

# 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  
(081631066)

名古屋大学 工学部  
電気電子情報工学科

番原研究室中間発表  
2019 年 12 月 20 日

- 求解困難な組合せ最適化問題の一種.
  - **配電網問題**は, **トポロジ制約**と**電力制約**を満たした上で, 損失電力を最小にするスイッチの開閉状態を求める問題である.
  - **配電網**とは, **変電所**と**各家庭**との間で構成される電力供給経路のネットワークである.
  - 配電網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基盤技術として期待されている.
  - 既存研究
    - 二分決定グラフを用いた解法 [井上ほか '12 年]
- ⇒ 実用規模の配電網問題 (**スイッチ数 468 個**) の最適解を発見

# 解集合プログラミング (Answer Set Programming; ASP)

- ASP 言語は一階論理に基づく知識表現言語の一種である.
- ASP システムは論理プログラムから安定モデル意味論 [Gelfond and Lifschitz '88] に基づく解集合を計算するシステムである.
- 近年では SAT 技術を応用した高速 ASP システムが実現され, システム検証, プランニング, システム生物学など様々な分野への応用が拡大している.

## ASP を配電網問題に用いる利点

- ASP 言語の高い表現力を活かし, トポロジ制約を簡潔に記述可能.
- 背景理論付き ASP 技術を用いることにより, 電力制約を実装可能.
- 充足不能コア等の SAT 技術を応用した効率的な最適値探索が可能.

# 研究目的

## 目的

配電網問題に対して ASP を適用し、その有効性を評価する。

## 研究方針

- ① トポロジ制約のみの配電網問題
- ② 電力制約と目的関数への拡張

## 研究内容

- トポロジ制約のみの配電網問題に対して、2 種類の ASP 符号化を考案した。
  - 上限，下限に基づく符号化。
  - ASP 言語の表現性を利用した符号化。
- 実用規模の配電網問題、及び、より大規模な問題を用いた評価実験。
  - 問題の規模に関する比較評価。
  - 生成される制約の数の比較評価。

# トポロジ制約のみの配電網問題と根付き全域森

## トポロジ制約のみの配電網問題

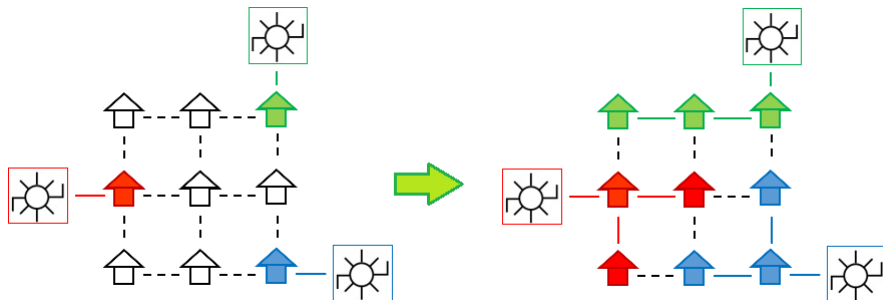
与えられた連結グラフから変電所を根とする根付き全域森を見つける部分グラフ探索問題に帰着できる.

## 根付き全域森

グラフ  $G = (V, E)$  ( $V: G$  の頂点集合,  $E: G$  の辺集合) と, 根と呼ばれる  $V$  上の頂点  $r_1, \dots, r_k$  が与えられたとき,  $G$  上の根付き全域森は以下の条件を満たす  $G$  の部分グラフ  $G' = (V, E'), E' \subseteq E$  である.

- ①  $G'$  はサイクルを持たない.
- ②  $G'$  の各連結成分は, ちょうど 1 つの根を含む.

# 根付き全域森となる配電網の例



- 供給経路内に閉路が存在しない.
- 各家庭は必ず接続され、停電区間が存在しない.
- 各家庭はちょうど1つの変電所에만接続されている.

# 提案する ASP 符号化 (1/2)

## 符号化の手法

- ① ある辺  $(X, Y)$  が, 選択され森に含まれることを  $\text{inForest}(X, Y)$  と表す.
- ② 頂点  $X$  について, ある根  $R$  からその頂点へ到達可能であることを  $\text{reached}(X, R)$  とする.
- ③ 各根である頂点  $R$  について  $\text{reached}(R, R)$  を生成する.
- ④ 頂点  $\text{reached}(X, R)$  とそれを端点にもつ森に含まれる辺  $\text{inForest}(X, Y)$  に対し, もう一方の頂点について  $\text{reached}(Y, R)$  を生成し, 同じ根から到達可能とする.
- ⑤ 各連結成分が木構造であることから, 木の性質より, 各連結成分について, 選択される **辺の数に関する制約** **頂点の数  $-1$**  を導入する.
- ⑥ 各頂点はちょうど 1 つの根からのみ到達可能であるという, 頂点に到達可能な **根の数に関する個数制約** を導入する.

この個数制約について次の 2 種類の符号化  $\text{dnet1}$ ,  $\text{dnet2}$  を考案した.

## 提案する ASP 符号化 (2/2)

各頂点はちょうど1つの根からのみ到達可能である.

### dnet1

2つの制約を導入し, それぞれについて生成することにより, ちょうど1つであることを表す.

- ① 各根について, 少なくとも1つはその頂点に到達可能である.
- ② 各頂点について, 高々1つの根から到達可能である.

### dnet2

各頂点について, 到達可能となる根をを1つ選択するという制約を生成する.



2 種類の ASP 符号化 dnet1, dnet2 に対し, 以下のベンチマークを行った.

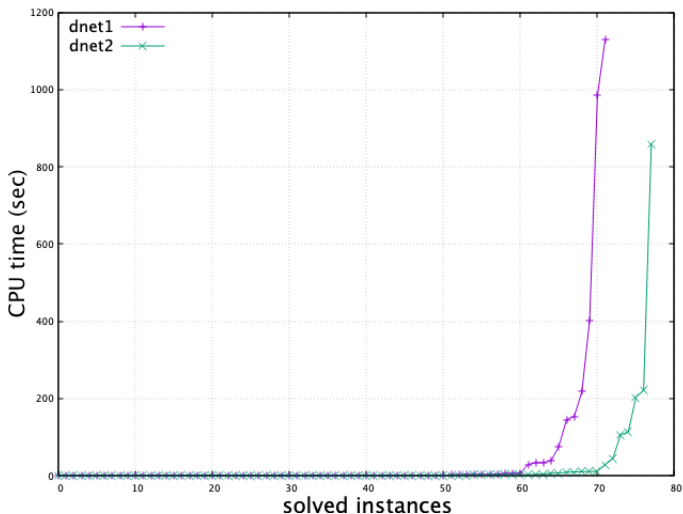
- 使用問題: 全 83 問
  - 配電網モデル 3 問 (スイッチ数: 16 個, 36 個, 468 個)
  - *Graph Coloring and its Generalizations*<sup>†</sup> で公開されている  
グラフ彩色問題のうち, 辺の数が 10000 以下の無向グラフ 80 問<sup>‡</sup>
- ASP システム: *clingo-5.4.0*
  - オプション: *trendy*
- 制限時間: 1800 秒/問

---

<sup>†</sup><https://mat.tepper.cmu.edu/COLOR04/>

<sup>‡</sup>各問題に対し, 頂点のうち 1/5 個をランダムに根として与えた.

# 実験結果 (1/3)



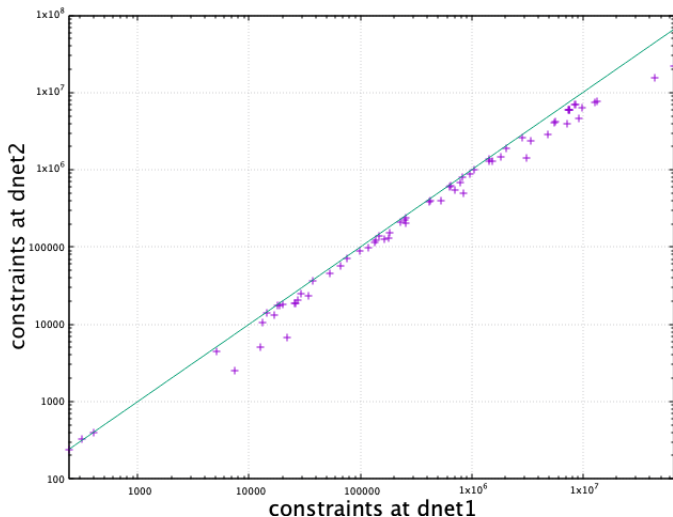
- dnet2の方がdnet1よりも制限時間内に解ける問題の数が多い。
- 多くの問題においてASPは実行CPU時間が小さい。

表: 各符号化の問題の規模ごとの解けた問題数

辺の数 $ E $	問題数	dnet1	dnet2
$0 \leq  E  < 3000$	46	46	46
$3000 \leq  E  < 6000$	22	20	20
$6000 \leq  E  < 10000$	15	6	12
計	83	72	78

- 比較的小さな規模の問題においては、符号化による性能の違いは大きく見られなかった。
- 問題の規模が大きな問題に対しては dnet2 による符号化は dnet1 よりも解ける問題数が多く、より高い拡張性を持つといえる。

## 実験結果 (3/3)



- 全体的に dnet2 の方が dnet1 による符号化よりも生成される制約の数が少なくなっている。

# まとめと今後の課題

トポロジ制約のみの配電網問題に ASP を適用し、その有効性を評価するために以下を行なった。

## まとめ

- トポロジ制約のみの配電網問題に対して、2 種類の ASP 符号化を考案した。
  - 考案する符号化を ASP 言語を用いて、簡潔に記述することができた。
  - ASP 言語の高い表現力によって、制約の数を減らすことができた。
- 実用規模の配電網問題、及び、より大規模な問題を用いた評価実験。
  - 実用規模の配電網問題においては、ASP は高い性能を示した。
  - 大規模な問題においても、ASP は問題を解くことができるが、生成される制約の数が少ない方がより高い拡張性を持つと考えられる。

## 今後の課題

- さらなる拡張性を持つ符号化の考案。
- 根付き全域森の緩和問題、及び、遷移問題への拡張。
- 電力制約と目的関数最適化への拡張。

# スマートグリッド

- スマートグリッドとは、電力の供給側、需要側において双方向のやり取りを可能にする次世代の賢い電力網である。
- 従来は一方的に発電所から電力を送り出していたが、通信技術の発達により、使用状況などをリアルタイムに把握することが可能となった。
- その時に応じた最適な配電網を構成し、制御するといったことが考えられている。
  - 電力需要の変化による、配電ロスの少ない構成。
  - 自然エネルギーによる発電量の変動を補う構成。

- 電線の各区間で許容電流を超えない.
- 電線の抵抗による電圧降下が許容範囲を超えない.
  - 遠くに電力を伝えるほど電圧降下が激しくなる.
  - 電流が大きいほど電圧降下が激しくなる.
- 三相交流抵抗のバランスが必要.
- その他にも様々な条件がある.
- 電流と電圧が影響し合うので ASP 言語だけでは記述できない.