

相互依存性評価に向けた電力ネットワークの接続脆弱性分析の検討

岐阜大学 学生会員 ○石樽 晃多
 岐阜大学 正会員 倉内 文孝
 岐阜大学 非会員 應 江黔

1. 研究背景・目的

現在、地方部の高齢化・過疎化により、日常生活での交通依存が加速しており、災害時の交通システムの機能低下による影響が懸念される。また、近年の気候変動による災害の多頻度化・激甚化により、特定のエリアに存在するインフラが集中的に被災する事例や隣接する構造物にも被害が及ぶ事例が多発し、インフラネットワーク間の相互依存による影響が顕在化している。本研究では、相互依存する複数ネットワークの接続性や脆弱性の評価に向け、インフラネットワークをグラフモデルで表現し、災害発生などを想定したシナリオ分析を行うことにより、単体のネットワークでの接続性や脆弱性を評価する手法の開発を試みる。

2. インフラの相互依存関係

内閣府は、第5期科学技術基本計画において、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより開かれる未来社会「Society 5.0」を提唱した。大容量かつ低遅延な5G通信は、自動運転におけるV2Xに必要不可欠である。他方、EVに搭載されるバッテリーは非常時の電源供給施設の代替としても活用例がある。このように、社会に先端技術が普及するとともに分野横断的な連携が要求されることが容易に想像できる。

3. 接続脆弱性評価問題の定式化

本研究では、重要インフラのうち電力ネットワークを対象とする。

3.1. 電力供給判定モデルの構築

先行研究²⁾では、電力の特性が反映されておらず、交通流と同様のフレームワークで接続性を評価していた。これに対し、本研究では、ネットワーク内の電力の流れ（潮流）を合理的かつ効率的に流す、潮流最適化の概念を活用する。潮流は、2つの交流の位相差により制御可能であり、最適な位相差を線形計算で求められるようにしたものがDC潮流方程式である。本研究ではこれを用い、最適な潮流を実現させる。以下が供給判定に用いる最適化問題である。

$$\min_{\delta, P} \sum_{n \in \mathbf{N}_c} P_n \quad (1)$$

subject to

$$0 \leq P_n \leq \bar{P}_n \quad \forall n \in \mathbf{N}_p \quad (2)$$

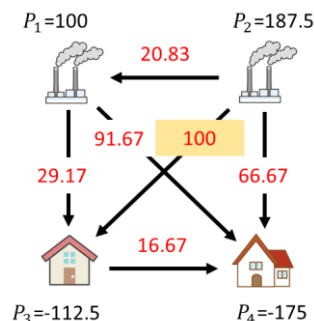


図-1 供給判定モデルの試算結果

$$\bar{P}_n \leq P_n \leq 0 \quad \forall n \in \mathbf{N}_c \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^N P_n = 0 \quad (4)$$

$$P_n = \sum_{m \in \text{Out}_n} |V|^2 Y_{nm} (\delta_n - \delta_m), \quad \forall n \in \mathbf{N} \quad (5)$$

$$\delta_1 = 0 \quad (6)$$

$$|V|^2 Y_{nm} (\delta_n - \delta_m) \leq c_{nm}, \quad \forall n, m \in \mathbf{N}, n \neq m \quad (7)$$

$$P_n, \delta_n \in \mathbb{R}, \quad \forall n \in \mathbf{N} \quad (8)$$

P_n	:	ノード n の電力量
\bar{P}_n	:	ノード n の最大発電量（負荷量）
\mathbf{N}	:	ノード集合
\mathbf{N}_p	:	発電ノード集合
\mathbf{N}_c	:	需要ノード集合
V	:	電力ネットワーク内の電圧
Y_{nm}	:	リンク nm のアドミッタンス
δ_n	:	ノード n の位相角
c_{nm}	:	リンク nm の容量

目的関数である式(1)は、需要地における電力負荷量最大化（電力供給量最大化）を意味する。式(2)および(3)は、各ノードの電力量について、発電量（+）および負荷量（-）が上限以下であることを示す。式(4)は、総発電量と負荷量が一致していることを意味する。式(5)は、各ノードの電力量の保存条件である。式(6)は、各ノードの位相を決定するのに必要となる基準となる位相を定めている。式(7)は、リンク容量制約である。

発電所から一般家庭まで電気を送ることを想定した簡易的なネットワークにおいてモデルを適用した結果を図-1に示す。リンク上の数字が電力量、 P が各

ノードの発電量もしくは供給量を表す。ここでは、リンク容量をそれぞれ 100 として計算しており、容量制約を満たしつつ目的関数を最小化した解を得ることができている。

3.2. 脆弱性評価

脆弱性の評価手法として、ランダム順にリンク（ノード）を破壊し、その際の接続状態が確保されているノード数をもとに電力供給率を算出する。電力供給率とは、各ノードに割り当てた電力需要量をもとに、全ノードの需要量に対する接続されているノードへの供給量の割合のことである。この操作を異なるランダムシードで複数回繰り返すことにより乱数の影響を排除した上で、リンク（ノード）破壊率に対する平均電力供給率や分散等により評価を行う。また、様々な計算ケースにおいて、特定のリンク（ノード）が破壊されたことによる電力供給率の低下率が大きくなる場合がある。そのリンク（ノード）はネットワークの接続性に大きな影響を及ぼすと考えられることから、これをクリティカルリンク（ノード）と称し、計算によって特定していく。

4. 下呂市を対象とした実証評価

本研究では、電力供給判定モデルの適用先として、岐阜県下呂市を選定する。

4.1. 下呂市の電力ネットワーク

QGIS を用い、送電網と配電網を合わせた下呂市の電力ネットワークを図化したものを図-2 に示す。ノード数 2,573、リンク数 2,707 のネットワークである。黄点が発電所もしくは配電用変電所の位置を表し、ネットワーク内に 11 か所存在する。当ネットワークには下呂市外に位置する 3 か所の発電所も含まれる。

4.2. 電力ネットワークの計算結果

すべてのリンクおよびノードに障害が発生していない条件下での計算結果を図-3 に示す。赤線の太さと電力供給量は比例している。なお、ある 1 種類の電線で構成されていると仮定し、リアクタンスや容量等はそれに即した値を用いた。下呂市南部の送電線に大量の電力が送られている。また、発電所周辺や、国道 41 号等の幹線道路上において多く供給されていることがわかり、一般的な考えと合致する。

4.3. 脆弱性評価の計算結果

リンク破壊を異なるランダムシードで 10 回繰り返したときの電力供給率の結果を図-4 に示す。縦軸が電力供給率、横軸が全リンクに対する破壊したリンクの割合、赤線が各計算結果の平均値を表す。各計算はリンク破壊率が 35% になるまで実施した。リンク破壊率の増加とともに、おおよそ直線に近い形で電力供給率が低下し、リンク破壊率 20% の段階で電力供給率も 20% 程度と、急激に接続性が失われることがわかる。

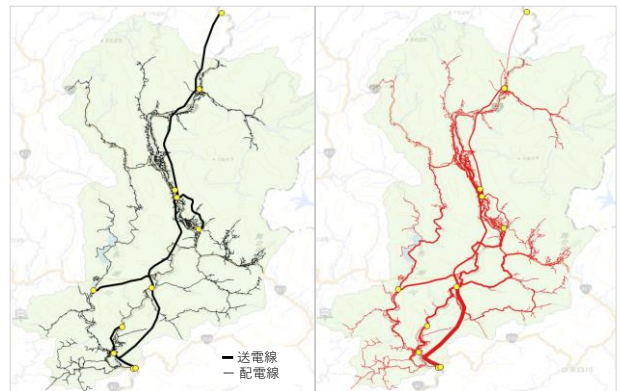


図-2 下呂市の電力ネットワーク（左）

図-3 障害なしでの計算結果（右）

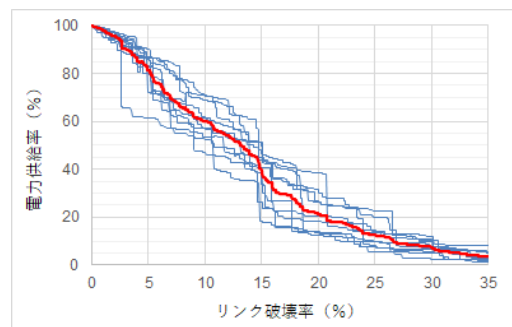


図-4 電力供給率の変化

また、クリティカルリンク（ノード）の特定に関しては、当日説明する。

5. 今後の方針

脆弱性評価においてリンク破壊をランダム順に行ったが、災害シナリオに応じた適切な破壊想定をしていく。電力ネットワーク単独での接続脆弱性評価を行った後には、同じく重要インフラである交通や情報通信ネットワークにも対象を広げていく。その後、3 ネットワークの相互依存性を考慮した上で接続脆弱性評価を行い、最終的には、相互依存性を有するインフラネットワークの脆弱性を改善するためのネットワークデザイン手法（NDP）を構築していく。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP18H01557 の助成を受け遂行された。また、岐阜県下呂市の電力ネットワークの作成に当たっては、中部電力パワーグリッド株式会社に協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 内閣府, “Society 5.0 -科学技術政策- “
URL : https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/
- 2) 松下祥大:「インフラネットワークの相互依存性を考慮した接続脆弱性評価手法の構築」, 岐阜大学工学部卒業研究, 2022.3