T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	電力系統におけるロバスト性を考慮した設備配置のための数理計画モデル
Title(English)	
著者(和文)	渡邊勇
Author(English)	Isamu Watanabe
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12348号, 授与年月日:2023年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小野 功,三宅 美博,山村 雅幸,石井 秀明,青西 亨
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12348号, Conferred date:2023/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

電力系統におけるロバスト性を考慮した設備配置のための数理計画モデル

渡邊 勇

博士（工学）論文

電力系統におけるロバスト性を考慮した設備配置のための数理計画モデル

Mathematical Programming Model for Facility Placement Considering Robustness in Power Systems

指導教官：小野 功 教授
氏　　名：渡邊 勇

目 次

第 1 章　序論 **4**
1.1　背景と目的 4
1.2　方法と意義 6
1.3　論文の構成 7

第 2 章　問題の所在 **9**
2.1　はじめに 9
2.2　電力系統の概要と環境変化への対応 9
2.2.1　電力系統の構成と運用 9
2.2.2　電力系統を取り巻く環境変化への対応 11
2.3　不正データ注入攻撃に対するロバストなメータ配置 11
2.3.1　電力系統状態推定と不良データ検出 11
2.3.2　不正データ注入攻撃 13
2.3.3　攻撃検知に関する問題点 13
2.3.4　本論文での接近法 14
2.4　事故復旧のための分散型エネルギー資源の最適配置 15
2.4.1　電力系統事故時の復旧操作 15
2.4.2　問題点 16
2.4.3　本論文での接近法 17
2.5　おわりに 17

第 3 章　状態推定における不正データ注入攻撃に対するロバストなメータ配置 **18**
3.1　はじめに 18
3.2　ロバストなメータ配置のための数理計画モデルの提案 18
3.2.1　モデル化の方針 18
3.2.2　必須メータへの攻撃のみを考慮したモデル 19
3.2.3　追加メータへの同時攻撃を考慮した拡張 21
3.2.4　モデル化のまとめ 23
3.3　制約式を表す係数行列 $\mathbf{B}$ のコンパクト化法の提案 24
3.3.1　基本的な考え方 24
3.3.2　コンパクト化の基本手順 25
3.3.3　全体アルゴリズム 26
3.4　数値実験 26

3.4.1 目的 26
3.4.2 テスト系統 26
3.4.3 設定 27
3.4.4 結果 28
3.5 考察 29
3.5.1 最適配置の探索過程 29
3.5.2 非線形制約の線形化および係数行列 **B** のコンパクト化の有効性 . . . 29
3.5.3 不正データ注入攻撃の実現性と攻撃検知 33
3.6 おわりに 34

第 4 章 不確実環境下における事故復旧のための分散型エネルギー資源の最適配置 36
4.1 はじめに 36
4.2 分散型エネルギー資源の最適配置モデル 36
4.2.1 集合および決定変数 36
4.2.2 制約条件 37
4.2.3 目的関数 40
4.3 不確実性を考慮するためのモデル拡張 41
4.3.1 決定変数と制約条件の再定義 41
4.3.2 全体モデル 42
4.4 数値実験 44
4.4.1 目的 44
4.4.2 テスト系統 44
4.4.3 設定 45
4.4.4 結果 46
4.5 考察 50
4.5.1 上位ランクの配置 50
4.5.2 数値実験の設定条件 51
4.6 おわりに 52

第 5 章 結論 54
5.1 研究成果のとりまとめ 54
5.2 今後の課題 55
5.2.1 不正データ注入攻撃に対するロバストなメータ配置 55
5.2.2 事故復旧のための分散型エネルギー資源の最適配置 56

謝辞 58

公表論文 59

参考文献 60

第1章　序論

1.1　背景と目的

産業活動や家庭生活，社会機能など様々な分野での高度化，情報化，多様化の進展に伴い，電力供給が停止し停電が発生した際の社会的な影響は以前にも増して大きくなっており，電力の質に対する要請は今後一層厳しくなっていくものと予想される．そのため，良質かつ低廉な電力を安定的に供給するためには，停電発生に対する各種の対策を事前に検討しておくことが極めて重要となる．一方で，電気事業を取り巻く環境は近年大きく変化している．例えば，新たな脅威となっているサイバー攻撃の増加，分散型エネルギー資源（Distributed Energy Resources; DER）の普及拡大，自然変動電源の大量導入に伴う出力変動などの不確実性の増大，などが挙げられる．このような環境変化を考慮したうえで将来想定される様々な状況に対応できるロバストな対策について，特に停電発生に対し「事前」および「事後」の両面から検討しておく必要がある．

電力系統は多数の発電設備と膨大な数の負荷が送電線や変圧器などの流通設備によって密接に連結した大規模かつ複雑なシステムであり，電力を安定的に供給するためには系統の状態を常に把握しておくことが重要となる．そのため，系統内には有効・無効電力，電圧，電流，周波数，遮断器の開閉状態，変圧器タップ変化などのデータを観測するためのメータ（観測装置）が多数設置され，そこで観測されたデータは SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) とよばれる監視制御システムに集約・処理されたのち，系統の監視制御に用いられる [1, 2]．しかし，すべてのデータをメータで取得することは困難であることから，限られた観測データをもとに系統全体の状態を把握する状態推定（State Estimation）が行われる．また，不良データの混入は状態推定を誤らせ，その後の系統制御に甚大な影響を及ぼす危険があることから，これまでに数多くの不良データ検出法（Bad Data Detection; BDD）が提案されている [3, 4]．これらの検出手法を用いることで，サイバー攻撃による不正データの意図的な混入も検出できると考えられていた．しかし，既存の手法では検出できない不正データ注入攻撃（False Data Injection Attack）による危険性が指摘され [5]，これまでに数多くの研究が行われている [6, 7, 8, 9, 10, 11]．機器の故障等によって偶発的に混入する不良データとは異なり，複数データへの同時協調的な不正データの注入は系統制御にとって新たな脅威となり得るため，必要な対策について事前に検討しておく必要がある．

不正データ注入攻撃に関する研究は，攻撃側と防御側の両視点から大別することができる．攻撃側の視点からは，同時攻撃が必要となるメータ数をできるだけ少なくし，防御側に検知されるリスクを抑えたいという要求がある．不正データ注入攻撃に対する系統の脆弱性を評価するために，同時に攻撃しなければならないメータ数で定義されるセキュリティ指標

が提案されている [12, 13]．また，最小カットを求めることで効率的にセキュリティ指標を計算する方法も提案されている [14, 15, 16]．一方，防御側の視点からは，不正データ注入攻撃から系統を守るために，最低限防御しなければならないメータ集合を同定する研究が行われている [17, 18, 19, 20]．特に，不正データ注入攻撃から系統を守る（可観測性を維持する）ためには，必須メータを防御すれば必要十分であることが証明されている [17]．また，系統全体ではなく，重要度の高い一部の母線（状態値）だけを攻撃から守るとした一般化についても提案されている [21, 22]．

本論文で対象とするロバストなメータ配置は防御側の視点からの検討に分類される．ロバストなメータ配置について，当初は偶発的な機器の故障によるデータ欠損などが主な対象であったため，単一故障に対してロバストなメータ配置を求める研究が中心であったが [23, 24, 25, 26]，その後，複数メータの同時故障を扱った問題へと拡張されている [27, 28]．複数メータの同時故障に対するロバストなメータ配置については，既設のメータにおける各想定故障に対し，可観測性を維持できる追加メータの候補を抽出したのち，抽出した候補の中から最適な追加メータを選択する整数計画問題として定式化を行っている．しかし，いずれの手法も既設メータの故障のみを対象としており，新たに追加するメータを含めた同時故障については考慮していない．

停電は，突発的な事故や自然災害，意図的なサイバー攻撃など様々な原因によって発生し，その発生を完全に防ぐことは極めて難しいことから，事後対応として，停電した負荷を確実かつ迅速に復旧することが重要な課題となっている．主に放射状で運用されている負荷系統での事故時復旧操作（Service Restoration）は，線路に設置されている多数の遮断器や開閉器を操作して放射状の系統構成を変更することで実現しており，最終的な放射状系統構成（復旧目標系統）を決定する問題とその復旧目標系統に至るまでの操作手順を決定する問題とに大別される．これまでに，エキスパートシステム [29, 30], ファジー推論 [31, 32, 33], 数理計画法 [34, 35, 36]，ヒューリスティック探索 [37, 38, 39], シミュレーテッド・アニーリング [40, 41, 42]，タブー探索 [43, 44, 45]，遺伝的アルゴリズム [46, 47, 48, 49, 50, 51, 52], マルチエージェントシステム [53, 54, 55, 56]，多目的最適化 [57] など様々な最適化技術に基づく手法が数多く提案されている [58, 59]．しかし，既存手法の多くは最終的な復旧目標系統を求める問題を最適化の対象としており，復旧操作手順の最適化を含めた復旧操作全体の最適化を扱った研究は少ない．第 1 段階で最適な復旧目標系統を生成し，第 2 段階で実現可能な復旧操作手順を探索する 2 段階手法 [60, 61, 62] も提案されているが，復旧操作全体の最適化という点では不十分である．

この復旧操作全体の最適化という課題に対し，多時間ステップ復旧最適化手法（Multi-Time Step Service Restoration）が提案されている [63]．本手法は事故時の復旧操作を混合整数計画問題としてモデル化し，各時間ステップでの運用制約だけでなく複数の時間ステップに関係する制約条件を考慮し，評価期間全体の復旧負荷量を最大化するものである．また，分散型電源（Distributed Generator; DG）や電力貯蔵設備（Energy Storage System; ESS）などの分散型エネルギー資源の運用を考慮している点が特長である．しかし，分散型エネルギー資源は負荷系統やマイクログリッドにおける事故復旧にとって有用なエネルギー

資源として近年評価されているが，分散型電源や電力貯蔵設備の偶発的な故障といった不確実性を扱った研究は少ない [64, 65, 66, 67]．もし故障などが原因で分散型エネルギー資源が使用できなくなった場合，停電した負荷の迅速な復旧に多大な影響を及ぼすことから，分散型エネルギー資源の不確実性を考慮することは重要である．さらに，分散型エネルギー資源の配置まで含めて最適化することで，より効率的な事故復旧が期待できる．

本論文の目的は，以下の 2 点である．1) 故障発生の事前対策として，電力系統への不正データ注入攻撃に対するロバストなメータ配置を効率的に求めるための数理計画モデルを提案し，数値実験により従来モデルに対する優位性を示すこと，および，2) 故障発生の事後対策として，不確実環境下において迅速かつロバストな事故復旧に向けた分散型エネルギー資源の最適配置を求める数理計画モデルを提案し，数値実験により提案モデルの妥当性や有用性を示すことである．

1.2 方法と意義

本論文では，はじめに，電力系統を対象とした状態推定法と不良データ検出法を紹介する．また，従来の推定残差に基づく不良データ検出法では検知できない不正データ注入攻撃について説明し，このサイバー攻撃に対処した既存の数理計画モデルとその問題点について議論する．具体的には，従来モデルが想定している攻撃の対象が既設の必須メータに限定されている問題点を指摘する．また，従来モデルが攻撃検知に関する非線形の制約式を含んでいることで，より多くのメータへの同時攻撃への拡張性に加えて計算効率性の面でも問題があることを指摘する．次に，3 箇所のメータへの同時攻撃までを対象に，必須メータに加えて追加メータへの同時攻撃も考慮したロバストなメータ配置を求めるための数理計画モデルを提案する．従来モデルの問題点を解決するため，メータへの攻撃パターンに応じた攻撃検知に関する線形の制約式を導出することで，より多くの攻撃パターンに対応できるロバスト性の向上を図る．複数のテスト系統を用いた数値実験により，従来モデルに対する提案モデルの優位性を示す．次に，迅速な事故復旧の実現における，復旧操作全体での最適化，分散型エネルギー資源の活用，不確実性の考慮の重要性について説明し，これらに対処した既存の数理計画モデルとその問題点について議論する．具体的には，これらの重要項目を総合的に勘案し検討できる数理計画モデルがないことを指摘する．次に，復旧操作に関する運用制約を考慮した分散型エネルギー資源の最適配置を求める基本モデルを提案し，さらに不確実性を考慮できるモデルへと拡張する．不確実性を複数のシナリオで表現し，各シナリオの発生確率に応じた復旧操作を評価に反映させることで，分散型電源の偶発的な故障などの不確実性を考慮できるロバストな数理計画モデルの構築をねらう．最後に小規模のテスト系統を用いた数値実験により，提案モデルの妥当性や有用性を示す．

本論文が対象とする電力系統への不正データ注入攻撃は，従来の推定残差に基づく不良データ検出法では検知できない新たなサイバー攻撃としてその危険性が指摘されて以降，攻撃による影響分析や効果的な防御策の検討など，数多くの成果が報告されている研究分野である [68, 69, 70, 71, 72]．従来モデルによる成果は，複数メータへの同時攻撃を検知可能な

コスト最小なメータ配置を厳密に求めることができる点で有用性の高いものである．本論文での提案モデルはこの接近法を発展させ，より多くのメータへの同時攻撃に対しても可観測性を維持できる新たな制約条件を追加したモデルであり，対処可能な同時攻撃のバリエーションを増やしたという点で今後さらなる拡張が期待できるものである．また，既設のメータへの同時攻撃を対象とするだけでは防御策としては不十分であり，攻撃検知のために追加配置するメータも含めた同時攻撃を検討対象とする必要性を指摘した点で意義の高いものであると考える．メータ配置などの設備計画関連の最適化については，十分時間をかけた検討が許されているなど時間的な制約が厳しくない面もあるが，数理計画モデルによる厳密な最適化については計算時間が課題になることが多く，実規模系統への適用を考えた場合には可能な限り計算効率性を追求しておく必要がある．本論文の成果の一つである係数行列（制約式）のコンパクト化法は，この計算効率性に関する課題への有用な解決法であることを示唆している．

事故時復旧操作は，大規模な事故の場合には広範囲の系統切替が必要になるなど複雑化するため，復旧操作の的確化や迅速化が重要な課題の一つとなっている．また，今後は分散型エネルギー資源の普及拡大などの系統側での変化も予想され，系統運用者が考慮すべき要因がさらに複雑化する懸念もあり，事故時の復旧操作支援に対するニーズは高まってきている．一方，電力システム改革の進展に伴う電力流通設備への投資抑制やコストダウンの流れの中，投資効果を定量的に分析し設備投資を効率的に実施することが重要となっている．事故時の復旧操作に関する最適化研究の多くは，既設の電力流通設備を適切に活用して迅速な停電復旧を実現することを主眼にしているが，本論文での成果は分散型エネルギー資源の復旧操作への利活用および最適配置による投資抑制効果を同時かつ定量的に分析できるという点で意義の高いものと考える．また，復旧目標系統の決定だけでなく復旧目標系統に至る操作手順まで含めた復旧操作全体での最適化を狙った研究は既に提案されているが，本論文の成果は不確実性を考慮したうえで最適化を図っている点で従来モデルの成果を発展させたものである．本論文での提案モデルを用いることで，従来の確定的なモデルでは検討が難しい，不確実性を考慮したロバストな配置を発見できるようになると期待される．

以上より，本論文の成果は，電力の安定供給および経済効率性の確保に向けた設備計画に関する数理最適化分野の研究を牽引し，そのさらなる発展に大きく寄与すると期待される．

1.3　論文の構成

本論文は「電力系統におけるロバスト性を考慮した設備配置のための数理計画モデル」と題し，全 5 章から構成される．

第 1 章は「序論」である．

第 2 章は「問題の所在」である．不正データ注入攻撃に対するロバストなメータ配置について，まず準備として，電力系統の状態推定法と不良データ検出法について紹介する．次に電力系統へのサイバー攻撃の一種である不正データ注入攻撃の仕組みと従来方法による検知の困難さについて説明し，この攻撃に対処した既存の数理計画モデルとその問題点を示す．

その後，この問題点の解決のために本論文で採用した接近法を示す．次に事故復旧のための分散型エネルギー資源の最適配置について，まず事故時復旧操作の基本となる系統切替操作について述べる．そして迅速な事故復旧の実現にとって重要となる，復旧操作全体での最適化，分散型エネルギー資源の活用，不確実性の考慮について論じ，これらに対処した既存モデルとその問題点を示す．最後にこの問題点の解決のため，本論文でとる接近法を示す．

第 3 章は「状態推定における不正データ注入攻撃に対するロバストなメータ配置」である．ここでは，第 2 章で示す接近法に従い，3 箇所のメータへの同時攻撃までを対象にしたロバストなメータ配置を求めるための数理計画モデルを提案する．まず従来モデルにおける非線形制約を線形化したモデルを示し，次に 3 箇所のメータへの同時攻撃まで考慮できるモデルへと拡張する．さらに，冗長な制約式を排除して係数行列をコンパクト化する方法を提案する．問題規模の異なる複数のテスト系統を用いた数値実験を行い，従来モデルに対する提案モデルの優位性を示す．また，係数行列のコンパクト化の有効性やユーザパラメータに関する考察を行う．

第 4 章は「不確実環境下における事故復旧のための分散型エネルギー資源の最適配置」である．ここでは，第 2 章で示す接近法に従い，復旧操作全体の最適化，分散型エネルギー資源の活用，不確実性の考慮，のすべてを含んだ数理計画モデルを提案する．まず分散型エネルギー資源の配置に関する考え方とそれを実現する基本モデルを示し，次に不確実性を考慮したモデルへと拡張する．テスト系統を用いた数値実験を行い，迅速かつロバストな事故復旧における提案モデルの妥当性や有用性を示す．

第 5 章は「結論」である．ここでは本論文の成果をとりまとめ，今後の課題を述べる．

なお，本論文の第 3 章は，電気学会論文誌 C に掲載された論文 [73] をもとに加筆修正したものである．

第2章　問題の所在

2.1　はじめに

本章では，本論文の対象である「状態推定における不正データ注入攻撃に対するロバストなメータ配置」と「事故復旧のための分散型エネルギー資源の最適配置」を分けて問題の所在を示す．はじめに，不正データ注入攻撃に対するメータ配置を対象に，推定残差に基づく従来の不良データ検出法では検知できない不正データ注入攻撃の仕組みを説明し，この攻撃に対処した既存の数理計画モデルにおける問題点を指摘する．そして，この問題点に対する本論文での接近法について論じる．次に事故復旧のための分散型エネルギー資源の配置を対象に，迅速な事故復旧を実現するために重要となる検討項目について論じ，既存モデルによる対処では不十分であることを指摘する．最後に，その問題点の議論に基づき，本論文で採用する接近法について述べる．

本章の構成は以下のとおりである．第 2.2 節で電力系統の構成と運用を紹介する．第 2.3 節では不正データ注入攻撃の仕組みと攻撃検知のための既存の数理計画モデルを紹介した後，既存モデルの問題点を解決するための本論文での接近法について述べる．第 2.4 節では事故復旧における分散型エネルギー資源の活用や不確実性考慮の重要性について説明し，既存モデルの問題点とその解決に向けた本論文での接近法を論じる．

2.2　電力系統の概要と環境変化への対応

2.2.1　電力系統の構成と運用

電力系統は，発電所，送電線，変電所，配電線，負荷などの電力輸送の主要な構成要素および保護装置，通信設備，監視装置，制御装置などから構成される [74, 75]．系統構成はループ状と放射状の 2 種類に大別され，ループ状系統は信頼性が高いが運用が複雑であり，放射状系統は運用が容易であるがループ状系統に比べて信頼性が劣る．これらを踏まえ，Fig. 2.1 に示すように，基幹系統（187 kV 以上）では主にループ状系統が，負荷系統（154 kV 以下）では主に放射状系統が採用されているが，放射状で運用されている電力系統においてもループ状で運用可能となる設備形成がなされていることが多い．また，潮流や電圧などを適正範囲内に維持するように系統の状態を監視し調整するとともに，電力系統に事故が発生した場合の復旧操作などの運用を行っている [75]．近年は，電源の大容量化や遠方化，系統の複雑化などにより故障波及の様相が複雑化しているため，あらかじめ故障を想定した予防的な

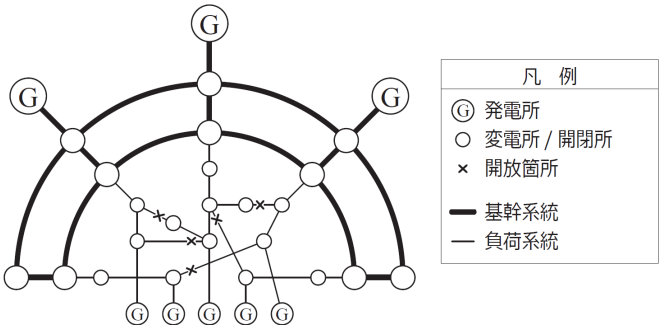


Fig. 2.1: 電力系統の送電形態イメージ [75]．基幹系統では主にループ状系統が，負荷系統では主に放射状系統が採用されているが，放射状で運用されている電力系統においてもループ状で運用可能となる設備形成がなされていることが多い．

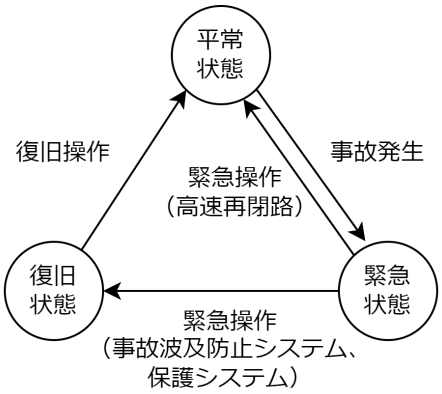


Fig. 2.2: 電力系統の 3 状態 [2]．緊急状態から平常状態や復旧状態への移行の大半は保護リレーシステムなどにより自動制御されているが，復旧状態から平常状態に向けて実施される復旧操作には系統運用者による総合的かつ高度な判断が必要である．

運用や，故障が発生しても波及範囲を局所化できるような設備対策の必要性が高まっている [2]．

電力系統の状態は，Fig. 2.2 に示すように「平常状態」「緊急状態」「復旧状態」の 3 種類に大きく分類できる [76]．平常状態とは，潮流，電圧，周波数などが適正に保持された状態をいい，緊急状態とは，そのまま放置しておくと電源や負荷の脱落，送電線のトリップ，系統崩壊に進展するおそれのある状態であり，緊急状態から平常状態や復旧状態への移行の大半は保護リレーシステムなどにより自動制御されている．復旧状態とは，供給支障の解消が必要な場合や送電線停止に伴って供給信頼度の回復が必要な場合など，平常状態には戻っていない状態である．この状態から平常状態に向けて実施される操作が復旧操作であり，総合的かつ高度な判断が必要とされるため，現状では復旧操作における系統運用者の介在が大きな役割を果たしている．

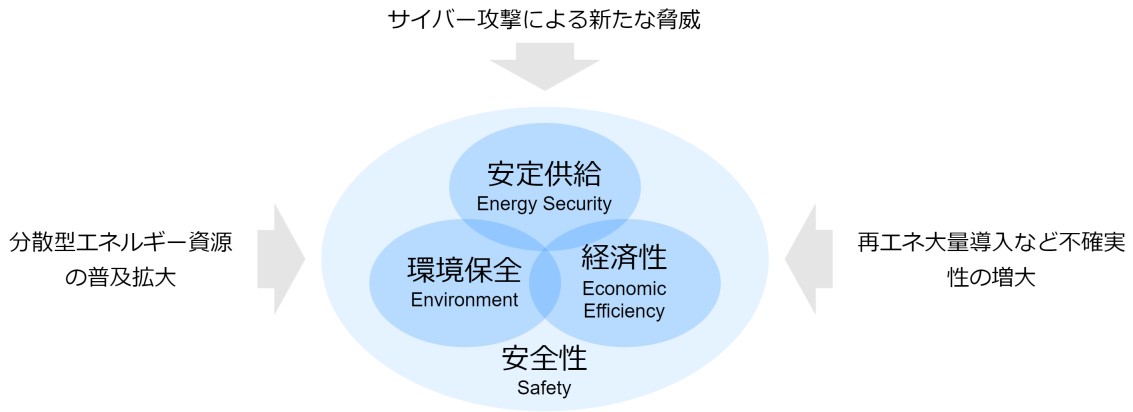


Fig. 2.3: 第 6 次エネルギー基本計画におけるエネルギー政策の基本的視点（S+3E）．サイバー攻撃による新たな脅威など電気事業を取り巻く環境変化についても触れられている．

2.2.2　電力系統を取り巻く環境変化への対応

2021 年 10 月に閣議決定された第 6 次エネルギー基本計画において,「エネルギー政策を進める上の大原則としての，安全性（Safety）を前提とした上で，エネルギーの安定供給（Energy Security）を第一とし，経済効率性の向上（Economic Efficiency）による低コストでのエネルギー供給を実現し，同時に，環境への適合（Environment）を図る，S+3E の視点の重要性は従来と何ら変わりはない」との記載がある．第 1 章で述べたように，サイバー攻撃による新たな脅威，分散型エネルギー資源の普及拡大，再生可能エネルギー電源（自然変動電源）の大量導入に伴う不確実性の増大など，電気事業を取り巻く環境は近年大きく変化しており，これらの環境変化は第 6 次エネルギー基本計画の中でも触れられている（Fig. 2.3 参照）．このような様々な環境変化にも対応しつつ安定的な電力供給を維持・向上するための一つの方策として，停電発生に対する事前および事後対策を検討しておく必要がある．具体的には，電力系統へのサイバー攻撃を漏れなく検知できる必要最小限なメータ配置に関する検討は「経済性」に，サイバー攻撃を速やかに検知することによる停電発生の防止は「安定供給」にそれぞれ寄与すると考えられる．また，停電箇所の迅速な復旧のための分散型エネルギー資源の最適配置に関する検討は「安定供給」および「経済性」への貢献が期待できるものである．

2.3　不正データ注入攻撃に対するロバストなメータ配置

2.3.1　電力系統状態推定と不良データ検出

本論文で対象とする状態推定法および推定残差に基づく不良データ検出法の概要について述べる [4]．メータ観測値 $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \ldots, z_m)^\top$ と推定すべき状態値 $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n)^\top$ との間に線形の観測方程式

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{e} \tag{2.1}$$

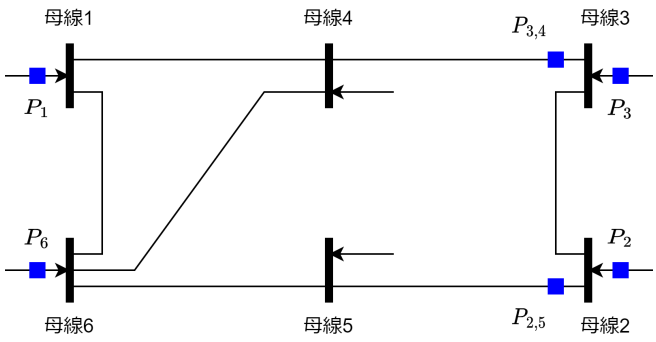


Fig. 2.4: 6 母線から構成される小規模系統の単線図．母線注入電力 P_1, P_2, P_3, P_6 および線路潮流 $P_{2,5}, P_{3,4}$ を観測する箇所に，青色の四角で示した 6 個のメータが設置されている．

が成り立つものと仮定する．ここで，$\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ は観測行列，$\mathbf{e} = (e_1, e_2, \ldots, e_m)^\top$ は観測誤差である．系統状態を推定できる，つまりメータ観測値 $\mathbf{z}$ から系統の状態 $\boldsymbol{\theta}$ を一意に決定できる場合に系統は可観測（Observable）であるといい，そのためには観測行列 $\mathbf{H}$ がフルランクである必要がある [4]．例えば，Fig. 2.4 に示した系統構成とメータ配置に対し，母線 1 を基準母線とした場合の観測行列 $\mathbf{H}$ は次のとおりである [26, 28]．

$$
\mathbf{H} = \begin{array}{c} \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_6 \\ P_{2,5} \\ P_{3,4} \end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{ccccc} \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 & \theta_5 & \theta_6 \end{array} \\
\begin{bmatrix}
0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\
2 & -1 & 0 & -1 & 0 \\
-1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -1 & -1 & 3 \\
1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
0 & 1 & -1 & 0 & 0
\end{bmatrix}
\end{array}
$$

この観測行列 $\mathbf{H}$ のランクは 5 であるので，Fig. 2.4 は可観測な系統である．これに対し，故障等によってメータ P_1 の観測値が得られない場合には，観測行列 $\mathbf{H}$ から第 1 行目を除いた行列のランクが 4 となることから，可観測な系統ではなくなり状態推定も不可能となる．

いま，観測行列 $\mathbf{H}$ がフルランクで，各メータ i の観測誤差 e_i が平均 0，分散 σ_i^2 の正規分布に従うと仮定すると，推定値 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ は次式より計算することができる．

$$
\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{H}^\top \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^\top \mathbf{W} \mathbf{z} \tag{2.2}
$$

ここで，$\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ は分散の逆数 σ_i^{-2} を (i, i) 成分にもつ対角行列

$$
\mathbf{W} = \mathrm{diag}(\sigma_1^{-2}, \sigma_2^{-2}, \ldots, \sigma_m^{-2}) \tag{2.3}
$$

である．

系統の状態を正しく把握するためには，メータの不具合などが原因で観測値 $\mathbf{z}$ に混入した不良データを的確に検出し取り除く必要がある．不良データを検出する手法として，観測値

$\mathbf{z}$ と推定値 $\mathbf{H}\hat{\boldsymbol{\theta}}$ の残差を計算し，その L_2 ノルム r があらかじめ設定した閾値 τ を上回る場合に不良データが混入していると判断する方法が広く用いられている．

$$r := \|\mathbf{z} - \mathbf{H}\hat{\boldsymbol{\theta}}\| > \tau \tag{2.4}$$

2.3.2 不正データ注入攻撃

攻撃者は，観測行列 $\mathbf{H}$ に関する情報（系統構成や送電線インピーダンスなど）を事前に知っているという条件付きではあるが，系統運用者に検知されることなく系統状態の推定値 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ を変化させることが可能である [5]．いま，攻撃者によってメータ観測値 $\mathbf{z}$ に不正データ $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \ldots, a_m)^\top$ が注入され，観測値が $\mathbf{z}$ から $\mathbf{z}_\mathrm{a} = \mathbf{z} + \mathbf{a}$ に改竄された状況を想定する．この不正データ $\mathbf{a}$ は攻撃ベクトル（Attack Vector）とよばれ，その第 i 要素 a_i が非零の値をとることは，メータ i が攻撃を受けて観測値が $z_i + a_i$ に改竄されることを意味する．これまでは式 (2.4) に基づく不良データ検出法を用いることで，攻撃者による不正データの意図的な混入も検出できると考えられていた．しかし，攻撃者が観測行列 $\mathbf{H}$ と任意の $\mathbf{c} \in \mathbb{R}^n$ を用いて攻撃ベクトル $\mathbf{a} = \mathbf{H}\mathbf{c}$ を生成した場合，攻撃後の推定値 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_\mathrm{a}$ は，

$$\begin{aligned}
\hat{\boldsymbol{\theta}}_\mathrm{a} &= (\mathbf{H}^\top\mathbf{W}\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^\top\mathbf{W}\mathbf{z}_\mathrm{a} \\
&= (\mathbf{H}^\top\mathbf{W}\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^\top\mathbf{W}(\mathbf{z} + \mathbf{a}) \\
&= \hat{\boldsymbol{\theta}} + (\mathbf{H}^\top\mathbf{W}\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^\top\mathbf{W}\mathbf{H}\mathbf{c} \\
&= \hat{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{c}
\end{aligned} \tag{2.5}$$

と攻撃前の推定値 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ から変化するが，残差自体は

$$\|\mathbf{z}_\mathrm{a} - \mathbf{H}\hat{\boldsymbol{\theta}}_\mathrm{a}\| = \|\mathbf{z} + \mathbf{a} - \mathbf{H}(\hat{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{c})\| = \|\mathbf{z} - \mathbf{H}\hat{\boldsymbol{\theta}}\| \tag{2.6}$$

と変化しない．このように，複数のメータに対し同時協調的に攻撃を行うことで，残差に基づく不良データ検出法では検知されずに推定値 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ を改竄できることがわかる．

2.3.3 攻撃検知に関する問題点

不正データ注入攻撃の脅威は，残差に基づく従来の不良データ検出法では検知できない点に加え，3 箇所以上のメータへの同時攻撃が想定される点にある．これまでは，機器の偶発故障を想定し，単一故障もしくは高々2 個のメータの同時故障を対象としていたのに対し，不正データ注入攻撃ではより多くの観測値が同時に改竄される状況が想定されるため，その対応について事前に検討しておく必要がある．不正データ注入攻撃への対応策として，攻撃に強いメータを設置するなどの方法が挙げられるが，系統内に設置されたすべてのメータを強固に防御することはコスト面からも難しい．そこで，攻撃や機器の故障等の理由により一部のメータが動作不良に陥った状況においても，残された正常なメータのみで攻撃を検知できるようにメータを設置することが重要となる．なお，不正データ注入攻撃の検知に成功し

た場合は通常の系統運用や系統制御を継続することになるが，不正データを除去できない場合には，攻撃の影響が広範囲に及ぶことを未然に防ぐために系統分離，電源制限，負荷制限，電圧低減などの緊急制御を実施することになる．

不正データ注入攻撃の検知に関しては，利用可能なメータのみで系統の可観測性が維持できればよいことが知られている [17]．したがって，上記の問題は，任意の k 個のメータが動作不良に陥った場合でも可観測性を維持できるロバストなメータ配置を求める問題として定義でき，既に数理計画モデルを用いた厳密解法が提案されている [28]．しかし，このモデルでは既設の必須メータのみを攻撃の対象としており，新たに追加配置するメータ（追加メータ）を含めた同時攻撃までは考慮していない．必須メータとは系統の可観測性を確保するために必要な最小のメータ集合であり，1 箇所でも観測値が欠損すると系統全体の可観測性を維持できなくなる．状態監視に用いるすべてのメータは区別なく故障や攻撃の対象とすべきであり，その意味で従来の数理計画モデルは不十分なものであった．また，非線形の制約式を含んでいるため，問題の規模が大きくなった際の計算効率性についても課題が残る．

2.3.4 本論文での接近法

本論文では，電力系統への不正データ注入攻撃に対する防御策として，ロバストなメータ配置を「任意の k 個の観測値が得られなかったとしても系統の可観測性を維持できるメータ配置」と定義し，ロバストなメータ配置のうち追加的な設置コストが最小となるメータ配置を求める数理計画モデルを提案することで，その解決を図る．はじめに，必須メータへの攻撃のみを考慮した基本モデルとして，従来モデルに含まれている非線形制約を線形化したモデルを提案する．これにより，必須メータへの同時攻撃を考慮した際の計算の効率化が期待できる．次に，必須メータに加えて追加配置する冗長メータ（追加メータ）への同時攻撃を考慮した拡張モデルを提案する．本論文では 3 箇所のメータへの同時攻撃までを対象としていることから，攻撃対象となる必須メータの個数によって場合分けを行い，それぞれに対し必要な制約式を導出する．さらに，冗長な制約式を排除して係数行列をコンパクト化する方法を提案し，最適化計算のさらなる効率化を図る．

本論文では，既設のメータとして必須メータのみから構成される可観測な系統に対し，必要な冗長メータを追加配置する状況を想定する．本来は系統内に設置されているメータに「必須」や「冗長」などの区別はないが，可観測性を確保するために必要なメータの組み合わせは容易に決定できるので，便宜上必須メータのみから構成されている状況を想定する．なお，必須メータに加えていくつかの冗長メータが既に配置されている系統を対象とする場合は，既設の冗長メータに対する設置コストを 0 に設定することで，追加で必要となる冗長メータの設置コストや配置が求められる．

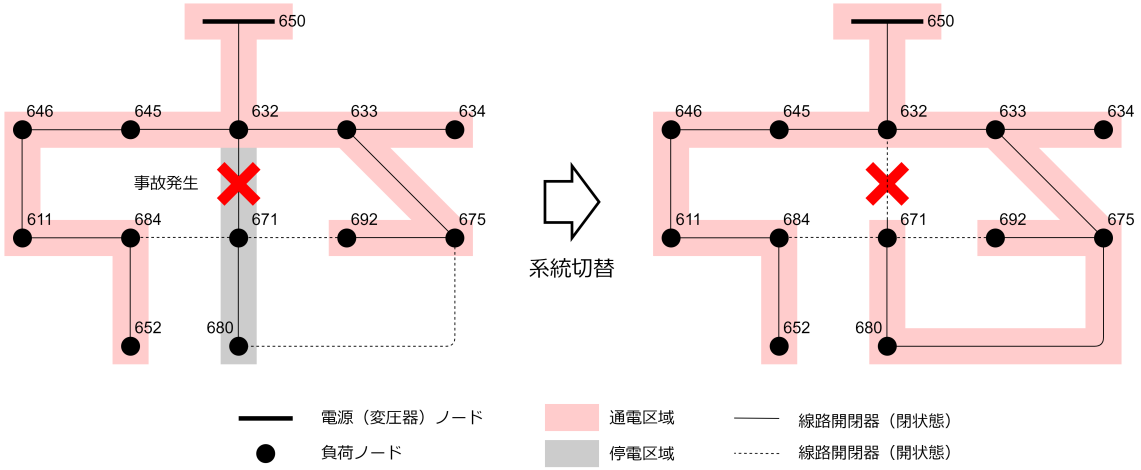


Fig. 2.5: 系統再構成による事故時復旧操作例．ノード 632-671 間のブランチで発生した事故等に対しノード 675-680 間のブランチを切り替えて別経路から電力を再供給している．

2.4 事故復旧のための分散型エネルギー資源の最適配置

2.4.1 電力系統事故時の復旧操作

電力系統における事故時復旧操作では，事故等により供給支障が生じた区域に対し，できるだけ迅速に電力の供給を再開することが求められる．Fig. 2.5 は，ノード・ブランチ法 [76] により表現した系統構成を用いて事故時の復旧操作例を示したものである．負荷系統は主にループ系統の一部の遮断器や開閉器を開放して放射状系統として運用しているため，開閉器などの状態の組み合わせを変更することは放射状系統の構成を変更することを意味している．この例では，ノード 632-671 間のブランチで発生した事故等に対しノード 675-680 間のブランチを切り替えて系統構成を変更し，停電区域に対し別経路から電力を再供給している様子を表している．

系統切替による復旧操作では，復旧操作過程の途中であっても放射状系統を維持させるために，開状態と閉状態の開閉器に対する 2 回の操作を一連の切替操作とみなす [61]．したがって，操作手順を考慮した復旧最適化問題は，開閉器の状態を開状態から閉状態へ変更してループを形成する「閉操作」と，閉状態から開状態へ変更してループを解消する「開操作」が交互に繰り返される操作手順のうち，目的関数が最大または最小となる操作手順を求める問題として定義される．例えば，Fig. 2.6 に示すように，第 k 回目の切替操作直後の供給支障電力（停電電力）を h_k，第 k 回目の切替に要する時間を t_k，切替回数を K とすると，各切替操作直後の供給支障電力とその継続時間の積和で表現される供給支障電力量は次式で定義される．

$$\text{minimize} \quad \sum_{k=1}^{K}(t_k \cdot h_{k-1}) \tag{2.7}$$

ただし，h_0 は事故直後の供給支障電力である．なお，事故等によって対象系統全体が停電している場合はすべての開閉器が開状態にあることを想定するため，開操作を考慮する必要

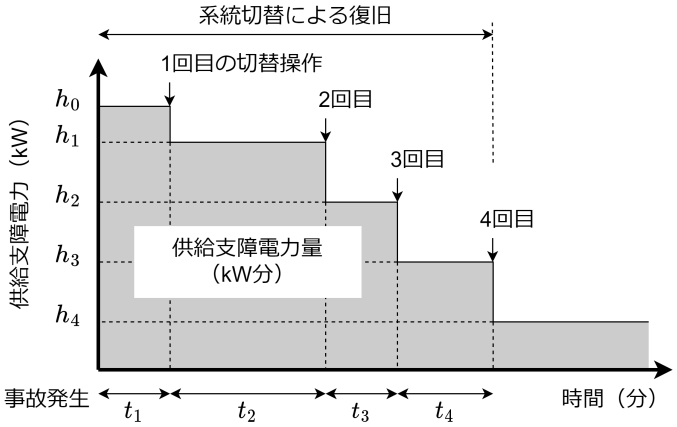


Fig. 2.6: 事故時復旧操作の最適化．この例では，各切替操作直後の供給支障電力とその継続時間の積和で表現される供給支障電力量が最小となる操作手順を求める問題として定義される．主な目的関数としては，供給支障電力量の最小化の他に，未復旧負荷量の最小化や停電解消までの時間最小化などがある．

がなく閉操作だけが繰り返される操作手順を考えれれば良い．

2.4.2 問題点

復旧操作全体での最適化　負荷系統の事故時復旧操作は，線路に設置されている多数の遮断器や開閉器の開閉状態を変更することで実現しており，最終的な開閉器の状態の組み合わせを決定する問題（復旧目標系統の決定問題）と，実際の操作手順を決定する問題（系統操作手順の決定問題）とに大別される．また，操作上の制約から複数の開閉器を同時に操作することは制限されており，段階的な切替操作が要求されている．これまでにも，復旧目標系統や操作手順を決定する問題など，個々の問題に対しては様々な最適化手法が提案されているが，両方の問題を統一的に扱った研究は少ない．迅速かつ効果的な事故時復旧操作を実現するためには，最終的な目標系統だけでなく操作手順も含めた復旧操作全体での最適化について検討することが重要である．

分散型エネルギー資源の活用　事故時において系統電源からの電力供給が期待できない場合，ブラックスタート機能を有する分散型電源を中心としたマイクログリッドを形成することで迅速な停電復旧が図れる場合がある．また，線路容量制約や出力変化速度制約などの運用制約によってすぐに停電負荷に電力を再供給することが難しい場合は，一時的に電力貯蔵設備を充電しておき，適切なタイミングで放電することによって復旧操作を支援できると考える．系統内に設置されている分散型電源や電力貯蔵設備などの分散型エネルギー資源を復旧操作に活用した研究は進んできているが，分散型エネルギー資源の最適配置とその活用を同時に扱った研究はこれまでにない．普及拡大が進んでいる分散型エネルギー資源の配置まで含めて検討することで，より効率的な事故復旧が実現できることが期待できる．

不確実性の考慮　従来の負荷の不確実性に加えて，導入拡大が進んでいる太陽光発電などの自然変動電源の出力変動は以前にも増して大きくなっている．文献 [75] でも，事故時復旧操作の今後の展望の一つとして，気象の変化に伴う新エネルギー発電の出力変動など，電力系統に不確実な要素が加わることへの柔軟な対応の必要性を指摘している．また，高度経済成長期に大量に設置された流通設備の経年劣化が進み，偶発的な故障発生が今後増えていくことも予想される．これらの不確実性を考慮することにより，故障などに対してロバストな事故時の操作手順が得られることが期待できる．さらに，分散型エネルギー資源の最適配置への影響についても考慮することで，操作手順だけでなく故障に対してロバストな配置を検討することは非常に重要である．

2.4.3　本論文での接近法

本論文では，電力系統における迅速な事故時復旧操作の実現に対し，復旧操作全体の最適化，分散型エネルギー資源の活用，不確実性の考慮，のすべてを含んだ数理計画モデルを提案することで，その解決を図る．復旧操作全体の最適化への対処としては，各時間ステップでの運用制約だけでなく，分散型エネルギー資源の出力変化速度や電力貯蔵設備の電力貯蔵量といった複数の時間ステップに関係する制約条件をモデル化したうえで，評価期間全体の復旧負荷量の最大化を目的とする．分散型エネルギー資源の活用については，どの分散型エネルギー資源をどこに配置するかを決定する変数を導入することで，分散型エネルギー資源の運用だけでなく配置箇所も含めた最適化を図る．不確実性の考慮については,「復旧操作全体の最適化」「分散型エネルギー資源の活用」の二つを考慮して構築した基本モデルに対し，不確実性を複数のシナリオとその発生確率によって表現したうえで，複数シナリオを考慮できるようにモデル拡張を図ることで対処する．

2.5　おわりに

本章では,「状態推定における不正データ注入攻撃に対するロバストなメータ配置」と「事故復旧のための分散型エネルギー資源の最適配置」とを分けて問題の所在を示した．まず，電力系統の状態推定法と不良データ検出法について紹介し，電力系統へのサイバー攻撃の一種である不正データ注入攻撃の仕組みと従来方法による検知の困難さについて説明した．その後，この攻撃に対処した既存の数理計画モデルにおける問題点を指摘し，この問題点に対する本論文での接近法を示した．従来モデルにおける非線形制約を線形化し，さらに 3 箇所のメータへの同時攻撃まで対処できるよう新たな制約条件を導出することで，その解決を図ることを述べた．次に，事故時復旧操作の基本となる系統切替操作について紹介し，迅速な事故復旧の実現における，復旧操作全体での最適化，分散型エネルギー資源の活用，不確実性の考慮の重要性について説明した．そして，これらに対処した既存モデルとその問題点を指摘し，この問題点の解決に向けた本論文における接近法を示した．不確実性を複数のシナリオで表現し，評価期間全体の復旧電力量を最大化する分散型エネルギー資源の最適配置を求める数理計画モデルを構築することで，その解決を図ることを述べた．

第3章　状態推定における不正データ注入攻撃に対するロバストなメータ配置

3.1　はじめに

本章では，電力系統への不正データ注入攻撃に対処したロバストなメータ配置を求めるための数理計画モデルを提案する．3 箇所のメータへの同時攻撃までを対象に，必須メータに加えて追加メータへの同時攻撃も考慮できるモデルである．さらに，最適なメータ配置を効率的に求めるために，非線形制約の線形化に加え，冗長な制約式を排除して係数行列をコンパクト化する方法についても提案する．問題規模の異なる複数のテスト系統を用いた数値実験により，従来モデルでは考慮していなかった追加メータへの同時攻撃にも対応できる適切なメータ配置が得られることを確認する．さらに，提案手法を用いて係数行列をコンパクト化することで，必要メモリ量を削減できるだけでなく計算時間も短縮できることを示す．

本章の構成は以下のとおりである．第 3.2 節では追加メータへの同時攻撃を考慮した新たな数理計画モデルを提案し，第 3.3 節で制約式を表す係数行列から冗長な制約式を削除する方法（コンパクト化法）を提案する．第 3.4 節では複数のテスト系統に提案モデルを適用した結果について示し，その実験結果について第 3.5 節で考察する．最後に第 3.6 節で本章の内容と今後の課題についてまとめる．

3.2　ロバストなメータ配置のための数理計画モデルの提案

3.2.1　モデル化の方針

はじめに，ロバストなメータ配置において基本となる，必須メータへの攻撃のみを考慮した基本モデルを提案する．必須メータへの攻撃のみを考慮した数理計画モデル [27, 28] が既に提案されているが，従来モデルは非線形の制約条件を含んでいるため，必須メータへの同時攻撃（$k \geq 2$）を考慮した場合には，最適なメータ配置を効率的に求めることが難しくなる．そこで，非線形制約を線形化した効率的なモデルを提案する．次に，必須メータに加えて追加配置する冗長メータ（追加メータ）への同時攻撃を考慮した拡張モデルを提案する．すべての必須メータが利用可能であれば，追加メータが攻撃されても系統の可観測性には影響しない．しかし，必須メータと追加メータが同時に攻撃された場合には，必須メータのみを攻撃の対象としたモデルでは対応できないケースが存在する．例えば，Fig. 3.1 は $k = 3$ のケースにおけるメータの配置例を示しており，青色と赤色の四角がそれぞれ必須メータと追加メータを表している．このメータ配置は，どの 3 箇所の必須メータが攻撃されたと

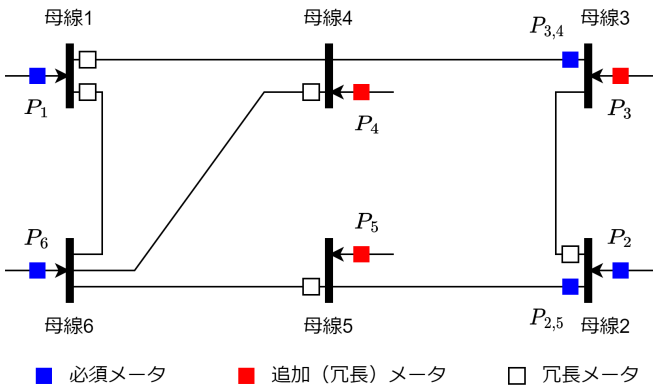


Fig. 3.1: 6 母線系統と $k = 3$ のケースにおけるメータの配置例．どの 3 箇所の必須メータが攻撃されたとしても可観測性を維持できるが，追加メータも含めて攻撃された場合（例えば，P_1, P_4, P_6）には可観測性を維持できない．

しても系統全体の可観測性を維持できるが，追加メータも含めて攻撃された場合（例えば，P_1, P_4, P_6）には可観測性を維持できない．そこで，必須メータのみを攻撃の対象としたモデルでは対応できない攻撃も考慮できるようモデルを拡張する．

3.2.2 必須メータへの攻撃のみを考慮したモデル

必須メータへの攻撃のみを考慮したロバストなメータ配置について，既存の非線形計画モデル [28] を改良した線形化モデルを提案する．可観測な電力系統では，状態推定に用いられるメータは n_{e} 個の必須メータとそれ以外の n_{r} 個の冗長メータに分類できることから，式 (3.1) に示すように，観測行列 $\mathbf{H}$ を必須メータと冗長メータに対応するように分割する．

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{\mathrm{e}} \\ \mathbf{H}_{\mathrm{r}} \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

ここで，$\mathbf{H}_{\mathrm{e}} \in \mathbb{R}^{n_{\mathrm{e}} \times n_{\mathrm{e}}}$ と $\mathbf{H}_{\mathrm{r}} \in \mathbb{R}^{n_{\mathrm{r}} \times n_{\mathrm{e}}}$ はそれぞれ必須メータおよび冗長メータに対応する部分観測行列である．

次に，両メータ間の依存関係を表す感度行列 $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^{n_{\mathrm{r}} \times n_{\mathrm{e}}}$ を生成する．感度行列 $\mathbf{S}$ は $\mathbf{H}_{\mathrm{e}}$ と $\mathbf{H}_{\mathrm{r}}$ を用いて $\mathbf{S} = \mathbf{H}_{\mathrm{r}}\mathbf{H}_{\mathrm{e}}^{-1}$ と計算され，$k \times k$ 部分行列が正則（行列式が非零）ならば，それに対応する必須メータを冗長メータで置き換えられることを意味する．つまり，対応する冗長メータが利用可能であれば，k 個の必須メータが動作不良になっても可観測性を維持できることを表している [28]．この情報を用い，必須メータへの攻撃のみを考慮したロバストなメータ配置問題を，次のような整数線形計画問題（Integer Linear Programming Problem）として定式化する．

$$
\begin{aligned}
\text{minimize} \quad & \sum_{i=1}^{n_\mathrm{r}} c_i \cdot x_i && (3.2)\\
\text{subject to} \quad & \sum_{\{i_1,\ldots,i_k\}\in I_k} B_{i_1,\ldots,i_k;j_1,\ldots,j_k} \cdot y_{i_1\cdots i_k} \geq 1, \quad \forall\{j_1,\ldots,j_k\}\in J_k && (3.3)\\
& x_{i_1},\ldots,x_{i_k} \geq y_{i_1\cdots i_k}, \quad \forall\{i_1,\ldots,i_k\}\in I_k && (3.4)\\
& x_i \in \{0,1\}, \quad \forall i \in \mathbb{N} = \{1,\ldots,n_\mathrm{r}\} && (3.5)
\end{aligned}
$$

ここで，c_i は冗長メータ i の設置コスト，x_i は冗長メータ i を設置する場合に 1，設置しない場合に 0 をとるバイナリ変数である．$y_{i_1\cdots i_k}$ は，従来モデル [28] での非線形制約を線形化するために新たに導入した，$\prod_{s=1}^{k} x_{i_s}$ に対応する補助変数である．また，I_k, J_k は感度行列 $\mathbf{S}$ の k 個の異なる行および列のすべての組み合わせを表す集合である．

制約式に含まれる $B_{i_1,\ldots,i_k;j_1,\ldots,j_k}$ は，感度行列 $\mathbf{S}$ の $k\times k$ 部分行列が正則か否かを表す係数（行列式が非零の場合は 1，それ以外は 0）である．

$$
B_{i_1,\ldots,i_k;j_1,\ldots,j_k} := \begin{cases} 1 & |\,S_{i_1,\ldots,i_k;j_1,\ldots,j_k}\,| \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3.6}
$$

例えば，$n_\mathrm{e}=4, n_\mathrm{r}=3, k=2$ の場合における制約式 (3.3)(3.4) は，以下のように行列表現される．以降では，制約式を表す係数行列のうち，制約式 (3.3) に対応する部分係数行列を「係数行列 $\mathbf{B}$」と表すことにする．

$$
\begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & B_{12;12} & B_{13;12} & B_{23;12} \\
0 & 0 & 0 & B_{12;13} & B_{13;13} & B_{23;13} \\
0 & 0 & 0 & B_{12;14} & B_{13;14} & B_{23;14} \\
0 & 0 & 0 & B_{12;23} & B_{13;23} & B_{23;23} \\
0 & 0 & 0 & B_{12;24} & B_{13;24} & B_{23;24} \\
0 & 0 & 0 & B_{12;34} & B_{13;34} & B_{23;34} \\
1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ y_{12} \\ y_{13} \\ y_{23} \end{bmatrix}
\geq
\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
\tag{3.7}
$$

線形化については，補助変数を導入することによって問題サイズ（決定変数や制約式の数）が大きくなる欠点がある一方で，一般には解くことが困難とされている非線形制約を含んだ数理計画問題に対し計算時間の短縮効果が期待できる利点もある．線形化による計算効率性については第 3.5 節で考察する．なお，制約式の本数を削減する方法としては，k 本か

Table 3.1: 複数メータへの同時攻撃に対するモデル拡張の必要性．必須メータのみや冗長メータのみが攻撃の対象となる場合は追加的な対策は不要である．

ケース	k_{e}	k_{r}	モデル拡張の必要性
$k=1$	0	1	不要（追加対策は不要）
	1	0	不要（基本モデルで対応可能）
$k=2$	0	2	不要（追加対策は不要）
	1	1	**必要**
	2	0	不要（基本モデルで対応可能）
$k=3$	0	3	不要（追加対策は不要）
	1	2	**必要**
	2	1	**必要**
	3	0	不要（基本モデルで対応可能）

k_{e}: 攻撃される必須メータ数

k_{r}: 攻撃される冗長メータ数（$k_{\mathrm{r}} = k - k_{\mathrm{e}}$）

らなる制約式 (3.4) を次式の 1 本の制約式に置き換えることも可能である．

$$\sum_{s=1}^{k} x_{i_s} \geq k \cdot y_{i_1 \cdots i_k}, \quad \forall \{i_1, \ldots, i_k\} \in I_k \tag{3.8}$$

3.2.3 追加メータへの同時攻撃を考慮した拡張

必須メータのみを攻撃の対象としたモデルでは対応できない攻撃についても考慮できるように，前節で提案した基本モデルを拡張する．Table 3.1 は，攻撃対象となるメータの組み合わせに対する，新たな対応の必要性について整理した表である．冗長メータのみが攻撃の対象となる場合は，系統の可観測性は損なわれないため追加的な冗長メータを必要としない．また，必須メータのみが攻撃の対象となる場合は，前節で示した基本モデルがそのまま適用できる．したがって，新たな対応が必要となるのは，必須メータと冗長メータが同時に攻撃対象となる場合である．Table 3.1 より，新たな対応が必要となる 3 種類のケースは，

- 必須メータが 1 箇所攻撃されるケース
- 必須メータが 2 箇所攻撃されるケース

と分類でき，以下では，各ケースに対するモデルの拡張方法について述べる．

必須メータが 1 箇所攻撃されるケース

ここでは，必須メータ 1 箇所と冗長メータ 1 箇所が同時攻撃されるケース（$k = 2$）と，必須メータ 1 箇所と冗長メータ 2 箇所が同時攻撃されるケース（$k = 3$）の両ケースを対象と

する．これらのケースについては，以下に示す制約式を追加することで，冗長メータへの同時攻撃まで考慮したロバストなメータ配置を求めることができる．

$$\sum_{i \in \mathbb{N}} B_{i;j} \cdot x_i \geq k, \quad \forall j \in J_1 \tag{3.9}$$

この制約式は，各必須メータ $j \in J_1$ への攻撃に対し少なくとも k 個の冗長メータで対応できるように配置しておけば，どの $k-1$ 個の冗長メータが攻撃されたとしても可観測性を維持できることを保証するものである．

必須メータが 2 箇所攻撃されるケース

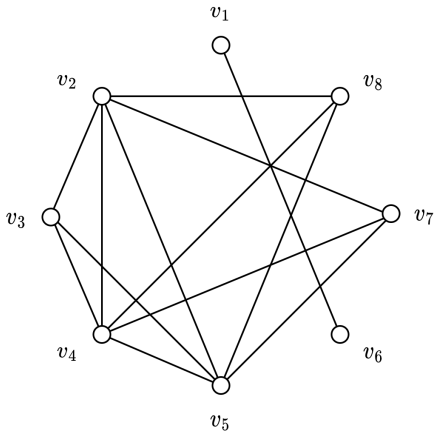
ここでは，必須メータ 2 箇所と冗長メータ 1 箇所が同時に攻撃されるケースを対象とする．必須メータの各組 $\{j_1, j_2\} \in J_2$ に対し，それぞれ一つの無向グラフを対応させて考える（Fig. 3.2 (a) 参照）．無向グラフの点 v_i は追加メータの候補となる冗長メータ i を表しており，点 v_{i_1} と点 v_{i_2} を結ぶ辺 $e_{i_1 i_2}$ は制約式 (3.3) において $y_{i_1 i_2} (= x_{i_1} x_{i_2})$ の係数 $B_{i_1 i_2; j_1 j_2}$ が 1 であることを表している．つまり，必須メータ j_1, j_2 が同時攻撃を受けた場合に，冗長メータ i_1, i_2 が追加配置されていれば系統の可観測性を維持できることを意味している．冗長メータ i への攻撃は，無向グラフにおいて点 v_i と点 v_i に接続するすべての辺を取り除くことを意味している．したがって，どの冗長メータが攻撃されたとしても系統の可観測性を維持するためには，利用可能な冗長メータから誘導される部分グラフ（誘導部分グラフ）が少なくとも 1 本の辺を持つようにすればよい．無向グラフから点を 1 個削除した際に 1 本の辺も残らないグラフ構造はスター構造のみであることから，誘導部分グラフがスター構造とならないように制約式を追加する．

例として，冗長メータ $1, 3, 5, 6$ を追加配置した場合の誘導部分グラフを Fig. 3.2 (b) に示す．図中の赤色の点および辺は誘導部分グラフを表している．Fig. 3.2 (b) において，追加配置したどの冗長メータが 1 箇所攻撃されたとしても，誘導部分グラフ内に少なくとも 1 本の辺が残ることが確認できる．このことから，対象とする必須メータ 2 箇所への攻撃に対し，冗長メータ $1, 3, 5, 6$ を追加配置することで系統の可観測性を維持できる．Fig. 3.2 (c) は，同じ攻撃ケースに対する別の追加配置例（冗長メータ $2, 4, 7$）を示しており，Fig. 3.2 (b) の例よりも少ない個数の冗長メータで対応可能であることがわかる．一方，冗長メータ $3, 4, 7, 8$ を追加配置した場合には，Fig. 3.2 (d) に示すとおり誘導部分グラフがスター構造となることがわかる．この場合，冗長メータ 4 が攻撃されると系統の可観測性を維持できなくことが確認できる．

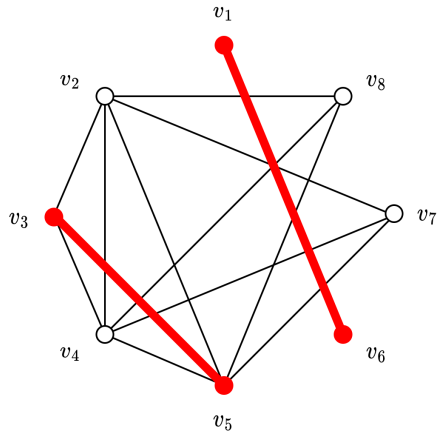
本論文では，スター構造を特徴付ける性質のうち「最大次数が辺数に等しくなる」という性質に着目し，誘導部分グラフにおいて，すべての点の次数が辺数よりも小さいことを表す次の制約式を追加する．

$$\sum_{\{i_1, i\} \in I_2} B_{i_1 i; j_1 j_2} \cdot y_{i_1 i} < \sum_{\{i_1, i_2\} \in I_2} B_{i_1 i_2; j_1 j_2} \cdot y_{i_1 i_2}, \ \forall i \in \mathbb{N}, \ \forall \{j_1, j_2\} \in J_2 \tag{3.10}$$

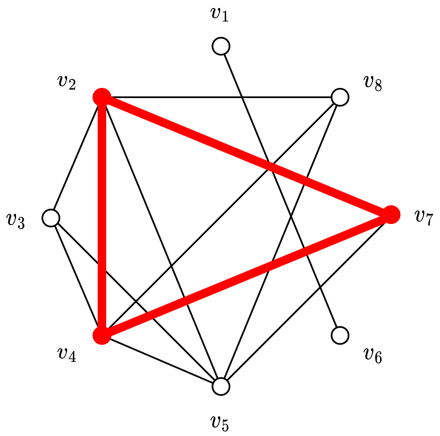
上式の左辺は誘導部分グラフにおける点 v_i に接続する辺数（点 v_i の次数）を表し，右辺は誘導部分グラフ全体の辺数を表している．



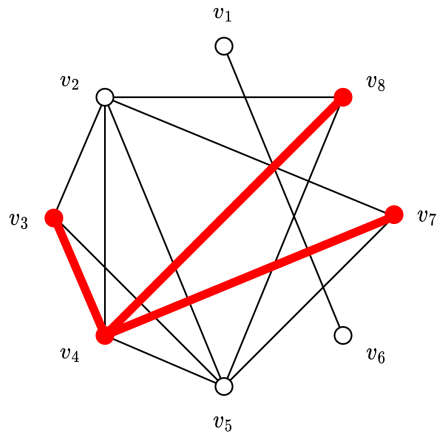
(a) 系統の可観測性に関する制約を表現する無向グラフ



(b) 点 $\{v_1, v_3, v_5, v_6\}$ から誘導される部分グラフ



(c) $\{v_2, v_4, v_7\}$ から誘導される部分グラフ



(d) 点 $\{v_3, v_4, v_7, v_8\}$ から誘導されるスター構造の部分グラフ

Fig. 3.2: 系統の可観測性に関する制約を表現する無向グラフおよび係数行列 $\mathbf{B}$ に基づいて生成される誘導部分グラフ（赤色）の例．無向グラフの各点は追加候補となる冗長メータ，各辺は両端の冗長メータの組によって可観測性が維持できることを示している．誘導部分グラフがスター構造とならないように冗長メータを選択する必要がある．

3.2.4 モデル化のまとめ

上記のモデル化についてまとめると，ロバストなメータ配置のための数理計画モデルは次のように整理できる．

- $k \leq 1$ のケース：制約式 (3.3)–(3.5) のもとで目的関数 (3.2) を最小化

- $k \leq 2$ のケース：制約式 (3.3)–(3.5), (3.9) のもとで目的関数 (3.2) を最小化
- $k \leq 3$ のケース：制約式 (3.3)–(3.5), (3.9), (3.10) のもとで目的関数 (3.2) を最小化

これらを解くことで，必須メータに加えて追加メータへの同時攻撃も考慮したロバストなメータ配置を求めることが可能となる．

3.3 制約式を表す係数行列 B のコンパクト化法の提案

k の値が大きくなるにしたがって係数行列 $\mathbf{B}$ のサイズは増大するが，その多くは冗長な制約式であることがわかっている．本節では，冗長な制約式を削除することで係数行列 $\mathbf{B}$ をコンパクト化する方法について述べる．

3.3.1 基本的な考え方

係数行列 $\mathbf{B}$ については，各制約式を満たす変数集合間の包含関係をチェックするだけで，冗長な制約式を抽出することが可能である．次に示す係数行列 $\mathbf{B}$ を例に説明する．なお，ここでは $k = 1$ のケースについて述べるが，$k = 2, 3$ のケースについても同じ手順でコンパクト化可能である．

$$\mathbf{B} = \begin{array}{c} \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \\ P_{13} \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccc} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 & P_8 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

必須メータは P_9 から P_{13} までの 5 種類，冗長メータは P_1 から P_8 までの 8 種類である．必須メータ P_9 が攻撃により動作不良に陥った場合について考える．この場合，系統の可観測性維持に寄与しうる冗長メータは，係数行列 $\mathbf{B}$ の第 1 行の要素が 1 となっているメータ P_3, P_4, P_5, P_7 のみであり，その他の冗長メータは可観測性の維持に寄与しない．いま，係数行列 $\mathbf{B}$ の第 1 行と第 2 行を比較すると，第 1 行で要素が 1 の冗長メータは第 2 行でも要素が 1 となっている．これは，第 1 行で表される制約式を満たす冗長メータは，必ず第 2 行で表される制約式も満足することを意味している．したがって，係数行列 $\mathbf{B}$ の第 2 行は冗長な制約式を表すものとして削除できる．

上記の考え方にしたがって冗長な制約式を削除することで，最終的には次に示すコンパクトな係数行列 $\mathbf{B}'$ が得られる．

$$\mathbf{B}' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Algorithm 1 Compact($\cdot$)

Input: Coefficient Matrix $\mathbf{B} \in \{0,1\}^{m \times n}$
Output: Compact Matrix $\mathbf{B}_{\text{compact}}$

```
1:  B_compact ← B
2:  for 1 ≤ i ≤ m do
3:    Calculate C_i = {j | B_ij = 1}
4:  end for
5:  Sort the rows of B_compact in ascending order of |C_i|
6:  R ← ∅
7:  for 1 ≤ i < i' ≤ m do
8:    if C_i ⊆ C_i' then
9:      R ← R ∪ {i'}
10:   end if
11: end for
12: Remove all rows i' ∈ R from B_compact
```

3.3.2 コンパクト化の基本手順

係数行列 $\mathbf{B}$ の各行に対し，対応する (i,j) 要素が 1 となっている列インデクス集合 C_i を，

$$C_i := \{\, j \mid B_{ij} = 1 \} \tag{3.11}$$

と定義する．もし，$C_i \subseteq C_{i'}$ となる $i' \neq i$ が存在するならば，前節の考え方にしたがって，第 i' 行は冗長な制約式として係数行列 $\mathbf{B}$ から削除可能である．**Algorithm 1** にコンパクト化の基本手順 Compact($\cdot$) を示す．2 行目から 4 行目で係数行列 $\mathbf{B}$ の各行に対する列インデクス集合 C_i を計算し，7 行目から 13 行目において冗長な制約式を抽出している．なお，5 行目において各行を列インデクス集合の大きさであらかじめソートしておくことで，無駄な比較操作を排除している．

上記の係数行列 $\mathbf{B}$ の場合，各行に対する列インデクス集合 C_i は次のとおりである．

$$C_1 = \{3,4,5,7\},\ C_2 = \{1,3,4,5,6,7\},\ C_3 = \{4,7,8\},$$
$$C_4 = \{1,2,3,4,5,6,7,8\},\ C_5 = \{2,3,4,7,8\}.$$

この列インデクス集合の間には，$C_1 \subset C_2 \subset C_4$ および $C_3 \subset C_5 \subset C_4$ の包含関係が成立することから，第 2 行，第 4 行，第 5 行は冗長な制約式を表すものとして削除できる．

係数行列 B の段階的な生成

係数行列 $\mathbf{B}$ をすべて生成した後にコンパクト化するのではなく，係数行列 $\mathbf{B}$ の拡張とコンパクト化を段階的に実施することで，必要となるメモリ量を削減できると考えられる．また，係数行列 $\mathbf{B}$ を生成する途中の段階で冗長な制約式を削除することで，その後の演算において冗長な制約式との無駄な比較を回避でき，計算時間の短縮にもつながる可能性がある．

Algorithm 2 IncrementalMatrixGeneration(·)

Input: Sensitivity Matrix $\mathbf{S}$, block size L_{b}, k
Output: Compact Matrix $\mathbf{B}$
1: $I_k \leftarrow$ the set of all subsets of k different rows of $\mathbf{S}$
2: $J_k \leftarrow$ the set of all subsets of k different columns of $\mathbf{S}$
3: $\mathbf{B} \leftarrow [\,]$, $s \leftarrow 1$
4: **repeat**
5: $t \leftarrow \min(s + L_{\mathrm{b}} - 1, |J_k|)$
6: Generate a submatrix $\mathbf{B}'$ based on the elements from the s-th of J_k to the t-th and all the elements of I_k
7: $\mathbf{B}' \leftarrow \mathrm{Compact}\,(\mathbf{B}')$
8: $\mathbf{B} \leftarrow \mathrm{Merge}\,(\mathbf{B}, \mathbf{B}')$
9: $s \leftarrow s + L_{\mathrm{b}}$
10: **until** $s > |J_k|$

3.3.3 全体アルゴリズム

係数行列 $\mathbf{B}$ のコンパクト化法全体の計算手順を **Algorithm 2** に示す．3 行目で係数行列 $\mathbf{B}$ を空の行列で初期化しておき，5 行目から 9 行目までの手順を反復することで，感度行列 $\mathbf{S}$ からコンパクト化された係数行列 $\mathbf{B}$ を生成する．各反復では，まず一定の行数（ブロックサイズ）L_{b} になるまで係数行列 $\mathbf{B}'$ を生成し（5, 6 行目），前節に示した方法を用いて部分係数行列 $\mathbf{B}'$ をコンパクト化する（7 行目）．その後，係数行列 $\mathbf{B}$ と新たに生成した部分係数行列 $\mathbf{B}'$ を統合し，係数行列 $\mathbf{B}$ を更新する（8 行目）．8 行目の統合操作 Merge(·) では，二つの部分係数行列 $\mathbf{B}, \mathbf{B}'$ を比較し，行列 $\mathbf{B}$ にとって冗長な制約式を行列 $\mathbf{B}'$ から，行列 $\mathbf{B}'$ にとって冗長な制約式を行列 $\mathbf{B}$ から削除した後に二つの行列を結合する．なお，入力データの一つであるブロックサイズ L_{b} は，ユーザが指定する唯一のパラメータである．

3.4 数値実験

3.4.1 目的

追加メータへの同時攻撃を考慮した新たな数理計画モデルと係数行列 $\mathbf{B}$ のコンパクト化法を用いて，1) ある与えられた制限時間（本論文では 3,600 秒とした）内にどの程度の系統規模までロバストなメータ配置を求められるか，2) 系統の可観測性を維持するためにどの程度の冗長メータを追加する必要があるのかを確認する．

3.4.2 テスト系統

実験に用いたテスト系統の主な属性を Table 3.2 に示す．$k = 2$ のケースについては米国電気電子学会（IEEE）の 9 母線系統から 300 母線系統まで，$k = 3$ については 9 母線系統から 57 母線系統までのテスト系統 [77] を用いた数値実験を行った．

Table 3.2: IEEE 各テスト系統における主な属性

系統名	母線数	送電線数	メータ配置候補数*
9 母線	9	9	18
14 母線	14	20	34
30 母線	30	41	71
39 母線	39	46	85
57 母線	57	80	137
118 母線	118	186	304
300 母線	300	411	711

*メータ配置候補数は母線数と送電線数の和

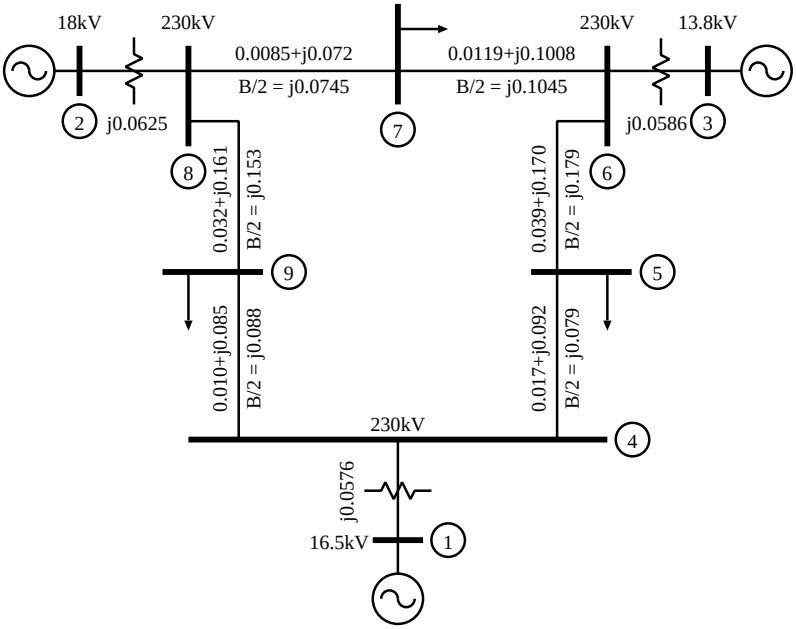


Fig. 3.3: IEEE 9 母線系統の構成図（母線数 9，送電線数 9）

3.4.3 設定

必須メータの初期配置をランダムに変化させたうえで，追加する冗長メータの最適配置を求める数値実験を各系統について 30 回行った．冗長メータの設置コスト c_i は，すべての冗長メータについて 1 に設定した．ブロックサイズ L_b は，$k = 2$ については $L_\mathrm{b} = 1000$，$k = 3$ については $L_\mathrm{b} = 100$ に設定した．

メータはすべての母線および送電線に配置可能とし，すべてのメータを故障やサイバー攻撃の対象とする．ただし，$k = 3$ の場合に限り，橋辺（Bridge）に相当する送電線のメータについては攻撃対象から除外した．橋辺とは，その辺を削除するとグラフが非連結になる辺のことであり，テスト系統に橋辺が含まれている場合は，$k = 3$ を満たすロバストなメータ配置が存在しないことがわかっている．例えば，Fig. 3.3 に示した 9 母線系統では，母線 1 と母線 4 を結ぶ送電線などが橋辺に相当する．

なお，すべての実験は 2.20 GHz Intel Xeon E5-2660 の PC 上で行った．メモリは 64 GB，

Table 3.3: 最適配置が求まるまでの総計算時間（秒）．成功率は全 30 試行のうち制限時間内に最適配置が求まった試行数の割合を表している．

	系統名	成功率	最小値	中央値	最大値
$k = 2$	9 母線	100 %	0.00	0.00	0.01
	14 母線	100 %	0.01	0.01	0.05
	30 母線	100 %	0.03	0.05	0.65
	39 母線	100 %	0.03	0.04	0.16
	57 母線	100 %	0.29	0.92	11.10
	118 母線	100 %	1.27	2.53	16.47
	300 母線	100 %	11.51	13.46	52.36
$k = 3$	9 母線	100 %	0.01	0.02	0.51
	14 母線	100 %	0.09	0.17	2.76
	30 母線	100 %	2.15	4.79	134.26
	39 母線	100 %	2.53	7.65	107.42
	57 母線	83 %	*50.12	*874.97	*3,080.25

*最適配置が求まった 25 試行の結果についてのみ集計

OS は Ubuntu 14.04 である．係数行列の生成および最適化計算には，それぞれ MATLAB 8.4.0 [78] と Gurobi Optimizer 6.0.0 [79] を用いた．

3.4.4 結果

冗長メータの最適配置が求まるまでの総計算時間を Table 3.3 に示す．表中の成功率は，全試行のうち制限時間内に最適配置が求まった試行数の割合を表している．総計算時間の最小値，中央値，最大値については，最適配置が求まった試行についてのみ集計した．なお，試行によっては計算時間が極端に長くなることがあるため，ここでは統計量として平均値ではなく中央値を用いた．$k = 2$ については，すべての試行で 1 分以内に最適なメータ配置の獲得に成功している．また，中央値が最小値に近い値を示していることから，多くの試行では最小値に近い計算時間で最適配置を獲得できていることが確認できる．$k = 3$ については，39 母線系統までは全試行で最適配置の獲得に成功しているが，57 母線系統では一部の試行で制限時間内に最適配置が得られなかった．また，39 母線系統と 57 母線系統との間で計算時間が大きく増加している様子が確認できる．ここで，同時攻撃数 k の違いによって計算時間が大きく変化するのは，考慮しなければならない攻撃パターンが組合せ的に増加するのに応じて対応する制約式も急激に増加することが主な要因と考えられる．

Table 3.4 に，可観測性を維持するために追加配置が必要な冗長メータ数（追加メータ数）を示す．系統の接続関係や必須メータの初期配置パターンによって必要となる追加メータ数は異なるため単純には比較できないが，母線数が増加するにしたがって必要な追加メータ数も増加する傾向にあり，$k = 2$ のケースでは 118 母線系統と 300 母線系統との間で，$k = 3$ のケースでは 39 母線系統と 57 母線系統との間で追加メータ数が大きく増加する様子が確認できる．また，同時攻撃されるメータ数が 2 個ないし 3 個の場合でも，系統の可観測性を維持するためには多くの冗長メータを追加しなければならないことがわかる．例えば 300 母線

Table 3.4: 可観測性を維持するために追加配置が必要な冗長メータ数

	$k=2$			$k=3$		
系統名	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値
9 母線	5	6.0	7	4	4.7	5
14 母線	4	6.2	8	8	9.8	12
30 母線	10	14.0	17	16	19.7	22
39 母線	20	22.4	25	17	18.7	21
57 母線	16	18.9	22	*32	*35.8	*39
118 母線	41	47.0	51	—	—	—
300 母線	153	163.3	174	—	—	—

*最適配置が求まった 25 試行の結果についてのみ集計

の場合，$k=2$ に対応するためには，必須メータと冗長メータを合わせて最大で 473 箇所に配置する必要がある．これは Table 3.2 に示したメータ配置候補数の約 67%に相当する．

3.5 考察

3.5.1 最適配置の探索過程

$k=3$ における 57 母線系統を対象に，最適なメータ配置が求まった 25 試行中で最も計算時間を要した試行での上界値（最良値）と下界値の推移を Fig. 3.4 (a) に示す．最適化計算の早い段階で最適解自体は発見できているが，得られた解の最適性を保証する（上界値と下界値のギャップを縮める）ための計算に多くの時間が費やされている様子が確認できる．同様に，制限時間内に最適配置が求まらなかった 5 試行における上界値と下界値の推移を Fig. 3.4 (b)–(f) に示す．最適化計算の途中段階から下界値がほとんど改善されないケース（Fig. 3.4 (b)(c)）や，下界値は継続的に改善されるが上界値とのギャップを縮められずに制限時間に達するケース（Fig. 3.4 (d)–(f)）など，さまざまな要因で最適配置の獲得に失敗していることがわかる．なお，制限時間内に最適配置が求まらなかった 5 試行について，制限時間を設定せずに最適配置を探索した結果，すべての試行で最適配置の獲得に成功することが確認できた．計算時間は最長で 40,423 秒であったが，いずれの試行においても最適解自体は 3,600 秒以内に発見できている．

3.5.2 非線形制約の線形化および係数行列 B のコンパクト化の有効性

提案モデルで採用した計算効率化の方策は次の 2 項目である．

補助変数の導入による非線形制約の線形化 従来モデル [28] の制約式に含まれる非線形項 $\prod_{s=1}^{k} x_{i_s}$ を補助変数 $y_{i_1 \cdots i_k}$ に置き換え，$y_{i_1 \cdots i_k} = 1$ の場合にすべてのバイナリ変数 x_{i_s} が 1 となるように線形不等式 $x_{i_s} \geq y_{i_1 \cdots i_k}$ を追加することで線形化を図る．

係数行列 B のコンパクト化 可観測性維持のために追加された制約式の中から冗長な制約式を削除することで計算効率化を図る．また，制約式の追加とコンパクト化を段階的に

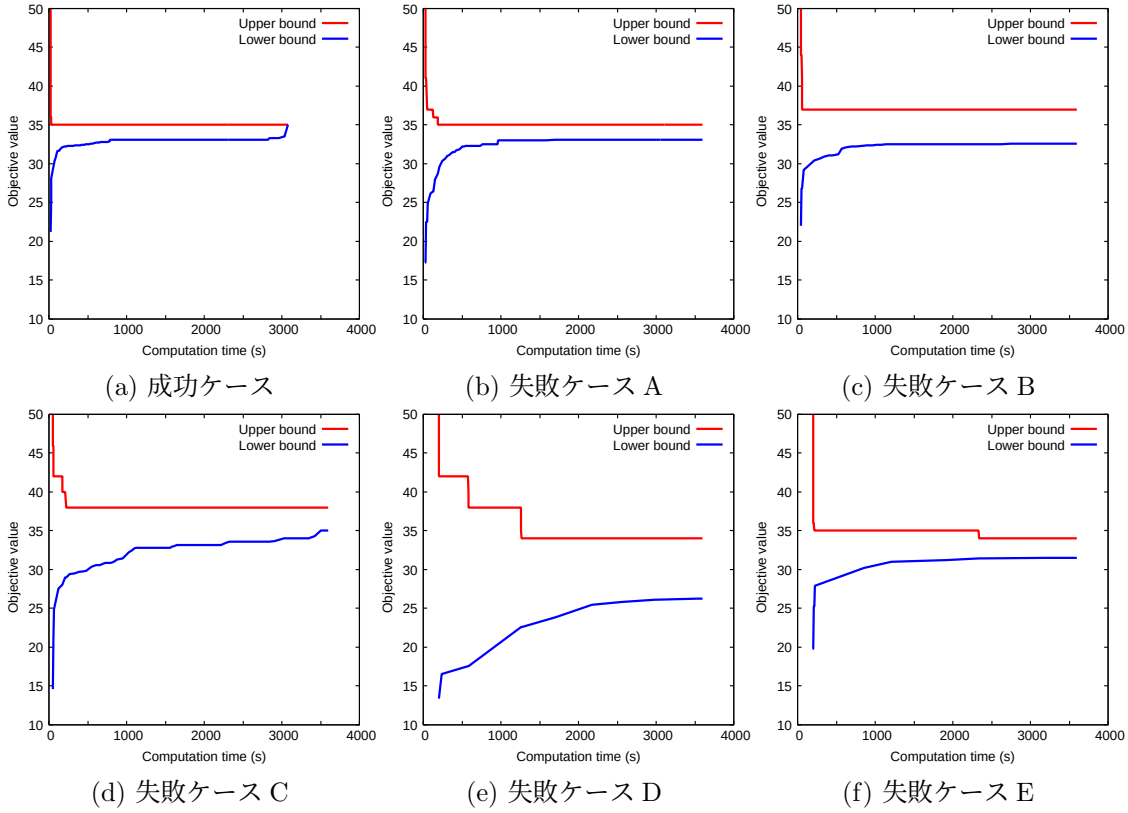


Fig. 3.4: 探索過程における冗長メータ数の上界値と下界値の推移（57 母線系統，$k = 3$）．赤線が上界値，青線が下界値を示している．

実施し，冗長な制約式どうしの無駄な比較操作を省略することでさらなる計算効率化を図る．

本節ではまず，1) 非線形制約の線形化による計算効率性について確認を行い，次に第 3.3 節で提案した係数行列 $\mathbf{B}$ のコンパクト化法の有効性について，2) 必要メモリ量の削減効果と，3) 計算時間の短縮効果，4) ブロックサイズの違いによる影響，のそれぞれについて確認を行った．

1) 非線形制約の線形化による計算効率性

非線形制約の線形化による計算効率化の効果を確認するために，最適配置が求まるまでに要する計算時間について従来モデル [28] との比較実験を行った．従来モデルを適用する際の制限により追加メータへの同時攻撃は対象外とし，$k = 2$ のケースについてのみ実験を行った（試行回数 30 回，制限時間 600 秒）．IEEE の 118 母線までの 5 種類のテスト系統に適用した結果を Table 3.5 に示す．各モデルの中央値を比較して，数値が等しいか小さい方を太字で示した．Table 3.5 より，すべてのケースにおいて提案モデルを用いた方が計算時間が短くなっており，非線形制約を線形化することによる計算時間の短縮効果が確認できる．

Table 3.5: 最適配置が求まるまでに要する計算時間（秒）の比較．提案モデルと従来モデルとを比較し，計算時間の中央値が短い方を太字で示している．

	提案モデル（線形モデル）			従来モデル（非線形モデル）		
系統名	最小値	中央値	最大値	最小値	中央値	最大値
9 母線	0.00	**0.01**	0.01	0.01	0.02	0.03
14 母線	0.01	**0.04**	0.18	0.03	0.05	0.10
39 母線	0.05	**0.08**	0.52	0.20	0.46	9.20
57 母線	0.48	**2.21**	30.67	†3.30	†15.04	†424.81
118 母線	6.09	**15.56**	44.17	‡31.56	‡83.40	‡548.01

† 最適配置が求まった 25 試行の結果についてのみ集計
‡ 最適配置が求まった 8 試行の結果についてのみ集計

Table 3.6: コンパクト化による係数行列 $\mathbf{B}$ の平均削減率

	$k=2$			$k=3$		
系統名	$L_{\mathbf{B}}$	$L_{\mathbf{B}}^{-}$	$\bar{r}_{\mathbf{B}}$	$L_{\mathbf{B}}$	$L_{\mathbf{B}}^{-}$	$\bar{r}_{\mathbf{B}}$
9 母線	28	28.0	0.0 %	10	10.0	0.0 %
14 母線	78	78.0	0.0 %	220	120.2	45.4 %
30 母線	406	406.0	0.0 %	2,600	248.5	90.4 %
39 母線	703	703.0	0.0 %	2,925	304.5	89.6 %
57 母線	1,540	1,000.0	35.1 %	26,235	1,115.5	95.7 %
118 母線	6,786	1,360.9	79.9 %	—	—	—
300 母線	44,551	4,477.0	90.0 %	—	—	—

$L_{\mathbf{B}}$：コンパクト化しない場合の係数行列 $\mathbf{B}$ の行数
$L_{\mathbf{B}}^{-}$：コンパクト化の過程で生成される係数行列 $\mathbf{B}$ の最大行数
$\bar{r}_{\mathbf{B}}$：平均削減率（$= 1 - L_{\mathbf{B}}^{-}/L_{\mathbf{B}}$）

2) 必要メモリ量の削減効果

コンパクト化の過程で生成される係数行列 $\mathbf{B}$ の最大行数は，ロバストなメータ配置を求める際に必要となるメモリ量を判断するうえでの一つの指標となる．そこで，コンパクト化の過程で生成される係数行列 $\mathbf{B}$ の最大行数および平均削減率について確認した結果を Table 3.6 に示す．表中の $L_{\mathbf{B}}$ は，コンパクト化しない場合の係数行列 $\mathbf{B}$ の行数，$L_{\mathbf{B}}^{-}$ はコンパクト化の過程で生成される係数行列 $\mathbf{B}$ の最大行数の平均を表している．また，平均削減率 $\bar{r}_{\mathbf{B}}$ は次式で定義される値である．

$$\bar{r}_{\mathbf{B}} := 1 - \frac{L_{\mathbf{B}}^{-}}{L_{\mathbf{B}}} \tag{3.12}$$

Table 3.6 より，コンパクト化によって最大で元の行数の約 96%が削減されており，係数行列 $\mathbf{B}$ を生成する際に必要となるメモリ量を大幅に抑えられていることが確認できる．ただし，系統規模が比較的小さく，$L_{\mathbf{B}}$ の値がブロックサイズ L_{b} よりも小さい場合には，係数行列 $\mathbf{B}$ を一回で生成する必要があるため平均削減率は 0%となっている．

なお，第 3.4 節で「k の違いによって計算時間が大きく変化するのは対応する制約式が組合せ的に増加することが主な要因」と述べたが，Table 3.6 に示した $L_{\mathbf{B}}$ の値からも制約式の数が急激に増加している様子が確認できる．

Table 3.7: 係数行列 $\mathbf{B}$ の生成に要する計算時間（秒）の比較．コンパクト化の有無で比較し，計算時間の中央値が短い方を太字で示している．

		コンパクト化あり			コンパクト化なし		
k	系統名	最小値	中央値	最大値	最小値	中央値	最大値
2	9 母線	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**0.00**	0.00
	14 母線	0.00	**0.00**	0.01	0.00	**0.00**	0.00
	30 母線	0.01	0.02	0.04	0.01	**0.01**	0.01
	39 母線	0.02	0.02	0.05	0.01	**0.01**	0.01
	57 母線	0.16	0.25	0.52	0.03	**0.04**	0.05
	118 母線	0.79	1.16	1.85	0.36	**0.51**	0.63
	300 母線	10.50	11.74	18.47	8.87	**9.14**	10.25
3	9 母線	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**0.00**	0.00
	14 母線	0.03	**0.03**	0.04	0.03	0.04	0.04
	30 母線	0.58	**0.81**	1.37	0.77	0.85	1.07
	39 母線	0.82	**0.98**	1.23	1.20	1.27	1.36
	57 母線	26.83	**34.73**	114.22	40.66	43.43	48.60

3) 計算時間の短縮効果

コンパクト化による計算時間の面での有効性を確認するため，係数行列 $\mathbf{B}$ のコンパクト化を行わない場合との比較実験を行った．係数行列全体を生成するのに要する計算時間と最適化に要する計算時間を個別に集計した結果を Table 3.7 および Table 3.8 にそれぞれ示す．コンパクト化法を用いた場合と用いない場合の中央値を比較して，数値が等しいか小さい方を太字で示した．

Table 3.7 より，$k = 2$ のケースではコンパクト化を行った方が係数行列の生成により長い計算時間を要しているが，これは冗長な制約式を削除するための操作が追加されたことが原因と考えられる．その一方で，$k = 3$ のケースではコンパクト化法を用いた方が計算時間は短くなっている．これは，新たに追加した制約式 (3.10) において，考慮する必要のない必須メータの組 $\{j_1, j_2\} \in J_2$ をコンパクト化法により削除したことによる効果と考えられる．

最適化計算に要する時間については，すべてのケースにおいてコンパクト化法を用いた方が短くなっており，係数行列 $\mathbf{B}$ をコンパクト化することによる計算時間の短縮効果が Table 3.8 より確認できる．$k = 3$ の 57 母線系統については，コンパクト化を行わない場合は 30 試行中 13 試行しか制限時間内に最適配置を獲得できなかったが，係数行列 $\mathbf{B}$ をコンパクト化することで 25 試行で最適配置を求めることに成功している．

4) ブロックサイズの違いによる影響

係数行列 $\mathbf{B}$ を段階的に生成する際のパラメータであるブロックサイズ L_{b} の違いが，係数行列の生成に要する計算時間に与える影響を確認するために，L_{b} の値を 10 行から 10,000 行まで変化させた実験を行った．Table 3.9 は，係数行列全体を生成するまでの計算時間（中央値）を示している．また，各テスト系統について，計算時間が最も短いか等しい値を太字で示している．

Table 3.8: 最適配置が求まるまでに要する計算時間（秒）の比較．コンパクト化の有無で比較し，計算時間の中央値が短い方を太字で示している．

		コンパクト化あり			コンパクト化なし		
	系統名	最小値	中央値	最大値	最小値	中央値	最大値
$k=2$	9 母線	0.00	**0.00**	0.01	0.00	**0.00**	0.01
	14 母線	0.00	**0.01**	0.05	0.01	**0.01**	0.04
	30 母線	0.01	**0.02**	0.63	0.02	0.05	0.09
	39 母線	0.01	**0.01**	0.13	0.02	0.03	0.21
	57 母線	0.07	**0.67**	10.79	0.55	1.10	15.98
	118 母線	0.38	**1.42**	15.23	1.80	4.45	28.18
	300 母線	0.69	**1.50**	35.04	9.28	13.49	54.76
$k=3$	9 母線	0.01	**0.01**	0.50	0.01	**0.01**	0.57
	14 母線	0.06	**0.14**	2.72	0.15	0.31	7.00
	30 母線	1.44	**4.05**	132.89	3.69	18.19	242.29
	39 母線	1.61	**6.63**	106.51	4.87	17.43	154.35
	57 母線	†21.1	†**846.9**	†3,046.9	‡425.2	‡1,873.5	‡3,186.9

† 最適配置が求まった 25 試行の結果についてのみ集計
‡ 最適配置が求まった 13 試行の結果についてのみ集計

Table 3.9 より，ブロックサイズ L_{b} の違いが係数行列の生成時間に与える影響は小さいことがわかる．ただし，$k=2$ における 300 母線系統や $k=3$ における 57 母線系統など，比較的規模の大きい系統については，適切なブロックサイズを設定する必要があることがわかる．本論文で用いた IEEE のテスト系統に関して言えば，$k=2$ のケースではブロックサイズ L_{b} を 1,000 行程度に，$k=3$ のケースでは 100 行程度に設定することが推奨される．

3.5.3 不正データ注入攻撃の実現性と攻撃検知

本論文で対象とする不正データ注入攻撃は，攻撃側が系統情報を完全に把握していることが前提となっているが，収集すべきデータ数が膨大であることやデータ自体が制御センターで強固に管理されていることから，攻撃の実現性は低いと考えられている [7]．しかし，監視制御システムが十分に整備されていない諸外国・地域や内部関係者の協力などの条件が揃えば攻撃の実現性は高まる．電力・エネルギー分野はサイバー攻撃を受けた際の被害も甚大であることから，わずかでも攻撃の可能性があれば事前にセキュリティ対策を検討しておくことは重要である．

より現実的な想定として，系統に関する不完全情報に基づいた不正データ注入攻撃についても数多く研究されている [7, 8, 11]．代表的な攻撃として，系統を分断する送電線の集合や局所エリア内の変圧器・送電線といった部分的な系統情報だけに基づく攻撃 [70, 80, 81]，状態推定における推定残差の期待値を不良データ検出法の閾値以下に抑えた攻撃 [70]，独立成分分析や機械学習などのデータ分析によってメータ観測値などから系統情報を推定する攻撃 [82]，などが提案されている．提案モデルは攻撃側が系統情報を完全に把握している最も厳しい状況を想定したモデルであるため，不完全情報に基づく不正データ注入攻撃にも基本的には対応可能であるが，系統情報自体が改竄されるなど従来の不良データ検出法では

Table 3.9: ブロックサイズ L_{b} の違いが係数行列 $\mathbf{B}$ の生成に要する計算時間（秒）に与える影響．ブロックサイズで比較し，計算時間が最も短い箇所を太字で示している．

	系統名	$L_{\mathrm{b}} = 10^1$	$L_{\mathrm{b}} = 10^2$	$L_{\mathrm{b}} = 10^3$	$L_{\mathrm{b}} = 10^4$
$k = 2$	9 母線	**0.00**	**0.00**	**0.00**	**0.00**
	14 母線	0.01	**0.00**	**0.00**	**0.00**
	30 母線	0.03	**0.01**	0.02	0.02
	39 母線	0.05	**0.02**	**0.02**	**0.02**
	57 母線	0.23	**0.11**	0.25	0.39
	118 母線	2.64	1.18	**1.00**	2.79
	300 母線	79.65	17.07	**11.76**	19.75
$k = 3$	9 母線	**0.00**	**0.00**	**0.00**	**0.00**
	14 母線	0.04	**0.03**	0.04	0.04
	30 母線	1.51	**0.79**	1.42	3.04
	39 母線	1.72	**0.97**	1.29	2.32
	57 母線	93.16	**36.62**	51.25	224.73

検知が難しい攻撃も新たに提案されている．これまでに提案されている検知手法は大きくモデルベースの検知手法（Model-based Detection Algorithms）とデータ駆動型の検知手法（Data-Driven Detection Algorithms）とに分類される [83]．前者については，系統モデルに基づいた状態推定と推定誤差の評価が基本であり，重み付き最小二乗推定や最尤推定を用いた検知手法のほかに，観測値の一部に外れ値が含まれる場合に有効なロバスト推定手法の一つである最小刈込み二乗法（Least Trimmed Squares）を用いた検知手法も提案されている [84, 85]．後者のデータ駆動型検知手法については，教師あり学習，教師なし学習，強化学習などの機械学習を用いた手法のほか，攻撃の有無によるメータ観測値の確率分布の違いに着目した密度比推定（Density Ratio Estimation）に基づいた検知手法も提案されている [86]．データ駆動型の検知手法は，系統情報を必要としない代わりにモデル構築のための学習が必要ではあるが，一旦モデルを構築すれば高速に攻撃検知できるためオンライン検知などに適している．今後は，メータ配置などの対策に加えて検知手法の高度化による対策についても検討が必要である．

3.6 おわりに

本章では，不正データ注入攻撃から電力系統を守るための防御策として，3 箇所のメータへの同時攻撃までを対象に，必須メータに加えて追加メータへの同時攻撃も考慮したロバストなメータ配置を求めるための数理計画モデルを提案した．また，冗長な制約式を排除して係数行列をコンパクト化することで，最適なメータ配置を効率的に求める方法についても提案した．提案モデルを用いることで，従来モデル [27, 28] では考慮していなかった追加メータへの同時攻撃にも対応できる適切なメータ配置が得られるようになった．また，提案手法を用いて係数行列をコンパクト化することで，必要メモリ量を削減できるだけでなく計算時間も短縮できることを確認した．

本章では，必須メータの配置をあらかじめ与えたうえで，系統の可観測性を維持するた

めに必要な追加メータの配置を求めている．しかし，数値実験の結果からもわかるように，必要となる追加メータ数は必須メータの配置によって変化する．必須メータ（既設メータ）の再配置も含めた系統全体でのメータ数の最小化について今後検討を進める予定である．また，系統の脆弱性自体は既存手法 [16] などを用いて高速に評価できるため，より規模の大きい系統におけるロバストなメータ配置や，より多くの同時攻撃に対応できるメータ配置を求めるために，これらの手法と組み合わせた手法についても今後検討を行う．

第4章　不確実環境下における事故復旧のための分散型エネルギー資源の最適配置

4.1　はじめに

本章では，不確実環境下における事故復旧のための分散型エネルギー資源の最適配置を求める数理計画モデルを提案する．提案モデルでは，第2章で示す接近法に従い，復旧操作全体の最適化，分散型エネルギー資源の活用，不確実性の考慮，のすべてを考慮し分散型エネルギー資源を最適に配置できることを目的とする．不確実性を複数のシナリオとその発生確率として表現し，事故時の復旧操作に関する各種の制約条件下で，評価期間全体の復旧電力量を最大化する配置を求める．IEEE のテスト系統を用いた数値実験を行い，迅速な事故復旧における提案モデルの妥当性や有用性を示す．

本章の構成は以下のとおりである．まず，第4.2節で分散型エネルギー資源の最適配置に関する基本モデルを示し，第4.3節で不確実性を考慮するためのモデル拡張について論じる．第4.4節で小規模のテスト系統を用いた性能評価実験を行い，第4.5節でいくつかの追加実験を含む考察を行う．最後に第4.6節で本章の内容と今後の課題についてまとめる．

4.2　分散型エネルギー資源の最適配置モデル

4.2.1　集合および決定変数

まず準備として，提案する数理計画モデルで用いる集合を以下のとおり定義する．

$\mathcal{N}$　ノード（母線）の集合．$\mathcal{N} := \{1, 2, \ldots, n\}$

$\mathcal{B}$　有向ブランチ（送電線）の集合．$\mathcal{B} := \{(i, j) \mid i, j \in \mathcal{N}\}$

$\mathcal{L}$　負荷の集合．$\mathcal{L} := \{1, 2, \ldots, n_l\}$

$\mathcal{G}$　分散型電源の集合．$\mathcal{G} := \{1, 2, \ldots, n_g\}$

$\mathcal{E}$　電力貯蔵設備の集合．$\mathcal{E} := \{1, 2, \ldots, n_e\}$

$\mathcal{T}$　時間ステップの集合．$\mathcal{T} := \{1, 2, \ldots, t^{\max}\}$

電力系統を n 個のノードとそれらを接続する n_b 本のブランチからなるグラフ $G = (\mathcal{N}, \mathcal{B})$ で表現し，グラフ G 内のノードに n_l 個の負荷が接続しており，n_g 個の分散型電源および n_e 個の電力貯蔵設備を配置する状況を想定する．なお，以降では「時間ステップ」を単に「時間」と表記する場合がある点に留意されたい．

次に提案モデルで用いる2種類の決定変数を定義する．以下に示す8種類の決定変数は，0または1の値だけをとるバイナリ変数（Binary Variables）である．

$x^{\mathrm{L}}_{l,t}$　時間 $t \in \mathcal{T}$ における負荷 $l \in \mathcal{L}$ の通電状態を表すバイナリ変数
$x^{\mathrm{G}}_{g,t}$　時間 $t \in \mathcal{T}$ における分散型電源 $g \in \mathcal{G}$ の運転状態を表すバイナリ変数
$x^{\mathrm{C}}_{e,t}$　時間 $t \in \mathcal{T}$ における電力貯蔵設備 $e \in \mathcal{E}$ の充電状態を表すバイナリ変数
$x^{\mathrm{D}}_{e,t}$　時間 $t \in \mathcal{T}$ における電力貯蔵設備 $e \in \mathcal{E}$ の放電状態を表すバイナリ変数
$y^{\mathrm{N}}_{i,t}$　時間 $t \in \mathcal{T}$ におけるノード $i \in \mathcal{N}$ の通電状態を表すバイナリ変数
$y^{\mathrm{B}}_{b,t}$　時間 $t \in \mathcal{T}$ におけるブランチ $b \in \mathcal{B}$ の通電状態を表すバイナリ変数
$z^{\mathrm{G}}_{g,i}$　分散型電源 $g \in \mathcal{G}$ をノード $i \in \mathcal{N}$ に配置するか否かを表すバイナリ変数
$z^{\mathrm{E}}_{e,i}$　電力貯蔵設備 $e \in \mathcal{E}$ をノード $i \in \mathcal{N}$ に配置するか否かを表すバイナリ変数

例えば，時間スッテプ t において電力貯蔵設備 e が充電中の時は $x^{\mathrm{C}}_{e,t} = 1$，放電中の時は $x^{\mathrm{D}}_{e,t} = 1$ となる．また，時間ステップ t においてノード i が通電していれば $y^{\mathrm{N}}_{i,t} = 1$，そうでなければ 0 である．さらに，2 種類のバイナリ変数 $z^{\mathrm{G}}_{g,i}, z^{\mathrm{E}}_{e,i}$ はそれぞれ分散型電源 g と電力貯蔵設備 e をノード i に配置するかどうかを示しており，配置する場合は 1，配置しない場合は 0 となる決定変数である．

以下に示す 6 種類の決定変数は，連続的な値をとることができる連続変数（Continuous Variables）である．

$p^{\mathrm{B}}_{b,t}$　時間 $t \in \mathcal{T}$ におけるブランチ $b \in \mathcal{B}$ 上の電力潮流を表す連続変数
$p^{\mathrm{L}}_{l,t} \geq 0$　時間 $t \in \mathcal{T}$ における負荷 $l \in \mathcal{L}$ の復旧負荷量を表す連続変数
$p^{\mathrm{G}}_{g,t} \geq 0$　時間 $t \in \mathcal{T}$ における分散型電源 $g \in \mathcal{G}$ の出力を表す連続変数
$p^{\mathrm{C}}_{e,t} \geq 0$　時間 $t \in \mathcal{T}$ における電力貯蔵設備 $e \in \mathcal{E}$ の充電電力を表す連続変数
$p^{\mathrm{D}}_{e,t} \geq 0$　時間 $t \in \mathcal{T}$ における電力貯蔵設備 $e \in \mathcal{E}$ の放電電力を表す連続変数
$s_{e,t} \geq 0$　時間 $t \in \mathcal{T} \cup \{0\}$ における電力貯蔵設備 $e \in \mathcal{E}$ の電力貯蔵量を表す連続変数

ここで，ブランチ $b = (i, j)$ はノード i からノード j を正の方向とする有向ブランチとして定義しているので，ブランチ b を逆方向に電力が流れる場合 $p^{\mathrm{B}}_{b,t}$ は負値となる．

4.2.2　制約条件

潮流バランスの維持　グラフ G 内の各ノードに対し，ノードに流入する電力潮流と接続する分散型電源および電力貯蔵設備の出力の総和が，そのノードから流出する電力潮流，接続する負荷での消費電力，電力貯蔵設備の充電電力の総和と一致していなければならない（フロー保存則）．いま，ノード $i \in \mathcal{N}$ に接続された分散型電源，電力貯蔵設備，負荷の集合をそれぞれ $\mathcal{G}_i, \mathcal{E}_i, \mathcal{L}_i$ と定義すると，ノード i における潮流バランスは次式のように定式化できる．

$$\sum_{b \in \mathcal{B}_i^+} p^{\mathrm{B}}_{b,t} + \sum_{g \in \mathcal{G}_i} p^{\mathrm{G}}_{g,t} + \sum_{e \in \mathcal{E}_i} p^{\mathrm{D}}_{e,t} = \sum_{b \in \mathcal{B}_i^-} p^{\mathrm{B}}_{b,t} + \sum_{l \in \mathcal{L}_i} p^{\mathrm{L}}_{l,t} + \sum_{e \in \mathcal{E}_i} p^{\mathrm{C}}_{e,t}, \quad \forall i \in \mathcal{N},\ \forall t \in \mathcal{T} \tag{4.1}$$

ここで，$\mathcal{B}_i^+$ と $\mathcal{B}_i^-$ はそれぞれノード i を終点および始点とするブランチの集合である．

$$\mathcal{B}_i^+ := \{(j, i) \in \mathcal{B} \mid \forall j \in \mathcal{N}\}, \quad \mathcal{B}_i^- := \{(i, j) \in \mathcal{B} \mid \forall j \in \mathcal{N}\} \tag{4.2}$$

予備力の確保　将来負荷の予測外れなどを考慮して，運転状態にある分散型電源と放電状態にある電力貯蔵設備の最大出力の合計が，負荷合計の一定割合以上の予備力を確保しておかなければならない．

$$(1+r)\sum_{l\in\mathcal{L}} p^{\mathrm{L}}_{l,t} \leq \sum_{g\in\mathcal{G}} p^{\max}_{g}\cdot x^{\mathrm{G}}_{g,t} + \sum_{e\in\mathcal{E}} p^{\max}_{e}\cdot x^{\mathrm{D}}_{e,t} \tag{4.3}$$

ここで，r は予備率であり，本論文ではすべての実験で 15%に設定した．

送電線の運用容量　ブランチ $b\in\mathcal{B}$ 上の電力潮流は指定された運用容量の範囲内でしか流すことができない．

$$-p^{\max}_{b} \leq p^{\mathrm{B}}_{b,t} \leq p^{\max}_{b}, \quad \forall b\in\mathcal{B},\ \forall t\in\mathcal{T} \tag{4.4}$$

ここで $p^{\max}_{b}$ はブランチ b の運用容量で，本論文では順方向と逆方向で同じ値とする．

接続性　分散型電源 $g\in\mathcal{G}$ からの出力，電力貯蔵設備 $e\in\mathcal{E}$ での充放電，負荷 $l\in\mathcal{L}$ への電力供給は，それらが接続するノードが通電状態になって初めて可能になる．

$$x^{\mathrm{G}}_{g,t} \leq y^{\mathrm{N}}_{i,t}, \quad \forall g\in\mathcal{G}_i,\ \forall i\in\mathcal{N},\ \forall t\in\mathcal{T} \tag{4.5}$$

$$x^{\mathrm{C}}_{e,t} + x^{\mathrm{D}}_{e,t} \leq y^{\mathrm{N}}_{i,t}, \quad \forall e\in\mathcal{E}_i,\ \forall i\in\mathcal{N},\ \forall t\in\mathcal{T} \tag{4.6}$$

$$x^{\mathrm{L}}_{l,t} \leq y^{\mathrm{N}}_{i,t}, \quad \forall l\in\mathcal{L}_i,\ \forall i\in\mathcal{N},\ \forall t\in\mathcal{T} \tag{4.7}$$

制約式 (4.6) は，電力貯蔵設備 e が配置されているノードが通電状態の時にのみ充放電のいずれかの状態になり得ることを意味している．

また，ブランチ $(i,j)\in\mathcal{B}$ については，両端のノード i, j が共に通電状態でないと電力を送ることができない．

$$y^{\mathrm{B}}_{b,t} \leq y^{\mathrm{N}}_{i,t},\ y^{\mathrm{B}}_{b,t} \leq y^{\mathrm{N}}_{j,t}, \quad \forall b=(i,j)\in\mathcal{B},\ \forall t\in\mathcal{T} \tag{4.8}$$

通電箇所の再停電禁止　一度通電した分散型電源 $g\in\mathcal{G}$，負荷 $l\in\mathcal{L}$，ブランチ $b\in\mathcal{B}$ を再び停電させることはできない．

$$x^{\mathrm{G}}_{g,t-1} \leq x^{\mathrm{G}}_{g,t}, \quad \forall g\in\mathcal{G},\ \forall t\in\mathcal{T},\ t\geq 2 \tag{4.9}$$

$$x^{\mathrm{L}}_{l,t-1} \leq x^{\mathrm{L}}_{l,t}, \quad \forall l\in\mathcal{L},\ \forall t\in\mathcal{T},\ t\geq 2 \tag{4.10}$$

$$y^{\mathrm{B}}_{b,t-1} \leq y^{\mathrm{B}}_{b,t}, \quad \forall b\in\mathcal{B},\ \forall t\in\mathcal{T},\ t\geq 2 \tag{4.11}$$

放射状系統の維持　平常時と同様，復旧操作過程の各時間ステップにおいても，通電状態にある部分系統を放射状に運用する必要がある．

$$\sum_{i\in\mathcal{N}} y^{\mathrm{N}}_{i,t} - \sum_{b\in\mathcal{B}} y^{\mathrm{B}}_{b,t} = \sum_{g\in\mathcal{G}^*} x^{\mathrm{G}}_{g,t}, \quad \forall t\in\mathcal{T} \tag{4.12}$$

ここで，$\mathcal{G}^*$ はブラックスタート機能を有する分散型電源の集合である．

分散型電源の運用　運転状態にある分散型電源 $g \in \mathcal{G}$ は指定された上下限の範囲内で出力しなければならない．

$$p_g^{\min} \cdot x_{g,t}^{\mathrm{G}} \leq p_{g,t}^{\mathrm{G}} \leq p_g^{\max} \cdot x_{g,t}^{\mathrm{G}}, \quad \forall g \in \mathcal{G},\ \forall t \in \mathcal{T} \tag{4.13}$$

ここで，$p_g^{\min}, p_g^{\max}$ は分散型電源 g の最低出力および最大出力である．また，制約式 (4.13) は運転状態にない分散型電源の出力を強制的に 0 にする効果もある．

さらに，連続する時間ステップでの分散型電源 g の出力変化を指定値以下に抑えなければならない．

$$-p_g^{\mathrm{ramp_down}} \leq p_{g,t}^{\mathrm{G}} - p_{g,t-1}^{\mathrm{G}} \leq p_g^{\mathrm{ramp_up}}, \quad \forall g \in \mathcal{G},\ \forall t \in \mathcal{T},\ t \geq 2 \tag{4.14}$$

ここで，$p_g^{\mathrm{ramp_up}}$ と $p_g^{\mathrm{ramp_down}}$ はそれぞれ，分散型電源 g の上げ方向および下げ方向の出力変化速度である．なお，本論文では上下方向の出力変化速度を同じと仮定し，同一の出力変化速度 p_g^{ramp} を用いて次式のように定式化する．

$$\left|p_{g,t}^{\mathrm{G}} - p_{g,t-1}^{\mathrm{G}}\right| \leq p_g^{\mathrm{ramp}}, \quad \forall g \in \mathcal{G},\ \forall t \in \mathcal{T},\ t \geq 2 \tag{4.15}$$

電力貯蔵設備の運用　電力貯蔵設備 $e \in \mathcal{E}$ の電力貯蔵量は，設備容量 s_e^{cap}，初期充電率 ρ_e^{ini}，充電効率 η_e^{C} および放電効率 η_e^{D} を用いて次式のように管理される．

$$s_{e,0} = \rho_e^{\mathrm{ini}} \cdot s_e^{\mathrm{cap}}, \quad \forall e \in \mathcal{E} \tag{4.16}$$

$$s_{e,t} = s_{e,t-1} + \eta_e^{\mathrm{C}} \cdot p_{e,t}^{\mathrm{C}} - p_{e,t}^{\mathrm{D}} / \eta_e^{\mathrm{D}}, \quad \forall e \in \mathcal{E},\ \forall t \in \mathcal{T} \tag{4.17}$$

そして，式 (4.16)(4.17) で計算される電力貯蔵量 $s_{e,t}$ は，充電率下限 $\rho_e^{\min}$ と充電率上限 $\rho_e^{\max}$ によって指定される範囲内で運用しなければならない．

$$\rho_e^{\min} \cdot s_e^{\mathrm{cap}} \leq s_{e,t} \leq \rho_e^{\max} \cdot s_e^{\mathrm{cap}}, \quad \forall e \in \mathcal{E},\ \forall t \in \mathcal{T} \tag{4.18}$$

また，以下の不等式制約により電力貯蔵設備の各時間ステップでの充放電電力が制限される．

$$p_{e,t}^{\mathrm{C}} \leq p_e^{\max} \cdot x_{e,t}^{\mathrm{C}}, \quad \forall e \in \mathcal{E},\ \forall t \in \mathcal{T} \tag{4.19}$$

$$p_{e,t}^{\mathrm{D}} \leq p_e^{\max} \cdot x_{e,t}^{\mathrm{D}}, \quad \forall e \in \mathcal{E},\ \forall t \in \mathcal{T} \tag{4.20}$$

ここで，$p_e^{\max}$ は電力貯蔵設備 e の最大電力である．

最後に分散型電源と同様，電力貯蔵設備も連続する時間ステップでの充放電電力の変化速度を指定値以下に抑えなければならない．

$$\left|p_{e,t}^{\mathrm{C}} - p_{e,t-1}^{\mathrm{C}}\right| \leq p_e^{\mathrm{ramp}}, \quad \forall e \in \mathcal{E},\ \forall t \in \mathcal{T},\ t \geq 2 \tag{4.21}$$

$$\left|p_{e,t}^{\mathrm{D}} - p_{e,t-1}^{\mathrm{D}}\right| \leq p_e^{\mathrm{ramp}}, \quad \forall e \in \mathcal{E},\ \forall t \in \mathcal{T},\ t \geq 2 \tag{4.22}$$

なお，電力貯蔵設備 e の最大電力 $p_e^{\max}$ や変化速度 p_e^{ramp} を充電時と放電時で変更することも可能だが，本論文ではいずれも同一の設定値とした．

分散型エネルギー資源の配置　費用面での理由などから，必要に応じて系統に配置できる分散型エネルギー資源の数を制限しなければならない．また，分散型電源や電力貯蔵設備はいずれかのノードに高々1 箇所だけ配置しなければならず，配置した分散型エネルギー資源だけを復旧操作に活用することができる．

$$\sum_{g\in\mathcal{G}}\sum_{i\in\mathcal{N}} z^{\mathrm{G}}_{g,i} \le n^{\max}_{g}, \quad \sum_{e\in\mathcal{E}}\sum_{i\in\mathcal{N}} z^{\mathrm{E}}_{e,i} \le n^{\max}_{e} \tag{4.23}$$

$$x^{\mathrm{G}}_{g,t} \le \sum_{i\in\mathcal{N}} z^{\mathrm{G}}_{g,i} \le 1, \quad \forall g\in\mathcal{G},\ \forall t\in\mathcal{T} \tag{4.24}$$

$$x^{\mathrm{C}}_{e,t} + x^{\mathrm{D}}_{e,t} \le \sum_{i\in\mathcal{N}} z^{\mathrm{E}}_{e,i} \le 1, \quad \forall e\in\mathcal{E},\ \forall t\in\mathcal{T} \tag{4.25}$$

ここで，$n^{\max}_{g}$ と $n^{\max}_{e}$ はそれぞれ分散型電源と電力貯蔵設備の最大配置可能数である．

負荷特性　復旧後に時間経過とともに負荷量が動的に変化する負荷特性を想定し、本論文では次式に示す線形 CLPU (Cold Load PickUp) モデルを採用する [63].

$$p^{\mathrm{L}}_{l,t} = p^{\mathrm{pre}}_{l}\left(\sigma^{\mathrm{U}}_{l}\cdot x^{\mathrm{L}}_{l,t} - \sum_{k=1}^{t}\Delta p_l(k)\cdot x^{\mathrm{L}}_{l,t-k+1}\right), \quad \forall l\in\mathcal{L},\ \forall t\in\mathcal{T} \tag{4.26}$$

ここで，p^{pre}_{l} は停電前の負荷量，σ^{U} は復旧直後の負荷倍率である．また，$\Delta p_l(k)$ は，収束後の負荷倍率 σ^{D}，減衰率 α_l，停滞時間 D_l を用いて以下の式にしたがって計算されるものである．

$$\Delta p_l(1) = 0 \tag{4.27}$$

$$\Delta p_l(k) = p_l(k) - p_l(k-1), \quad \forall k\in\mathcal{T},\ k\ge 2 \tag{4.28}$$

$$p_l(k) = \begin{cases} \sigma^{\mathrm{U}}_{l} & k\le D_l \\ \sigma^{\mathrm{D}}_{l} + (\sigma^{\mathrm{U}}_{l} - \sigma^{\mathrm{D}}_{l})\cdot e^{-\alpha_l(k-D_l-1)} & k > D_l \end{cases} \tag{4.29}$$

CLPU モデルは，Fig. 4.1 に示すように，復旧後に負荷が $\sigma^{\mathrm{U}}_{l}\cdot p^{\mathrm{pre}}_{l}$ まで急激に上昇し，一定時間その負荷レベルを維持した後に $\sigma^{\mathrm{D}}_{l}\cdot p^{\mathrm{pre}}_{l}$ まで指数関数的に減少する負荷特性を模擬したものである．

初期条件　初期状態においてすべてのブランチは通電されていないものとする．また，ブラックスタート機能を有する分散型電源は期間全体を通して運転状態にあるものとする．

$$y^{\mathrm{B}}_{b,1} = 0, \quad \forall b\in\mathcal{B} \tag{4.30}$$

$$x^{\mathrm{G}}_{g,t} = 1, \quad \forall g\in\mathcal{G}^{*},\ \forall t\in\mathcal{T} \tag{4.31}$$

4.2.3　目的関数

電力系統において事故や故障等が発生した場合，その結果生じる停電箇所をできるだけ迅速に復旧する必要がある．目的関数は，全期間における復旧電力量を最大化するように次式

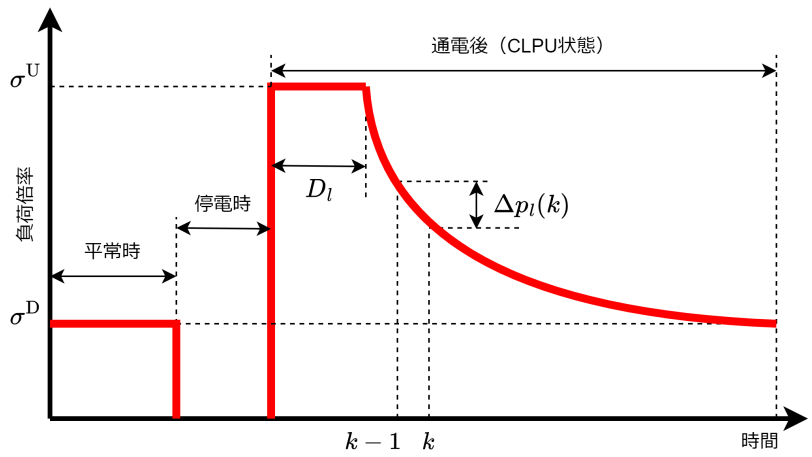


Fig. 4.1: 線形 CLPU (Cold Load PickUp) モデル [63]．復旧後に負荷が急激に上昇し，一定時間その負荷レベルを維持した後に指数関数的に減少する負荷特性を模擬したもの．

のとおり定義する．

$$\text{maximize} \quad \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{t \in \mathcal{T}} w_l \cdot p^{\mathrm{L}}_{l,t} \tag{4.32}$$

ここで，w_l は負荷 $l \in \mathcal{L}$ に対する重み係数である．この重み係数は，負荷の重要度を考慮して系統運用者が注意深く設定する必要がある．なお，本論文では負荷の重み係数はすべて 1.0 に設定した．

4.3 不確実性を考慮するためのモデル拡張

分散型エネルギー資源において生じる偶発的な故障等の不確実性を考慮するために，第 4.2 節で示した基本モデルを，複数シナリオとその発生確率によって表現した不確実性を考慮できるモデルに拡張する．以降では，不確実性を表すシナリオの集合を $\mathcal{S} = \{1, 2, \ldots\}$ とする．

4.3.1 決定変数と制約条件の再定義

決定変数　第 4.2 節で示した決定変数を，すべてのシナリオについて共通とすべき変数とシナリオによって異なる値を取れる変数とに分類する．分散型エネルギー資源の配置に関するバイナリ変数 $z^{\mathrm{G}}_{g,i}$, $z^{\mathrm{E}}_{e,i}$ については，不確実性のシナリオによって異なるノードに配置されるのは想定として適切ではないため，すべてのシナリオで共通とし変数の再定義は行わない．同様に，事前に計画した復旧手順にしたがって操作することを前提に，復旧操作手順に関するバイナリ変数 $y^{\mathrm{N}}_{i,t}$, $y^{\mathrm{B}}_{b,t}$ もすべてのシナリオで共通とし，それ以外の変数については各シナリオで値を変更できるよう再定義する．例えば，バイナリ変数 $x^{\mathrm{G}}_{g,t}$ は，シナリオ s における時間ステップ t での分散型電源 g の通電状態を表すバイナリ変数 $x^{\mathrm{G}}_{g,t}(s)$ と再定義する．

再定義後のバイナリ変数は以下のとおりである．

$x^{\mathrm{L}}_{l,t}(s)$　シナリオ s における時間 t での負荷 l の通電状態を表すバイナリ変数
$x^{\mathrm{G}}_{g,t}(s)$　シナリオ s における時間 t での分散型電源 g の運転状態を表すバイナリ変数
$x^{\mathrm{C}}_{e,t}(s)$　シナリオ s における時間 t での電力貯蔵設備 e の充電状態を表すバイナリ変数
$x^{\mathrm{D}}_{e,t}(s)$　シナリオ s における時間 t での電力貯蔵設備 e の放電状態を表すバイナリ変数

同様に，再定義後の連続変数は以下のとおりである．

$p^{\mathrm{B}}_{b,t}(s)$　シナリオ s における時間 t でのブランチ b 上の電力潮流を表す連続変数
$p^{\mathrm{L}}_{l,t}(s)$　シナリオ s における時間 t での負荷 l の復旧負荷量を表す連続変数
$p^{\mathrm{G}}_{g,t}(s)$　シナリオ s における時間 t での分散型電源 g の出力を表す連続変数
$p^{\mathrm{C}}_{e,t}(s)$　シナリオ s における時間 t での電力貯蔵設備 e の充電電力を表す連続変数
$p^{\mathrm{D}}_{e,t}(s)$　シナリオ s における時間 t での電力貯蔵設備 e の放電電力を表す連続変数
$s_{e,t}(s)$　時間 $t \in \mathcal{T} \cup \{0\}$ における電力貯蔵設備 e の電力貯蔵量を表す連続変数

ここで，$s_{e,0}(s)$ は事故直後の電力貯蔵設備 e の貯蔵量を表していることから，シナリオに依らず同じ値とする．

制約条件　決定変数の再定義に合わせて，ほとんどの制約条件を再定義する必要がある．例として，制約式 (4.5)–(4.7) は，複数のシナリオを考慮し次式のように再定義される．

$$x^{\mathrm{G}}_{g,t}(s) \leq y^{\mathrm{N}}_{i,t}, \quad \forall g \in \mathcal{G}_i,\ \forall i \in \mathcal{N},\ \forall t \in \mathcal{T},\ \forall s \in \mathcal{S} \tag{4.33}$$

$$x^{\mathrm{C}}_{e,t}(s) + x^{\mathrm{D}}_{e,t}(s) \leq y^{\mathrm{N}}_{i,t}, \quad \forall e \in \mathcal{E}_i,\ \forall i \in \mathcal{N},\ \forall t \in \mathcal{T},\ \forall s \in \mathcal{S} \tag{4.34}$$

$$x^{\mathrm{L}}_{l,t}(s) \leq y^{\mathrm{N}}_{i,t}, \quad \forall l \in \mathcal{L}_i,\ \forall i \in \mathcal{N},\ \forall t \in \mathcal{T},\ \forall s \in \mathcal{S} \tag{4.35}$$

例えば式 (4.33) は，ノード $i \in \mathcal{N}$ 自体はシナリオ共通で $y^{\mathrm{N}}_{i,t}$ にしたがって通電されるが，ノード i に接続する分散型電源 $g \in \mathcal{G}_i$ が実際に出力するかどうかはシナリオによって異なる可能性があることを示している．

一方，制約式 (4.8), (4.11), (4.23) はシナリオによって共通であるため再定義する必要はない．再定義した後の制約条件全体については，次節でまとめて示すこととする．

4.3.2　全体モデル

提案する数理計画モデルを以下にまとめる．

潮流バランスの維持：

$$\sum_{b \in \mathcal{B}^+_i} p^{\mathrm{B}}_{b,t}(s) + \sum_{g \in \mathcal{G}_i} p^{\mathrm{G}}_{g,t}(s) + \sum_{e \in \mathcal{E}_i} p^{\mathrm{D}}_{e,t}(s) = \sum_{b \in \mathcal{B}^-_i} p^{\mathrm{B}}_{b,t}(s) + \sum_{l \in \mathcal{L}_i} p^{\mathrm{L}}_{l,t}(s) + \sum_{e \in \mathcal{E}_i} p^{\mathrm{C}}_{e,t}(s),$$
$$\forall i \in \mathcal{N},\ \forall t \in \mathcal{T},\ \forall s \in \mathcal{S} \tag{4.36}$$

予備力の確保：

$$(1+r)\sum_{l\in\mathcal{L}} p^{\mathrm{L}}_{l,t}(s) \le \sum_{g\in\mathcal{G}} p^{\max}_{g}\cdot x^{\mathrm{G}}_{g,t}(s) + \sum_{e\in\mathcal{E}} p^{\max}_{e}\cdot x^{\mathrm{D}}_{e,t}(s), \quad \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S} \tag{4.37}$$

送電線の運用容量：

$$-p^{\max}_{b} \le p^{\mathrm{B}}_{b,t}(s) \le p^{\max}_{b}, \quad \forall b\in\mathcal{B},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S} \tag{4.38}$$

接続性：

$$x^{\mathrm{G}}_{g,t}(s) \le y^{\mathrm{N}}_{i,t}, \quad \forall g\in\mathcal{G}_i,\ \forall i\in\mathcal{N},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S} \tag{4.39}$$

$$x^{\mathrm{C}}_{e,t}(s) + x^{\mathrm{D}}_{e,t}(s) \le y^{\mathrm{N}}_{i,t}, \quad \forall e\in\mathcal{E}_i,\ \forall i\in\mathcal{N},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S} \tag{4.40}$$

$$x^{\mathrm{L}}_{l,t}(s) \le y^{\mathrm{N}}_{i,t}, \quad \forall l\in\mathcal{L}_i,\ \forall i\in\mathcal{N},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S} \tag{4.41}$$

$$y^{\mathrm{B}}_{b,t} \le y^{\mathrm{N}}_{i,t},\ y^{\mathrm{B}}_{b,t} \le y^{\mathrm{N}}_{j,t},\ \forall b=(i,j)\in\mathcal{B},\ \forall t\in\mathcal{T} \tag{4.42}$$

通電箇所の再停電禁止：

$$x^{\mathrm{G}}_{g,t-1}(s) \le x^{\mathrm{G}}_{g,t}(s), \quad \forall g\in\mathcal{G},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S},\ t\ge 2 \tag{4.43}$$

$$x^{\mathrm{L}}_{l,t-1}(s) \le x^{\mathrm{L}}_{l,t}(s), \quad \forall l\in\mathcal{L},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S},\ t\ge 2 \tag{4.44}$$

$$y^{\mathrm{B}}_{b,t-1} \le y^{\mathrm{B}}_{b,t}, \quad \forall b\in\mathcal{B},\ \forall t\in\mathcal{T},\ t\ge 2 \tag{4.45}$$

放射状系統の維持：

$$\sum_{i\in\mathcal{N}} y^{\mathrm{N}}_{i,t} - \sum_{b\in\mathcal{B}} y^{\mathrm{B}}_{b,t} = \sum_{g\in\mathcal{G}^*} x^{\mathrm{G}}_{g,t}(s), \quad \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S} \tag{4.46}$$

分散型電源の運用：

$$p^{\min}_{g}\cdot x^{\mathrm{G}}_{g,t}(s) \le p^{\mathrm{G}}_{g,t}(s) \le p^{\max}_{g}\cdot x^{\mathrm{G}}_{g,t}(s), \quad \forall g\in\mathcal{G},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S} \tag{4.47}$$

$$\left|p^{\mathrm{G}}_{g,t}(s) - p^{\mathrm{G}}_{g,t-1}(s)\right| \le p^{\mathrm{ramp}}_{g}, \quad \forall g\in\mathcal{G},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S},\ t\ge 2 \tag{4.48}$$

電力貯蔵設備の運用：

$$s_{e,0}(s) = \rho^{\mathrm{ini}}_{e}\cdot s^{\mathrm{cap}}_{e}, \quad \forall e\in\mathcal{E},\ \forall s\in\mathcal{S} \tag{4.49}$$

$$s_{e,t}(s) = s_{e,t-1}(s) + \eta^{\mathrm{C}}_{e}\cdot p^{\mathrm{C}}_{e,t}(s) - p^{\mathrm{D}}_{e,t}(s)/\eta^{\mathrm{D}}_{e}, \quad \forall e\in\mathcal{E},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S} \tag{4.50}$$

$$\rho^{\min}_{e}\cdot s^{\mathrm{cap}}_{e} \le s_{e,t}(s) \le \rho^{\max}_{e}\cdot s^{\mathrm{cap}}_{e}, \quad \forall e\in\mathcal{E},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S} \tag{4.51}$$

$$p^{\mathrm{C}}_{e,t}(s) \le p^{\max}_{e}\cdot x^{\mathrm{C}}_{e,t}(s), \quad \forall e\in\mathcal{E},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S} \tag{4.52}$$

$$p^{\mathrm{D}}_{e,t}(s) \le p^{\max}_{e}\cdot x^{\mathrm{D}}_{e,t}(s), \quad \forall e\in\mathcal{E},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S} \tag{4.53}$$

$$\left|p^{\mathrm{C}}_{e,t}(s) - p^{\mathrm{C}}_{e,t-1}(s)\right| \le p^{\mathrm{ramp}}_{e}, \quad \forall e\in\mathcal{E},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S},\ t\ge 2 \tag{4.54}$$

$$\left|p^{\mathrm{D}}_{e,t}(s) - p^{\mathrm{D}}_{e,t-1}(s)\right| \le p^{\mathrm{ramp}}_{e}, \quad \forall e\in\mathcal{E},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S},\ t\ge 2 \tag{4.55}$$

分散型エネルギー資源の配置：

$$\sum_{g\in\mathcal{G}}\sum_{i\in\mathcal{N}} z^{\mathrm{G}}_{g,i} \le n^{\max}_{g}, \quad \sum_{e\in\mathcal{E}}\sum_{i\in\mathcal{N}} z^{\mathrm{E}}_{e,i} \le n^{\max}_{e} \tag{4.56}$$

$$x^{\mathrm{G}}_{g,t}(s) \le \sum_{i\in\mathcal{N}} z^{\mathrm{G}}_{g,i} \le 1, \quad \forall g\in\mathcal{G},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S} \tag{4.57}$$

$$x^{\mathrm{C}}_{e,t}(s) + x^{\mathrm{D}}_{e,t}(s) \le \sum_{i\in\mathcal{N}} z^{\mathrm{E}}_{e,i} \le 1, \quad \forall e\in\mathcal{E},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S} \tag{4.58}$$

負荷特性：

$$p^{\mathrm{L}}_{l,t}(s) = p^{\mathrm{pre}}_{l}\left(\sigma^{\mathrm{U}}_{l}\cdot x^{\mathrm{L}}_{l,t}(s) - \sum_{k=1}^{t}\Delta p_l(k)\cdot x^{\mathrm{L}}_{l,t-k+1}(s)\right), \quad \forall l\in\mathcal{L},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S} \tag{4.59}$$

初期条件：

$$x^{\mathrm{G}}_{g,t}(s) = 1, \quad \forall g\in\mathcal{G}^{*},\ \forall t\in\mathcal{T},\ \forall s\in\mathcal{S} \tag{4.60}$$

目的関数： シナリオ s の発生確率 π_s を用いて目的関数を次式のように定義する．シナリオ毎に計算される評価値 $\sum_{l\in\mathcal{L}}\sum_{t\in\mathcal{T}} w_l\cdot p^{\mathrm{L}}_{l,t}(s)$ にシナリオの発生確率 π_s を乗じて積算した目的関数である．

$$\text{maximize} \quad \sum_{s\in\mathcal{S}}\pi_s\sum_{l\in\mathcal{L}}\sum_{t\in\mathcal{T}} w_l\cdot p^{\mathrm{L}}_{l,t}(s) \tag{4.61}$$

4.4 数値実験

4.4.1 目的

提案する数理計画モデルを用いて分散型エネルギー資源の配置を最適化することにより，効率的な事故復旧が実現できることを確認する．また，分散型電源の故障確率に応じた適切な分散型エネルギー資源の配置が求まることを確認する．

4.4.2 テスト系統

実験に用いたテスト系統を単線図によって表したものを Fig. 4.2 に示す．米国電気電子学会（IEEE）の 13 母線系統 [87] を一部改変し，復旧操作の柔軟性を高めるために 2 本のブランチ（ノード 633-675 間およびノード 675-680 間）を追加した電力系統である．また，事故等により系統全体が完全に停電し，それに伴ってノード 652，および 2 本のブランチ（ノード 671-684 間およびノード 671-692 間）を早期に復旧できず，復旧操作に活用できない状況を想定する．なお，Fig. 4.2 に示した分散型エネルギー資源の配置（以降，参考配置と呼ぶ.）は文献 [63] で示されているものと同じ配置であり，提案モデルによる最適配置との比較対象として用いる．

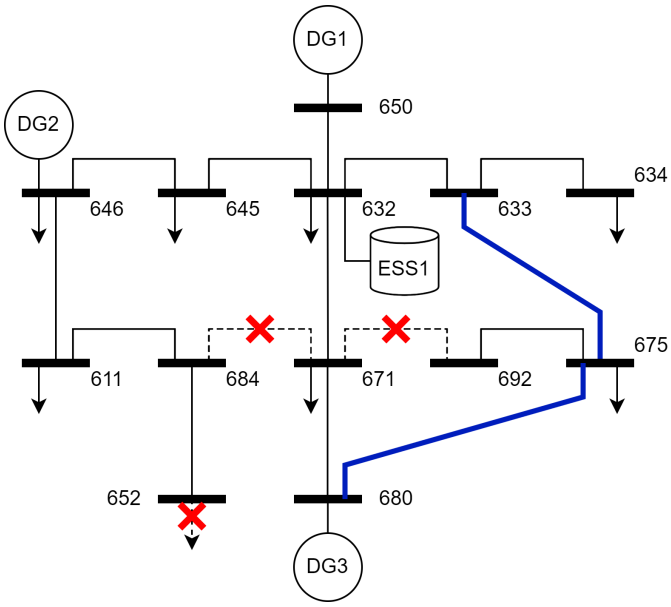


Fig. 4.2: IEEE の 13 母線系統 [87] を一部改変したテスト系統の単線図．復旧操作の柔軟性を高めるために 2 本のブランチ（青線）を追加している．赤色のバツ印は事故に伴って使用できない負荷やブランチを示している．分散型エネルギー資源の配置は文献 [63] で示されている配置と同じ．

負荷およびブランチの主な諸元をそれぞれ Table 4.1 および Table 4.2 に示す．表中の「状態」が「1」の負荷やブランチは遠隔操作によって切替可能であること,「0」の負荷やブランチは故障等の理由で切り替えできずに停電のままであることを意味している．ここで，本論文では，負荷需要挙動のシミュレーションに線形 CLPU モデルを採用している [63].

4.4.3 設定

3 種類の分散型電源（DG1，DG2，DG3）および 1 種類の電力貯蔵設備（ESS1）を系統内に最適配置する．分散型電源の主な諸元を Table 4.3 に示す．DG1 は他の 2 種類の分散型電源と比較して大規模な電源であることがわかる．また，DG1 は停電直後から発電できるブラックスタート機能を有する分散型電源とし，それ以外のブラックスタート機能を持たない DG2 と DG3 は接続するノードが通電していないと発電できない分散型電源とした．なお，本実験では DG1 の接続先をノード 650 に固定した．次に，電力貯蔵設備の主な諸元を Table 4.4 に示す．初期充電率 ρ_e^{ini} を充電率下限 ρ_e^{min} と同じ値に設定することで，電力貯蔵設備を復旧操作に活用する場合にはまず充電しなければならない状況を想定した．すべての実験において 1 回の切替操作に要する時間を 1 分に固定し，評価期間である復旧操作時間を 10 分に設定した（$t^{\max} = 10$）.

なお，すべての実験は 3.00GHz Intel Core i9-9980XE 搭載の PC 上で行った．メモリは 64GB，OS は Ubuntu 18.04 である．最適化計算には Gurobi Optimizer 9.5.0 [79] を用いた．

Table 4.1: 負荷の主な諸元．状態が「1」の負荷は遠隔操作によって復旧可能であること,「0」の負荷は切替不可で復旧できないことを示している．

接続ノード	632	634	645	646	671	692	675	611	652
停電前の負荷 p_l^{pre} (kW)	100	100	200	200	300	200	200	200	40
復旧直後の負荷倍率 σ_l^{U}	2.0	1.8	2.4	2.5	2.3	2.7	3.4	2.1	3.0
収束時の負荷倍率 σ_l^{D}	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.3	1.3	1.1
停滞時間 D_l（分）	2.2	2.3	1.1	3.6	2.7	1.2	2.7	2.1	2.0
CLPU 曲線の減衰率 α_l	0.7	0.8	1.0	0.7	1.3	0.6	0.7	0.6	0.9
状態	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Table 4.2: ブランチの主な諸元．始点ノードから終点ノードへの方向を順方向とし，逆方向の潮流は負値として扱う．状態が「1」のブランチは遠隔操作によって切替可能であること,「0」のブランチは切り替えできないことを示している．

番号	始点ノード	終点ノード	容量 $P_b^{\max}$ (kVA)	状態
1	650	632	1,500	1
2	632	633	1,000	1
3	633	634	500	1
4	632	645	1,000	1
5	645	646	800	1
6	632	671	1,500	1
7	671	692	800	0
8	692	675	800	1
9	671	684	800	0
10	684	611	800	1
11	684	652	800	1
12	671	680	1,500	1
13	633	675	1,000	1
14	646	611	800	1
15	675	680	1,000	1

4.4.4 結果

分散型電源の故障を考慮しないケース

分散型電源 DG2 が故障しないケース（故障なしケース）における分散型エネルギー資源の最適配置および各時間ステップでの運転状況を Table 4.5 に示す．分散型エネルギー資源の配置箇所は，分散型電源 DG3 がノード 633 に配置されていることを除けば Fig. 4.2 に示した配置（参考配置）と同じである．比較のために，参考配置における各時間ステップでの分散型エネルギー資源の運転状況を Table 4.6 に示す．また，最適配置および参考配置の復旧負荷量の推移を比較した結果を Fig. 4.3 に示す．参考配置では，特に時間ステップ 4 および 5 で復旧負荷量が相対的に小さくなっているが，以下のことが主な理由として考えられる．

1. 分散型電源 DG3 が DG1 から離れたノードに配置されているため，DG3 への通電に

Table 4.3: 分散型電源の主な諸元

主な諸元	DG1	DG2	DG3
最大出力 $p_g^{\max}$ (kW)	12,000	800	1,000
最低出力 $p_g^{\min}$ (kW)	0	50	100
出力変化速度 p_g^{ramp} (kW/分)	1,000	200	300
ブラックスタート機能	有り	無し	無し

Table 4.4: 電力貯蔵設備の主な諸元

主な諸元	ESS1
最大出力 $p_e^{\max}$ (kW)	5,000
充放電速度 p_e^{ramp} (kW/分)	250
最大電力貯蔵量 s_e^{cap} (kWh)	200
初期充電率 ρ_e^{ini}	10%
充電率下限 $\rho_e^{\min}$	10%
充電率上限 $\rho_e^{\max}$	90%
充電効率 η_e^{C}	90%
放電効率 η_e^{D}	90%

時間がかかり供給力が不足している．

2. ノード 650-632 間のブランチ容量が 1500 kVA に制限されているため，分散型電源 DG1 の出力も上げることができない．

3. 出力変化速度の制限により，分散型電源 DG2 の出力も急に上げることができない．

一方，最適配置ではブラックスタート機能を有する分散型電源 DG1 に近いノードに DG3 を配置し，復旧操作過程の早い段階に停電負荷の復旧と電力貯蔵設備 ESS1 の充電を実施していることが確認できる．

分散型電源の確率的な故障を考慮したケース

分散型電源 DG2 の偶発的な故障発生（故障確率 w）により次の 2 種類のシナリオが確率的に生じる状況を想定した．

- シナリオ 1：DG2 を復旧操作に活用できる．（シナリオ発生確率 $\pi_1 = 1 - w$）
- シナリオ 2：DG2 を復旧操作に活用できない．（シナリオ発生確率 $\pi_2 = w$）

DG2 の故障確率 w を 10%刻みで段階的に変化させた場合の評価値を Table 4.7 に示す．表中の「シナリオ 1」「シナリオ 2」の列は，提案モデルによって求まった分散型エネルギー資源の配置において各シナリオが発生した場合の評価値を示している．Table 4.7 より，分散型電源 DG2 の故障確率 w が高くなるにつれてシナリオ 2 の評価値が高くなる一方でシナリオ 1 の評価値は低くなることから，結果としてシナリオ発生確率を考慮した全体の評価値は徐々に低くなることが確認できる．シナリオ 2 は，分散型電源 DG2 の故障により復旧操

Table 4.5: 最適配置における分散型電源および電力貯蔵設備の運転状況（故障なしケース）

配置ノード	DG1 650	DG2 646	DG3 633	ESS1 632	合計 (kW 分)
ステップ 1	0	0	0	0	0
2	450	0	0	−250	200
3	1,320	0	300	−250	1,370
4	1,500	200	600	241	2,541
5	1,500	400	682	164	2,746
6	1,226	200	982	0	2,408
7	1,500	250	802	0	2,552
8	1,500	50	609	0	2,159
9	1,500	50	385	0	1,935
10	1,500	50	268	0	1,818
期間合計					17,729

Table 4.6: 参考配置における分散型電源および電力貯蔵設備の運転状況（故障なしケース）

配置ノード	DG1 650	DG2 646	DG3 680	ESS1 632	合計 (kW 分)
ステップ 1	0	0	0	0	0
2	450	0	0	−250	200
3	1,450	0	0	−80	1,370
4	1,500	200	0	−19	1,681
5	1,500	400	300	226	2,426
6	1,500	600	600	48	2,748
7	1,500	800	322	9	2,631
8	1,500	730	100	0	2,330
9	1,388	530	100	0	2,018
10	1,424	330	100	0	1,854
期間合計					17,258

作に活用できる分散型エネルギー資源が相対的に少ない状況であり，そのような状況が発生する確率が高くなることで全体の評価値が徐々に低くなっている．

Table 4.7 に示した結果から，提案モデルによる最適配置は，分散型電源 DG2 の故障確率が (a) 10%以下，(b) 20%から 50%，(c) 60%以上，の 3 種類に大別できることがわかる．それぞれの最適配置を Fig. 4.4 〜4.6に示す．DG2 の故障確率が 10%の時の最適配置は，Table 4.5 に示した最適配置と分散型電源 DG3 と電力貯蔵設備 ESS1 の位置が入れ替わっているだけで，DG2 の故障を想定しないシナリオ 1 の評価値も 17,729 で同じである．しかし，Table 4.5 に示した最適配置は，DG2 が故障した際にノード 633 に配置した分散型電源 DG3 の発電が遅れるためシナリオ 2 の評価値が 16,413 と低くなり，不確実性を考慮した場合には最適配置とはならないことがわかる．つまり，不確実性を考慮しない場合は同じ評価値となる 2 種類の最適配置も，不確実性を考慮することで総合的な評価値に差が生じることが確認できる．他方，DG2 の故障確率が 90%と高い場合には，必要に応じて DG2 の代わりに放

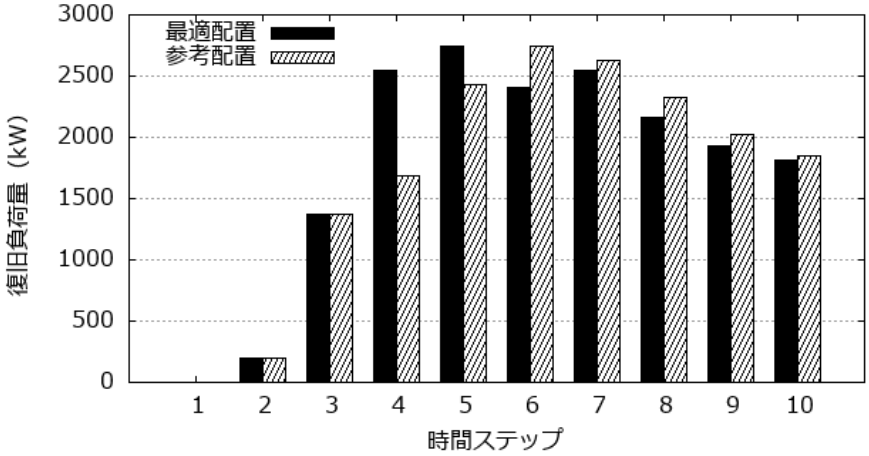


Fig. 4.3: 最適配置および比較配置の復旧負荷量の比較結果（故障なしケース）

Table 4.7: DG2 の各故障確率における評価値

DG2 の故障確率	シナリオ 1（故障なし）	シナリオ 2（故障あり）	評価値 (kW 分)	比率*
0%	17,729	0	17,729	1.00
10%	17,729	16,742	17,630	0.99
20%	17,717	16,808	17,535	0.99
30%	17,717	16,808	17,444	0.98
40%	17,717	16,808	17,353	0.98
50%	17,717	16,808	17,263	0.97
60%	17,483	16,985	17,184	0.97
70%	17,483	16,985	17,134	0.97
80%	17,483	16,985	17,085	0.96
90%	17,483	16,985	17,035	0.96
100%	0	16,985	16,985	0.96

*故障なしケースでの最適値（17,729）に対する評価値の比率

電することが可能なように電力貯蔵設備 ESS1 を DG2 と同じノード 646 に配置することが最適配置となる．

Table 4.8 は，DG2 の故障確率が 10%および 90%の場合における，各時間ステップで停電が解消された負荷を時系列的に示したものである．DG2 の故障確率が低い場合はシナリオ 1 での復旧操作が重視されるため，仮にシナリオ 2 が発生した場合には，DG2 の配置箇所に近い負荷（ノード 611）の復旧が大幅に遅れることがわかる．一方，DG2 の故障確率が高い場合は，シナリオ 2 ではノード 634 に接続する小さい負荷（停電前負荷 100 kW）の復旧を後回しにするが，電力貯蔵設備 ESS1 を DG2 と同じノードに配置することで故障発生の影響を軽減している．

最後に，DG2 の故障確率を変化させた際の計算時間を Fig. 4.7 に示す．すべてのケースにおいて 100 秒以内に最適配置が得られていることが確認できる．また，DG2 の故障確率が高くなるにしたがって計算時間が短くなる傾向が確認できるが，これはシナリオ 1 よりも

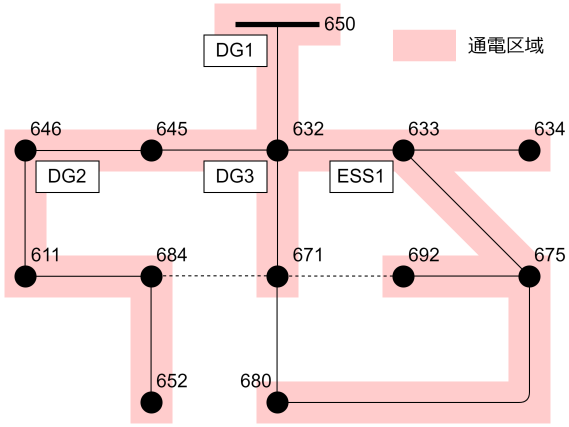


Fig. 4.4: DG2 の故障確率が 10%の時の最適配置および通電区域

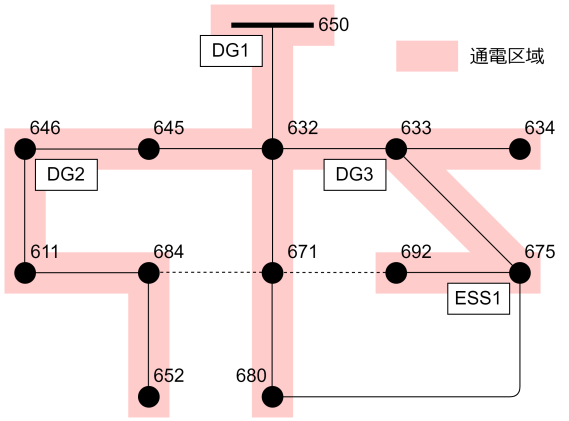


Fig. 4.5: DG2 の故障確率が 50%の時の最適配置および通電区域

シナリオ 2 の方が分散型エネルギー資源が少なく，最適化計算が相対的に容易になったことが要因と考える．

4.5 考察

4.5.1 上位ランクの配置

提案モデルにより得られた上位 10 位までの分散型エネルギー資源の配置結果と評価値を Table 4.9 に示す．評価値の高い配置では，ノード 632 に加えて，ノード 645 や 646 などの系統の左側とノード 675 や 692 などの系統の右側にバランス良く分散型エネルギー資源を配置していることが確認できる．また，複数の分散型電源を配置する場合，各電源の性能を考慮して適切な位置に配置することが重要である．例えば，第 4 位の 2 種類の配置は DG2 と DG3 の配置が入れ替わっているだけであるが，この配置は同じ評価値を示していることから，分散型電源の性能の違いが復旧操作手順に影響していないことがわかる．一方，Table 4.5 に示した最適配置の分散型電源 DG2 と DG3 の配置ノードを入れ替えた場合，DG3 よりも DG2

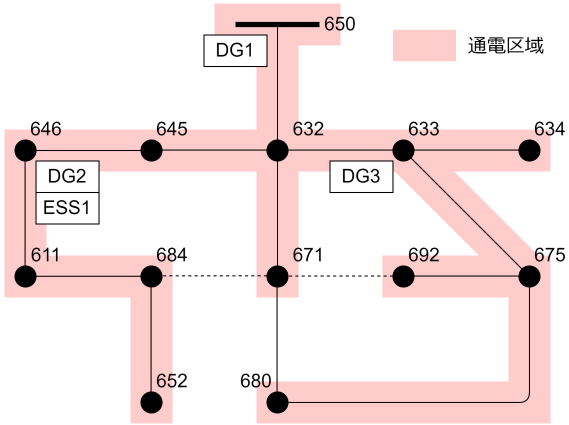


Fig. 4.6: DG2 の故障確率が 90%の時の最適配置および通電区域

Table 4.8: 故障ケースにおける復旧操作手順の比較

ステップ	DG2 の故障確率 10% シナリオ 1	DG2 の故障確率 10% シナリオ 2	DG2 の故障確率 90% シナリオ 1	DG2 の故障確率 90% シナリオ 2
1				
2	632	632	632	632
3	645, 671	645, 671	645, 671	645, 671
4	634, 646, 675	646, 675	634, 675	675
5	611	634	646, 611	611
6				634, 646
7	692	692	692	692
8		611		
9				
10				

の出力変化速度が相対的に低いために復旧負荷量が少なくなり，結果として上位 10 位よりも評価値が小さくなる．提案モデルを用いることで，性能の異なる複数の分散型エネルギー資源の候補から最適な分散型電源や電力貯蔵設備を選択し配置できる．

4.5.2 数値実験の設定条件

本論文では，提案モデルの妥当性や有用性を確認することを目的に，分散型電源 DG2 の故障確率を 0% から 100% まで変化させるなど極端な条件設定で数値実験を行った．分散型電源に対し非常に高い故障確率を設定するなど非現実的な想定ではあるが，故障確率の違いによって分散型エネルギー資源の最適配置や復旧操作手順が変化する結果が得られるなど，提案モデルの基本的な挙動は確認できたと考える．特に，不確実性を考慮しないケースと故障確率 10% を設定したケースとで分散型電源 DG3 と電力貯蔵設備 ESS1 の配置が入れ替わるなど，機器故障などの不確実性の考慮が設備配置へ影響する様子を確認することができた点は興味深い．現実的な条件設定において分散型エネルギー資源の配置が大きく変化するか否かは，対象とする電力系統の構成や配置する分散型エネルギー資源の数や性能，目的関数

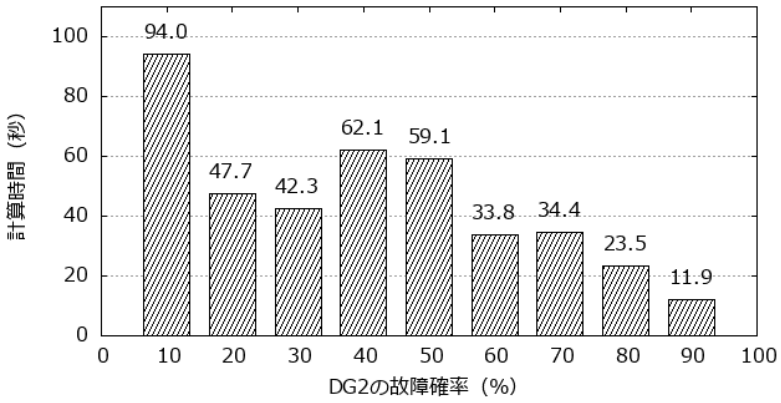


Fig. 4.7: 計算時間（秒）

Table 4.9: 評価値の高い上位 10 位までの分散型エネルギー資源の配置結果

順位	評価値	DG1	DG2	DG3	ESS1
1	17,729	650	646	633	632
	17,729	650	646	632	633
3	17,717	650	646	633	675
4	17,684	650	675	646	632
	17,684	650	646	675	632
6	17,682	650	675	632	646
7	17,664	650	632	675	646
	17,664	650	675	645	646
9	17,621	650	646	632	675
	17,621	650	632	646	692

やシナリオの設定などによって大きく依存するが，不確実性を考慮したうえで事故時の復旧操作や分散型エネルギー資源の最適配置を定量的に分析できるモデルを提案したことの意義は大きいと考える．今後はより現実的な条件設定の下での分析・検討を進める予定である。

4.6 おわりに

本章では，設備故障などの不確実性を考慮した分散型エネルギー資源の最適配置を求めるための数理計画モデルを提案した．不確実性を複数のシナリオとその発生確率で表現し，分散型エネルギー資源の運用制約などの制約条件の下で評価期間全体の復旧電力量を最大化する，分散型エネルギー資源の配置を求めるモデルである．IEEE の 13 母線からなるテスト系統を用いた数値実験により，分散型エネルギー資源の最適配置により効率的な復旧操作が実現できることを確認した．また，分散型電源の故障確率に応じた適切な分散型エネルギー資源の配置が求められることを確認した．

今後の課題としては，不確実性のより複雑なシナリオ表現方法に関する検討があげられる．気象条件などによって様相が大きく異る自然変動電源の出力変動や複数の分散型エネルギー資源の同時故障など，考慮すべき不確実性をより複雑なシナリオで表現する必要があ

る．また，不確実要因の増加によって不確実性をシナリオ表現すること自体が難しくなる状況も想定される．不確実性の表現方法は分散型エネルギー資源の配置にも大きく影響することから，適切なシナリオ表現方法について検討することは非常に重要である．また，より現実的な条件設定を考慮できるモデルへの改良があげられる．電力系統は非常に多くの条件を総合的に勘案して運用しており，また送電線によっては事故復旧時の系統切替に要する操作時間が異なる場合がある．現実的な事故復旧を検討するためには有効電力以外の要素に関する制約条件も考慮したモデルを構築する必要がある．

第5章　結論

5.1　研究成果のとりまとめ

本論文では，安定的な電力供給の維持向上に向け，停電発生に対する事前および事後対策として設備配置の観点から定量的な検討が行える数理計画モデルを提案した．本論文の成果は大きく以下の2種類にまとめられる．

1. 電力系統への不正データ注入攻撃に対するロバストなメータ配置を効率的に求めるための数理計画モデルを提案し，その評価を行った．
2. 不確実環境下において迅速かつロバストな事故復旧に向けた分散型エネルギー資源の最適配置を求めるための数理計画モデルを提案し，その評価を行った．

以下で，それぞれの成果についてまとめる．

不正データ注入攻撃に対するロバストなメータ配置

系統状態を正しく把握するために，限られた観測データをもとに系統全体の状態を把握する状態推定が行われる．また，不良データの混入は系統制御に甚大な影響を及ぼすことから，これまでに数多くの不良データ検出法が提案されている．これらの検出手法を用いることでサイバー攻撃による不正データの意図的な混入も検出できると考えられていたが，従来の推定残差に基づく手法では検出できない不正データ注入攻撃による危険性が指摘され注目を集めている．不正データ注入攻撃の検知に関しては，利用可能なメータのみで系統の可観測性が維持できればよいことが知られており，既に数理計画モデルを用いた厳密解法が提案されている．しかし，このモデルでは既設の必須メータのみを攻撃の対象としており，新たに配置する追加メータを含めた同時故障までは考慮していない．また，非線形の制約式を含んでいるため，問題の規模が大きくなった際の効率性についても課題がある．

これらの問題を解決するために，3箇所のメータへの同時攻撃までを対象に，必須メータに加えて追加メータへの同時攻撃も考慮したロバストなメータ配置を求めるための数理計画モデルを提案した．まず，従来モデルにおける非線形制約を線形化した効率的なモデルを提案し，その後，必須メータのみを攻撃の対象としたモデルでは対応できない攻撃についても考慮できるようにモデルの拡張を行った．さらに，冗長な制約式を排除して係数行列をコンパクト化することで，最適なメータ配置を効率的に求める方法についても提案した．問題規模の異なる複数のテスト系統を用いた数値実験により，従来モデルでは考慮していなかった追加メータへの同時攻撃にも対応できる適切なメータ配置が得られることを確認した．2

箇所のメータへの同時攻撃については 300 母線系統でも 1 分以内に最適配置が求まること，3 箇所のメータへの同時攻撃については計算時間 1 時間の制限における適用限界が 57 母線系統までであることを確認した．また，提案手法を用いて係数行列をコンパクト化することで，必要メモリ量を大幅に削減できるだけでなく計算時間も短縮できることを確認した．

事故復旧のための分散型エネルギー資源の最適配置

停電は予測できない事故や自然災害，意図的なサイバー攻撃などが原因で発生することから，停電の発生を完全に防止することは極めて難しい．電力系統は最も重要な社会インフラの一つであり，事故等による停電負荷をできるだけ早く復旧することが重要な課題となる．これまでに事故時復旧操作の最適化について数多くの手法が提案されているが，その多くは復旧操作全体の最適化という観点では不十分である．また，普及拡大が進んでいる分散型電源や電力貯蔵設備などの分散型エネルギー資源を系統内に適切に配置し，事故時の復旧操作に積極的に活用する研究はほとんど行われていない．さらに，一部の分散型エネルギー資源を復旧操作に活用できない場合，停電負荷の迅速な復旧に大きな影響を及ぼす可能性があるため，偶発的な設備故障や再生可能エネルギー電源の出力変動などの不確実性を考慮することも重要である．復旧操作全体の最適化，分散型エネルギー資源の適切な配置と活用，そして不確実性の考慮はいずれも重要な検討項目であり，個々の研究は進んでいるものの，これらすべてを同時に考慮した最適化モデルはこれまで提案されていない．

この問題を解決するために，復旧操作時の設備故障などの不確実性を考慮した分散型エネルギー資源の最適配置を求めるための数理計画モデルを提案した．提案モデルは，不確実性を複数のシナリオとその発生確率で表現し，分散型エネルギー資源の運用制約などの制約条件の下で評価期間全体の復旧電力量を最大化する，分散型エネルギー資源の配置を求めるモデルである．13 母線からなる小規模のテスト系統を用いた数値実験により，分散型エネルギー資源の最適配置により効率的な復旧操作が実現できることを確認した．また，分散型電源の故障確率に応じた適切な分散型エネルギー資源の配置が求められることを確認した．

5.2 今後の課題

本論文の成果に対して，今後の課題と展望を以下に述べる．

5.2.1 不正データ注入攻撃に対するロバストなメータ配置

既設メータの再配置を含めたメータ配置　本論文では，系統の可観測性を確保するために必要なメータ集合である必須メータの配置をあらかじめ与えたうえで，不正データ注入攻撃に対応できるよう追加メータの配置を求めている．しかし，第 3.4 節に示した数値実験の結果からもわかるように，必要となる追加メータ数は必須メータの配置によって変化することから，必須メータ（既設メータ）の再配置も含めて可観測性の維持を検討することで，系統全体で必要となるメータ数を削減できる可能性がある．

同時攻撃への対応力強化　本論文では，3 箇所のメータへの同時攻撃までを対象にした数理計画モデルを構築する際に，攻撃対象となる必須メータの個数によって場合分けを行い，それぞれに対し必要な制約式を導出している．例えば，必須メータが 2 箇所攻撃される場合には，可観測性を維持するために必要な追加メータの組み合わせをグラフ表現したうえで，誘導部分グラフの構造から制約式を導出している．今後，4 箇所以上のメータへの同時攻撃への対応を検討する場合に，同様の方針で個別に制約式を導出するのは限界があると考える．一方で，系統の脆弱性自体は既存手法 [16] などを用いて高速に評価できることから，評価と再配置を反復する接近法などは同時攻撃への対応力を強化するうえで有望と考える．

実規模系統での適用に向けた計算効率化　数理計画モデルによるメータ配置の検討は，厳密な意味で最適な配置が求まるといった利点がある一方で，第 3.4 節での数値実験の結果から提案モデルの適用は 57 母線系統までが限界（$k = 3$ の場合）であることなど，計算時間の面で大規模な系統への適用が難しいという課題が残る．しかし，最適化計算の早い段階で最適解自体は発見できていることが数値実験の結果から確認できているので，得られた解の最適性を保証するための計算を効率化することで，より規模の大きい系統におけるロバストなメータ配置を求められるようになると考えられる．

他の最適化手法の適用　系統の可観測性を維持するのに必要なメータ数の目安を知りたい場合など，必ずしも厳密にメータ数を最小化する必要がない場合は，数理計画モデルとは異なる接近法によって近似解が求まれば十分である．数理計画モデルとは異なる接近法として，発見的手法やメタヒューリスティクスなどの最適化手法を用いることで実用的な計算時間で精度の高いメータ配置を求められる可能性がある．また，精度の高い近似解を効率的に求めることが可能な場合，その近似解を用いることで提案モデルによる解探索をさらに効率化できることも期待できる．

5.2.2　事故復旧のための分散型エネルギー資源の最適配置

不確実性のより複雑なシナリオ表現への拡張　事故時復旧操作における不確実性として，本論文で考慮した分散型電源などの偶発的な設備故障の他に，再生可能エネルギー電源，特に太陽光発電や風力発電などの自然変動電源の出力変動などが想定される．太陽光発電の出力は日射などの気象条件とも密接に関係することから，事故復旧を想定する時間帯によって不確実性の扱いが大きく異なると考えられる．また，分散型電源や電力貯蔵設備の同時故障などを想定すると，考慮すべき不確実性をより複雑なシナリオで表現する必要がある．さらに，不確実要因の増加によってシナリオ数が膨大になり，不確実性をシナリオ表現すること自体が難しくなる状況も想定される．不確実性の表現方法は分散型エネルギー資源の配置にも大きく影響する可能性があることから，適切なシナリオ表現方法について検討することは非常に重要である．

設置コストを考慮した最適配置　分散型エネルギー資源を新たに設置する場合や既設の分散型エネルギー資源を再配置する場合には，一般的に設備の設置や移設にかかるコストが発生する．本論文で提案した数理計画モデルでは配置可能な分散型エネルギー資源の台数を制限しているが，設置コストを考慮していないため，結果として上限いっぱいまで配置することが最適な配置となる．系統内での配置箇所を最適化するという目的では提案モデルで十分だが，分散型エネルギー資源を数多く配置することで復旧操作が効率化されるメリットと，設置コストが増大することのデメリットのトレードオフの関係を考慮することで，配置箇所だけでなく台数を含めた適切な最適配置が求まることが期待できる．

現実的な条件設定の考慮　電力系統は有効電力以外にも無効電力，電圧，周波数など非常に多くの条件を総合的に勘案して運用する必要がある．また，送電線によっては系統切替に要する操作時間が異なる場合がある．本論文では，提案する数理計画モデルの基本的な特性を確認する目的で有効電力のみを制約の対象にしたが，より現実的な事故復旧を検討するためには有効電力以外の要素に関する制約条件も考慮したモデルを構築する必要がある．

問題規模の大きい系統への適用性向上　広範囲で運用されている電力系統は数多くの流通設備を含んでおり，系統内のどこで事故が発生するかを予見することは極めて難しい．また，重大事故が発生した場合には停電が広範囲に及ぶ可能性もある．不確実性を考慮した事故復旧の問題は，母線数や送電線数などの設備数に加え，復旧操作に必要な時間断面や不確実性を考慮する際のシナリオ数の増加によって問題規模が途端に大きくなる傾向がある．マイクログリッドなど地域的に限定された系統を対象にした検討が進められている一方で，迅速な事故復旧を実現するうえで効果的な分散型エネルギー資源の配置を検討するには，地域的な広がりをもった規模の大きい系統にも適用可能なモデルとすることも重要である．例えば，事故復旧は故障箇所周辺の局所的な操作が中心となることから，系統を適切に分割・最適化し，その結果を勘案して全体最適を図るなどの接近法も有効と考える．

謝辞

本研究を行うにあたり，終始多大なるご指導をいただきました小野功教授に心より感謝の意を表します．また，本論文に関して貴重なご助言をいただきました山村雅幸教授，三宅美博教授，石井秀明教授，青西亨准教授に厚く御礼申し上げます．さらに，本研究を進めるうえで様々な形でご支援，ご協力いただいた寺野隆雄名誉教授，小野田崇連携教授（現青山学院大学教授），および小野研究室の皆様，そして学位取得に関して多大なる理解と支援をいただいた一般財団法人電力中央研究所の皆様に深く感謝いたします．

最後に，日頃から温かく見守ってくれた家族，そして長い期間にわたって辛抱強く支え励ましてくれた妻と娘に心から感謝します．

公表論文

〈学術論文〉

- 渡邊 勇, 小野 功, “電力系統状態推定における不正データ注入攻撃に対するロバストなメータ配置”, 電気学会論文誌 C, Vol.136, No.3, pp.390–400, 2016.

〈国際会議〉

- Isamu Watanabe, Kazuyuki Masutomi, and Isao Ono, “Robust Meter Placement against False Data Injection Attacks on Power System State Estimation,” In *Proceedings of the 20th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP 2013)*, pp. 569–576, Daegu, Korea, November 3–7, 2013.
- Isamu Watanabe and Isao Ono, “Optimal DG and ESS Placement for Effective Service Restoration under Uncertainty,” In *Proceedings of IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2022)*, Melbourne, Australia, November 20–23, 2022.

参考文献

[1] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, and G. B. Sheblé. *Power Generation, Operation, and Control.* John Wiley & Sons, 3rd edition, 2013.

[2] 電力系統の利用を支える解析・運用技術調査専門委員会. 電力系統の利用を支える解析・運用技術. 電気学会技術報告第 1100 号, 2007.

[3] A. Monticelli. *State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach.* Kluwer Academic Publishers, 1999.

[4] Ali Abur and Antonio Gómez Expósito. *Power System State Estimation: Theory and Implementation.* CRC Press, 2004.

[5] Yao Liu, Peng Ning, and Michael K. Reiter. False data injection attacks against state estimation in electric power grids. In *Proc. 16th ACM Conf. on Computer and Communications Security*, pp. 21–32, November 2009.

[6] Dai Wang, Xiaohong Guan, Ting Liu, Yun Gu, Yanan Sun, and Yang Liu. A survey on bad data injection attack in smart grid. In *2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pp. 1–6, 2013.

[7] Xuan Liu and Zuyi Li. False data attack models, impact analyses and defense strategies in the electricity grid. *The Electricity Journal*, Vol. 30, No. 4, pp. 35–42, 2017.

[8] Gaoqi Liang, Junhua Zhao, Fengji Luo, Steven R. Weller, and Zhao Yang Dong. A review of false data injection attacks against modern power systems. *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 8, No. 4, pp. 1630–1638, 2017.

[9] Ruilong Deng, Gaoxi Xiao, Rongxing Lu, Hao Liang, and Athanasios V. Vasilakos. False data injection on state estimation in power systems—attacks, impacts, and defense: A survey. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, Vol. 13, No. 2, pp. 411–423, 2017.

[10] Souhila Aoufi, Abdelouahid Derhab, and Mohamed Guerroumi. Survey of false data injection in smart power grid: Attacks, countermeasures and challenges. *Journal of Information Security and Applications*, Vol. 54, p. 102518, 2020.

[11] Haftu Tasew Reda, Adnan Anwar, and Abdun Mahmood. Comprehensive survey and taxonomies of false data injection attacks in smart grids: attack models, targets, and impacts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 163, p. 112423, 2022.

[12] H. Sandberg, A. Teixeira, and K. H. Johansson. On security indices for state estimators in power networks. In *Proc. First Workshop Secure Control Systems*, 2010.

[13] O. Kosut, L. Jia, R. J Thomas, and L. Tong. Malicious data attacks on the smart grid. *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 2, No. 4, pp. 645–658, 2011.

[14] K. C. Sou, H. Sandberg, and K. H. Johansson. Computing critical k-tuples in power networks. *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 27, No. 3, pp. 1511–1520, 2012.

[15] J. M. Hendrickx, K. H. Johansson, R. M. Jungers, H. Sandberg, and K. C. Sou. Efficient computations of a security index for false data attacks in power networks. *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 59, No. 12, pp. 3194–3208, 2014.

[16] Y. Yamaguchi, A. Ogawa, A. Takeda, and S. Iwata. Cyber security analysis of power networks by hypergraph cut algorithms. In *Proc. 2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 2014.

[17] Rakesh B. Bobba, Katherine M. Rogers, Qiyan Wang, Himanshu Khurana, Klara Nahrstedt, and Thomas J. Overbye. Detecting false data injection attacks on dc state estimation. In *Proc. First Workshop on Secure Control Systems*, April 2010.

[18] O. Kosut, L. Jia, R. J. Thomas, and L. Tong. Limiting false data attacks on power system state estimation. In *Proc. IEEE Conference on Information Sciences and Systems*, 2010.

[19] G. Dan and H. Sandberg. Stealth attacks and protection schemes for state estimators in power systems. In *First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 2010.

[20] T. T. Kim and H. V. Poor. Strategic protection against data injection attacks on power grids. *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 2, No. 2, pp. 326–333, 2011.

[21] S. Bi and Y. J. Zhang. Graphical methods for defense against false-data injection attacks on power system state estimation. *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 5, No. 3, pp. 1216–1227, 2014.

[22] S. Bi and Y. J. Zhang. Using covert topological information for defense against malicious attacks on dc state estimation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 32, No. 7, pp. 1471–1485, 2014.

[23] 長谷川淳, 西谷健一. 電力系統状態推定におけるデータ欠損を考慮した最適観測器配置. 電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）, Vol. 106, No. 7, pp. 603–610, 1986.

[24] 柴田保, 斎藤浩海, 豊田淳一. $(N-1)$ 可観測性規準に基づく観測器増設箇所の決定法. 電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）, Vol. 113, No. 12, pp. 1338–1344, 1993.

[25] Ali Abur and Fernando H. Magnago. Optimal meter placement for maintaining observability during single branch outages. *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 14, No. 4, pp. 1273–1278, 1999.

[26] Fernando H. Magnago and Ali Abur. A unified approach to robust meter placement against loss of measurements and branch outages. *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 15, No. 3, pp. 945–949, 2000.

[27] Qifeng Ding and Ali Abur. An improved measurement placement method against loss of multiple measurements and branches. In *Proc. 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol. 1, pp. 234–237, 2002.

[28] Enrique Castillo, Antonio J. Conejo, Rosa E. Pruneda, Cristina Solares, and José M. Menéderz. $m-k$ robust observability in state estimation. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, pp. 296–305, May 2008.

[29] C.-C. Liu, S.J. Lee, and S.S. Venkata. An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, No. 2, pp. 619–626, 1988.

[30] H.-J. Lee and Y.-M. Park. A restoration aid expert system for distribution substation. *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 11, No. 4, pp. 1765–1770, 1996.

[31] Yuan-Yih Hsu and Han-Ching Kuo. A heuristic based fuzzy reasoning approach for distribution system service restoration. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 9, No. 2, pp. 948–953, April 1994.

[32] Whei-Min Lin and Hong-Chan Chin. Preventive and corrective switching for feeder contingencies in distribution systems with fuzzy set algorithm. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 12, No. 4, pp. 1711–1716, October 1997.

[33] Qin Zhou, Dariush Shirmohammadi, and Wen-Hsiung Edwin Liu. Distribution feeder reconfiguration for service restoration and load balancing. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 2, pp. 724–729, May 1997.

[34] 永田武, 佐々木博司, 北川稔. 線形計画法の適用による電力系統の復旧目標系統の決定. 電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）, Vol. 113, No. 5, pp. 509–515, 1993.

[35] 永田武, 佐々木博司, 北川稔. 混合整数計画法の適用による復旧目標系統の決定. 電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）, Vol. 114, No. 2, pp. 179–185, 1994.

[36] 永田武, 金釣, 畠山秀一, 佐々木博司. 復旧戦略を導入した配電系統事故復旧の数理計画的方式. 電気学会論文誌 C（電子・情報・システム部門誌）, Vol. 120, No. 2, pp. 229–235, 2000.

[37] A. L. Morelato and A. J. Monticelli. Heuristic search approach to distribution system restoration. *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 4, No. 4, pp. 2235–2241, 1989.

[38] 中村静香. 最小木ならびに過負荷情報に基づく探索機構を用いた電力系統復旧における最終復旧系統立案方式. 電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）, Vol. 111, No. 5, pp. 543–551, 1991.

[39] Dariush Shirmohammadi. Service restoration in distribution networks via network reconfiguration. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 7, No. 2, pp. 952–958, April 1992.

[40] Hsiao-Dong Chiang and René Jean-Jumeau. Optimal network reconfigurations in distribution systems: Part 1: A new formulation and a solution methodology. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 5, No. 4, pp. 1902–1909, November 1990.

[41] Hsiao-Dong Chiang and René Jean-Jumeau. Optimal network reconfigurations in distribution systems: Part 2: Solution algorithms and numerical results. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 5, No. 3, pp. 1568–1574, July 1990.

[42] Young-Jae Jeon, Jae-Chul Kim, Jin-O. Kim, Joong-Rin Shin, and Kwang Y. Lee. An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large-scale distribution systems. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 17, No. 4, pp. 1070–1078, October 2002.

[43] Sakae Toune, Hiroyuki Fudo, Takamu Genji, Yoshikazu Fukuyama, and Yosuke Nakanishi. A reactive tabu search for service restoration in electric power distribution systems. In *Procs. of the 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 763–768, Anchorage, AK, May 1998.

[44] Takamu Genji, Toshiya Oomori, Kenji Miyazato, Naoki Hayashi, and Yoshikazu Fukuyama. Service restoration in distribution systems aiming higher utilization rate of feeders. In *The Fifth Metaheuristcis International Conference (MIC2003)*, Kyoto, Japan, August 2003.

[45] 古田篤広, 森啓之. 配電系統復旧制御への並列タブサーチを用いた階層的最適化手法の適用. 電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）, Vol. 126, No. 1, pp. 21–28, 2006.

[46] Yoshikazu Fukuyama and Hsiao-Dong Chiang. A parallel genetic algorithm for service restoration in electric power distribution systems. In *Procs. of the 1995 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vol. 1, pp. 275–282, Yokohama, Japan, March 1995.

[47] Sudhakar Chavali, Anil Pahwa, and Sanjoy Das. A genetic algorithm approach for optimal distribution feeder restoration during cold load pickup. In *Procs. of the 2002 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1816–1819, Honolulu, HI, May 2002.

[48] W. P. Luan, Malcolm R. Irving, and Jeremy S. Daniel. Genetic algorithm for supply restoration and optimal load shedding in power system distribution networks. *Procs. of IEE Generation Transmission and Distribution*, Vol. 149, No. 2, pp. 145–151, 2002.

[49] 稲垣潤, 中島純, 長谷山美紀, 北島秀夫. 配電系統事故復旧問題の遺伝的アルゴリズムを用いた多目的最適化に基づく解法. 電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）, Vol. 124, No. 3, pp. 404–412, 2004.

[50] 岩崎敬亮, 青木秀憲. 改良型 GA を用いた配電系統事故復旧問題. 電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）, Vol. 127, No. 7, pp. 809–816, 2007.

[51] 道端郁夫, 青木秀憲. 配電系統事故復旧問題への改良型遺伝的アルゴリズムの適用. 電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）, Vol. 129, No. 1, pp. 32–39, 2009.

[52] 加藤能史, 濱上知樹. 配電系統事故復旧の困難さに応じて解空間を選択的にサンプリングする遺伝的アルゴリズム. 電気学会論文誌 C（電子・情報・システム部門誌）, Vol. 131, No. 5, pp. 1031–1037, 2011.

[53] 永田武, 渡部英宜, 大野益見, 井場延彦. 電力系統事故復旧問題へのマルチエージェント技術の適用. 電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）, Vol. 121, No. 2, pp. 179–185, 2001.

[54] T. Nagata and H. Sasaki. A multi-agent approach to power system restoration. *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 17, No. 2, pp. 457–462, 2002.

[55] 児玉優, 濱上知樹. 2 層型契約ネットプロトコルを用いた配電系統事故復旧の分散処理システム. 電気学会論文誌 C（電子・情報・システム部門誌）, Vol. 130, No. 2, pp. 201–208, 2010.

[56] 歌谷昌弘, 永田武. 孤立配電系統の事故復旧に関する一方式. 電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）, Vol. 141, No. 6, pp. 448–453, 2021.

[57] Mohd Shahrin, 青木秀憲. 配電系統事故復旧問題への多目的最適化手法の適用. 電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）, Vol. 136, No. 3, pp. 275–283, 2016.

[58] D. Lindenmeyer, H. W. Dommel, and M. M. Adibi. Power system restoration – a bibliographical survey. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 23, No. 3, pp. 219–227, 2001.

[59] S. Toune, H. Fudo, T. Genji, Y. Fukuyama, and Y. Nakanishi. Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems. *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 17, No. 1, pp. 173–181, 2002.

[60] I. Watanabe and M. Nodu. A genetic algorithm for optimizing switching sequence of service restoration in distribution systems. In *Proc. Congress on Evolutionary Computation*, 2004.

[61] I. Watanabe, I. Kurihara, and Y. Nakachi. A hybrid genetic algorithm for service restoration problems in power distribution systems. In *2006 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 3250–3257, 2006.

[62] 高野浩貴, 林泰弘, 松木純也, 小林直樹. 配電系統のバンク事故による分散型電源の一斉解列を考慮した事故復旧手法. 電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）, Vol. 126, No. 3, pp. 336–346, 2006.

[63] B. Chen, C. Chen, J. Wang, and K. L. Butler-Purry. Multi-time step service restoration for advanced distribution systems and microgrids. *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 9, No. 6, pp. 6793–6805, 2018.

[64] Z. Wang and J. Wang. Self-healing resilient distribution systems based on sectionalization into microgrids. *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 30, No. 6, pp. 3139–3149, 2015.

[65] A. Zidan, M. Khairalla, A. M. Abdrabou, T. Khalifa, K. Shaban, A. Abdrabou, R. E. Shatshat, and A. M. Gaouda. Fault detection, isolation, and service restoration in distribution systems: state-of-the-art and future trends. *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 8, No. 5, pp. 2170–2185, 2017.

[66] F. Shen, Q. Wu, and Y. Xue. Review of service restoration for distribution networks. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 8, No. 1, pp. 1–14, 2019.

[67] 高野浩貴, 村田純一, 菅原明徳, 田岡久雄. 系統情報の不確実性を考慮した配電ネットワーク事故復旧に関する研究. 電気学会論文誌 C（電子・情報・システム部門誌）, Vol. 137, No. 8, pp. 1052–1061, 2017.

[68] A. Teixeira, S. Amin, H. Sandberg, K. H. Johansson, and S. S. Sastry. Cyber security analysis of state estimators in electric power systems. In *49th Conference on Decision and Control (CDC)*, 2010.

[69] G. Hug and J. A. Giampapa. Vulnerability assessment of ac state estimation with respect to false data injection cyber-attacks. *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 3, No. 3, pp. 1362–1370, 2012.

[70] M. Rahman and H. M. Rad. False data injection attacks with imcomplete information against smart power grids. In *Proc. IEEE Conference on Global Communications (GLOBECOM)*, 2012.

[71] L. Xie, Y. Mo, and B. Sinopoli. Integrity data attacks in power market operations. *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 2, No. 4, pp. 659–666, 2011.

[72] L. Jia, J. Kim, R. J. Thomas, and L. Tong. Impact of data quality on real-time locational marginal price. *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 29, No. 2, pp. 627–636, 2014.

[73] 渡邊勇, 小野功. 電力系統状態推定における不正データ注入攻撃に対するロバストなメータ配置. 電気学会論文誌 C（電子・情報・システム部門誌）, Vol. 136, No. 3, pp. 390–400, 2016.

[74] 電力系統の運用体系調査専門委員会. 電力系統の運用体系. 電気学会技術報告第 1059 号, 2006.

[75] 電力系統事故時の復旧操作調査専門委員会. 電力系統事故時の復旧操作. 電気学会技術報告第 1208 号, 2010.

[76] 電力系統の事故時復旧操作調査専門委員会. 電力系統の事故時復旧操作. 電気学会技術報告（II 部）第 354 号, 1990.

[77] Ray Daniel Zimmerman, Carlos Edmundo Murillo-Sánchez, and Robert John Thomas. Matpower: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 26, No. 1, pp. 12–19, 2011.

[78] MATLAB. http://www.mathworks.com/.

[79] Gurobi Optimizer. http://www.gurobi.com/.

[80] Xuan Liu and Zuyi Li. Local load redistribution attacks in power systems with incomplete network information. *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 5, No. 4, pp. 1665–1676, 2014.

[81] Xuan Liu, Zhen Bao, Dan Lu, and Zuyi Li. Modeling of local false data injection attacks with reduced network information. *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 6, No. 4, pp. 1686–1696, 2015.

[82] Mohammad Esmalifalak, Huy Nguyen, Rong Zheng, and Zhu Han. Stealth false data injection using independent component analysis in smart grid. In *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pp. 244–248, 2011.

[83] Ahmed S. Musleh, Guo Chen, and Zhao Yang Dong. A survey on the detection algorithms for false data injection attacks in smart grids. *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 11, No. 3, pp. 2218–2234, 2020.

[84] Yacine Chakhchoukh and Hideaki Ishii. Coordinated cyber-attacks on the measurement function in hybrid state estimation. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 30, No. 5, pp. 2487–2497, 2015.

[85] Naime Ahmadi, Yacine Chakhchoukh, and Hideaki Ishii. Power systems decomposition for robustifying state estimation under cyber attacks. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 36, No. 3, pp. 1922–1933, 2021.

[86] Yacine Chakhchoukh, Song Liu, Masashi Sugiyama, and Hideaki Ishii. Statistical outlier detection for diagnosis of cyber attacks in power state estimation. In *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, pp. 1–5, 2016.

[87] W. H. Kersting. Radial distribution test feeders. *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 6, No. 3, pp. 975–985, 1991.