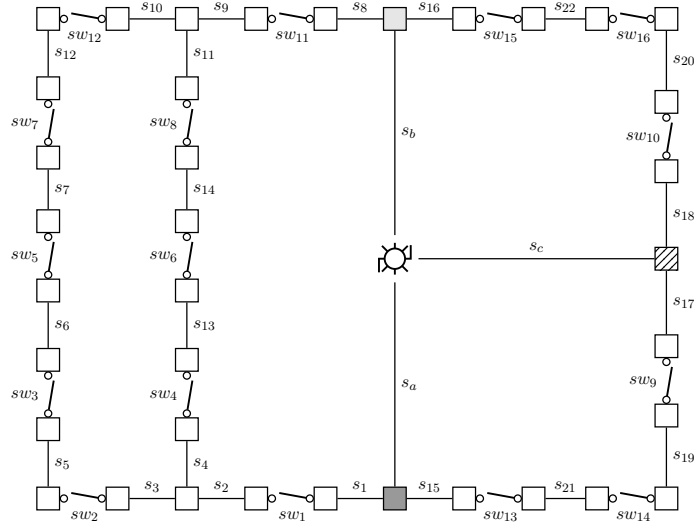


図 1. 配電網問題の例

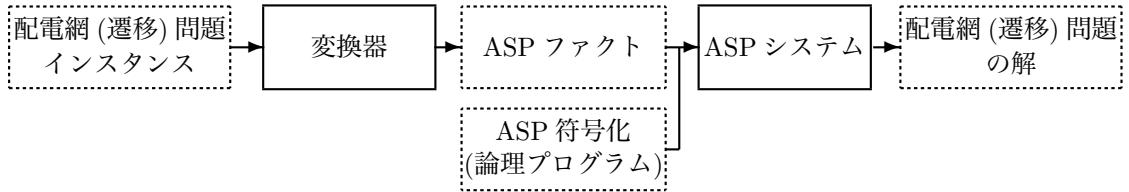


図 2. 提案アプローチの構成図

特殊なノードから、**根付き全域森**を求める部分グラフ探索問題に帰着できることが知られている [7]. 以降、この問題を**根付き全域森問題**と呼ぶ.

解集合プログラミング (Answer Set Programming; ASP[1, 3, 5, 8]) は、論理プログラミングから派生したプログラミングパラダイムである. ASP 言語は、一階論理に基づく知識表現言語の一種であり、論理プログラムは ASP のルールの有限集合である. ASP システムは論理プログラムから安定モデル意味論 [3] に基づく解集合を計算するシステムである. 近年, SAT ソルバーの技術を応用した高速な ASP システムが確立され、制約充足問題、プランニング、システム生物学、時間割問題、システム検証など様々な分野への実用的応用が急速に拡大している [2].

本稿では、解集合プログラミングを用いた根付き全域森問題の解法について述べる. 提案アプローチでは、まず与えられた問題インスタンスを ASP のファクト形式に変換した後、ASP ファクトと根付き全域森問題を解くための ASP 符号化と結合した上で、高速 ASP システムを用いて解を求める (図 2 参照).

根付き全域森問題を解く ASP 符号化 (論理プログラム) として、基本符号化と改良符号化の 2 種類を考案した. 特に、改良符号化は、根付き全域森問題の連結制約を ASP の個数制約で表現することにより、基礎化後のルール数を少なく抑えるよう工夫されており、大規模な問題に対する有効性が期待できる.

また、配電網における障害時の復旧予測への応用を狙いとし、根付き全域森問題の 2 つの実行可能解が、局所的な変形による遷移だけで互いに移りあえるかを問う“解の遷移問題”への拡張を行った. この遷移問題を解くには、複数の根付き全域森問題を繰り返し解く必要がある. しかし、各問題中の制約の大部分は共通であるため、ASP システムが同一の探索空間を何度も調べることになり、求解効率が低下するという問題点がある. この問題を解決するために、マルチショット ASP 解法を用いた実装を提案する. この解法は、ASP システムが同様の探索失敗を避けるために獲得し

た学習節を (部分的に) 保持することで、無駄な探索を行うことなく、制約を追加した論理プログラムを連続的に解くことができる。そのため、求解性能の向上が期待できる。

提案アプローチの有効性を評価するために、DNET (Power Distribution Network Evaluation Tool)² に公開されている問題集と、Graph Coloring and its Generalizations³ に公開されているグラフ彩色問題を基に生成した根付き全域森問題を用いて、実行実験を行なった。その結果、改良符号化は、基本符号化と比較して、より多くの問題をより高速に解くことができた。また、改良符号化は辺数 (スイッチ数) が 40,000 個を超える問題も解いており、大規模問題に対する ASP の有効性が確認できた。

解の遷移問題については、DNET で公開されている実用規模の問題 (fukui-tepc) をベースとした問題集を用いて実験を行った。その結果、マルチショット ASP 解法は、通常の解法と比較して、平均で 3.3 倍の高速化を実現し、マルチショット ASP 解法の優位性が確認できた。

本稿の構成は以下の通りである。2 節で根付き全域森の定義を示し、?? 節で解集合プログラミングの説明を行う。?? 節で根付き全域森問題の ASP 符号化を示し、?? 節で根付き全域森問題を遷移問題へ拡張を行う。?? 節で評価実験とその考察を述べ、最後に、?? 節で本稿をまとめる。

2 配電網問題と配電網遷移問題

2.1 配電網問題

配電網問題は、与えられた配電網 $D = (S, SW)$ から、以下の制約を満たす配電網の構成 (スイッチの開閉状態) が存在するかどうかを判定する問題である。 S は配電区間を表すセクションの集合、 SW は配電区間を結ぶスイッチの集合である。本論文では、配電網の構成を閉じたスイッチの集合 $X \subset SW$ で表す。 I_i は各セクション $s_i \in S$ の電流、 J_i^{max} は各セクション $s_i \in S$ における許容電流を表し、ともに入力として与えられる。

$$X \text{ によって定まる配電網構成に停電と短絡が発生しない} \quad (1)$$

$$J_i = \sum_{j \in S_i^{down}} I_j, \quad J_i \leq J_i^{max} \quad (\forall s_i \in S) \quad (2)$$

制約 (1) は**トポロジ制約**と呼ばれる。トポロジ制約を満たす配電網構成は、配電網 D に対応するグラフから、**根付き全域森**と呼ばれる部分グラフを求める問題に帰着できる [7]。根付き全域森の定義は以下の通りである。

定義. グラフ $G = (V, E)$ と、根と呼ばれる V 上のノードの集合が与えられたとする。このとき、 G 上の根付き全域森とは、以下の制約を満たす G の部分グラフ $G' = (V, E'), E' \subseteq E$ である。

- G' はサイクルを持たない。(非閉路制約)
- G' の各連結成分は、ちょうど 1 つの根を含む。(根付き連結制約)

制約 (2) は**電流制約**と呼ばれる。 S_i^{down} は、各セクション s_i に対して、自身を含む下流のセクションの集合を表す。 J_i はセクション s_i およびその下流の電流の総和を表し、許容電流 J_i^{max} 以下でなければならない。

上で述べた配電網問題の定義は、論文 [6] に基づいている。論文 [6] では損失電力を最小にする最適化問題として定義されている。本論文では、後で述べる配電網遷移問題への拡張を主眼とするため、配電網問題を判定問題として定義している。

²<https://github.com/takemaru/dnet>

³<https://mat.tepper.cmu.edu/COLOR04/>

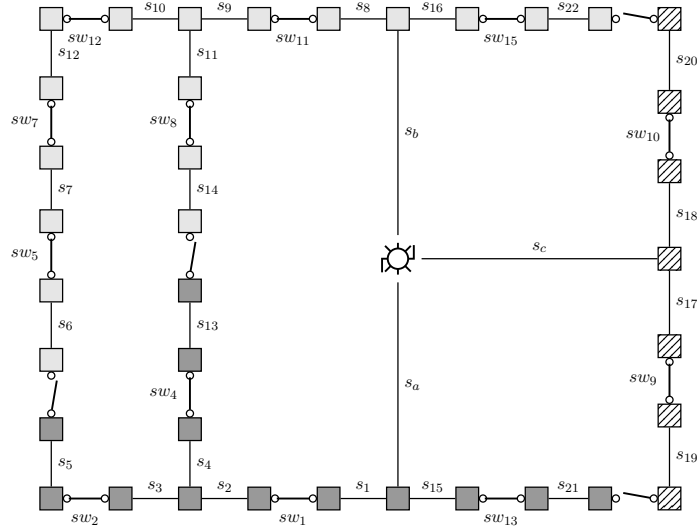


図 3. 配電網問題 (図 1) の解の一例

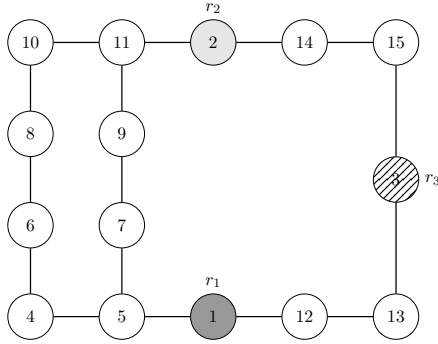


図 4. 配電網問題 (図 1) に対応する根付き全域森問題

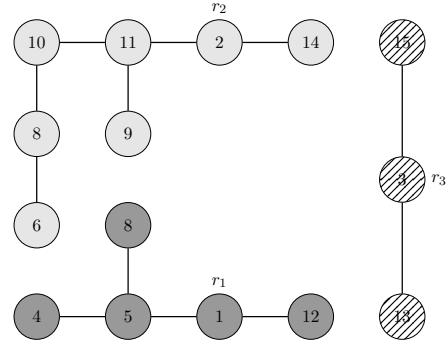


図 5. 配電網問題の解 (図 3) に対応する根付き全域森問題の解

また、各区間 i には、負荷 (電力需要) I_i が与えられる。

次に例として、図 1 で示した配電網問題の解を図 3 に示す。この解は電流制約を $V_{max} = 300$ として求められた解である。閉じたスイッチは、 $\{sw_1, sw_2, sw_4, sw_5, sw_7, sw_8, sw_9, sw_{10}, sw_{11}, sw_{12}, sw_{13}, sw_{15}\}$ である。このスイッチの集合から決まる配電経路は、図 3 の通り、トポロジ制約を満たしている。また、各変電所に $\{s_a, s_b, s_c\}$ について、それぞれ、 $s_a^{down} = \{s_a, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_{13}, s_{15}, s_{21}\}$, $s_b^{down} = \{s_b, s_6, s_7, s_8, s_9, s_{10}, s_{11}, s_{12}\}$, $s_c^{down} = \{s_c, s_{17}, s_{18}, s_{19}, s_{20}\}$ である。したがって、表 1 より、各供給経路に対する電流値の合計は、 $J_a = 162$, $J_b = 284$, $J_c = 71$ となり、電流制約も満たしている。

根付き全域森問題の入力例となるグラフを図 4 に示す。図 4 は、図 1 で示した配電網に対応しており、配電区間 $\{s_i \mid 1 \leq i \leq 22\}$ は、スイッチで区切られる 1 つのまとまりごとにノードに対応する。例えば、区間 $\{s_2, s_3, s_4\}$ は、ノード 5 に対応している。スイッチ $\{sw_1, \dots, sw_{16}\}$ は、辺に対応する。また、図中の色付きノード $\{r_1, r_2, r_3\}$ は変電所を含むことを意味しており、根に対応している。

根付き全域森の例を図 5 に示す。根付き全域森は、各連結成分が必ずちょうど 1 つの根をもつ木構造を形成することで、非閉路制約と根付き連結制約を満たす。図 5 は、図 3 の配電網問題の解に対応している。

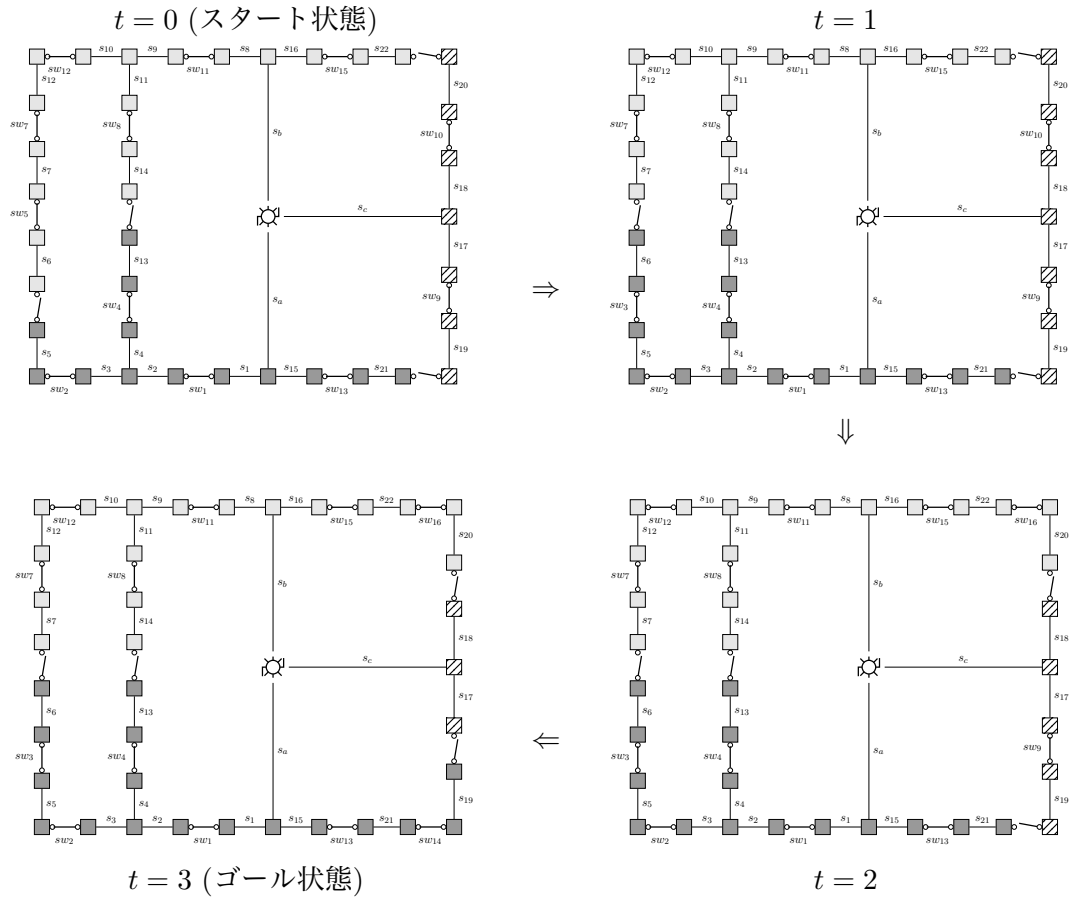


図 6. 根付き全域森遷移問題 (遷移制約 $d = 2$) の解の一例

2.2 配電網遷移問題

配電網の構成制御における障害時の復旧予測への応用を狙いとし、ある初期配電網構成 (スタート状態) から目的配電網構成 (ゴール状態) へのスイッチの切替手順を求める組合せ遷移問題を考える。各ステップ t と $t+1$ の間で切替可能なスイッチの個数を d 個に制限 (遷移制約) しながら、もとなる配電網問題の実行可能解のみを経由し、最短ステップ長での切替手順を求めることが目的である。この組合せ遷移問題を **配電網遷移問題** と呼ぶ。配電網遷移問題の解の一例を図 6 に示す。この例は、各ステップ t で切替可能なスイッチの数を $d = 2$ 以下に制限している。この解のステップ長は 3 であり、スタート状態 ($t = 0$) からゴール状態 ($t = 3$) まで、配電網問題の制約を満たしながら遷移していることがわかる。

参考文献

- [1] Chitta Baral. *Knowledge Representation, Reasoning and Declarative Problem Solving*. Cambridge University Press, 2003.
- [2] E. Erdem, M. Gelfond, and N. Leone. Applications of asp. *AI Magazine*, Vol. 37, No. 3, pp. 53–68, 2016.
- [3] Michael Gelfond and Vladimir Lifschitz. The stable model semantics for logic programming. In *Proceedings of the Fifth International Conference and Symposium on Logic Programming*, pp. 1070–1080. MIT Press, 1988.
- [4] 林泰弘, 川崎章司, 松木純也, 松田浩明, 酒井重和, 宮崎輝, 小林直樹. 分散型電源連系配電ネットワークの標準解析モデルの構築とネットワーク構成候補の多面的評価手法の開発. *電気学会論文誌*, Vol. 126, No. 10, pp. 1013–1022, oct 2006.

- [5] 井上克巳, 坂間千秋. 論理プログラミングから解集合プログラミングへ. コンピュータソフトウェア, Vol. 25, No. 3, pp. 20–32, 2008.
- [6] 井上武, 高野圭司, 渡辺喬之, 川原純, 吉仲亮, 岸本章宏, 津田宏治, 湊真一, 林泰弘. フロンティア法による電力網構成制御. オペレーションズ・リサーチ, Vol. 57, No. 11, pp. 610–615, nov 2012.
- [7] 川原純, 湊真一. グラフ列挙索引化技法の種々の問題への適用. オペレーションズ・リサーチ, Vol. 57, No. 11, pp. 604–609, nov 2012.
- [8] Ilkka Niemelä. Logic programs with stable model semantics as a constraint programming paradigm. *Ann. Mathematics and Artificial Intelligence*, Vol. 25, No. 3–4, pp. 241–273, 1999.