

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：15401
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2014～2016
課題番号：26420236
研究課題名(和文) 電力系統のロバスト信頼度に関する研究

研究課題名(英文) Robust Power System Security in Power Systems

研究代表者
餘利野 直人 (Yorino, Naoto)

広島大学・工学研究院・教授

研究者番号：70182855
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、再生可能エネルギー電源の大量導入、電力市場取引の拡大、不確定性の増大という新たな環境下の電力システムのセキュリティを達成するための考え方を整理し、具体的な手法を確立するため、研究代表者らが提案している「ロバスト信頼度」に基づく、電力システム監視・制御手法の開発を行った。また、将来に向けて、ロバスト信頼度に基づくシステムを個体とする集合体としてのレジリエントシステムの構築に向けてのアプローチについて検討を行った。本研究の成果は、査読付き論文IEEE Trans. on Power System, 他に公表した。

研究成果の概要(英文)：Due to rapid expansions of renewable energy (RE) generations, it becomes more important to assess the feasibility of power system operation under limited controllable resources. This research proposes a method to evaluate the size of the feasible region of power system operation in control space for the examination of the effective system reserve margin under uncertainties.

研究分野：電力システム工学

キーワード：電力システム 供給信頼度 太陽光発電 不確定性 ロバスト信頼度 需給制御 レジリエンス

1. 研究開始当初の背景

従来、電力システムの供給信頼度の維持のために、状態予測に基づき想定される過酷故障に対して系統解析を実施し、予防的な運用計画の変更や制御により確実に危機を回避する手法がとられてきた。例えば、N-1 信頼度基準は、全ての箇所 N の単一故障に対してシステムの安定性を保証する手法で、世界共通の手法である。

しかし、近年の再生可能エネルギーの大量導入や電力市場取引に伴う不確定性の増大により、システム運用において予測誤差が増大し確実な危機回避ができなくなってきた。

N-1 信頼度規範の提案者が創設し、欧米の TSO や ISO など各国の電力系統運用者・実務者が集う国際ワークショップ The International Workshops on Electric Power Control Centers (EPCC) (<http://www.epcc-workshop.net/>) では、様々な状況が報告され、一方、電力システム研究・教育の世界的権威の集う国際シンポジウム Bulk Power System Dynamics and Control - IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid (IREP 2013) (<http://www.irep2013.gr/>) では、新たにセッションが設けられ、大問題となり始めた不確定性の問題が議論された。研究代表者は、上記 2 つの国際会議の運営委員および理事としてこの問題に関わりながら、「ロバスト信頼度」という信頼度維持のための新たな概念を提唱してきた。

従来から、不確定性の取り扱いに関して、確率論的アプローチは自然な対応方法であった。確率論による手法は、大停電のリスクを被害額で評価し、切っ掛けとなる個々の事象の発生確率を乗じた上で、被害の期待値を最小化するシステム運用を行う。この場合の発生確率は十年に一度といった極めて小さな値が多々含まれ、一方の被害額は国家予算にも匹敵する巨大な金額で両者の積である被害の期待値は信頼性のない数値となる。よって、研究代表者は、確率論の盲目的な適用は危険であり、システム崩壊に直結する事象は影響の甚大さを重視し確定論的に危機回避を行うべきと主張してきた。

すなわち、破局的な結末となる要因に関しては確定論的に管理し、許容範囲の便益や損失に関連する要因については確率論を用いる考え方をここでは採用している。この考え方には多くの賛同が得られている。

2. 研究の目的

研究代表者の提唱する「ロバスト信頼度」とは、不確定性パラメータに対して信頼区間を設け、その区間においては指定した信頼性を確実に維持する概念 (図 1) および手法である。

本研究では、ロバスト信頼度に基づくシス

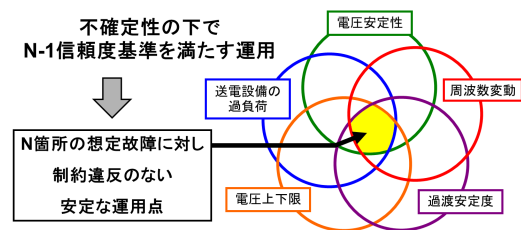


図1 ロバスト信頼度の概念

テム監視・制御手法を実際に開発し、電力システムの信頼度維持について将来の方向性を示し、さらに将来を見据えて、実用に供するレジリエントシステムの構築に向けて可能性を探ることを目的とした。

3. 研究の方法

電力システム運用においてロバスト信頼性を実現するためには、電圧安定性、周波数変動、過渡安定度、電圧上下限、送電設備過負荷の全ての要因を考慮する必要がある (図 1)。

しかし、ロバスト信頼度の研究は途についたばかりであることから、ここでは支配的な不安定要因である送電設備過負荷に着目して、ロバスト信頼度手法の有用性を示し、実システム運用へのアプローチを具体的に示すこととした。

以下の3点に着目して研究を実施した。

(1) ロバスト信頼度監視手法の確立

研究代表者は先行研究において、システムの制約条件と不確定パラメータの信頼区間から決まる発電機出力の実行可能領域をロバスト信頼領域と定義した (図 2)。

ロバスト信頼性を維持するとは、発電機出力を領域内に制御することであるが、それ以前に領域が存在しないといった状況も想定され、領域の広さそれ自体をシステム環境の指標として使用したい。しかし、この領域は、運用条件、不確定性、想定故障など多くの要因が関与し、大規模システムに対して具体的な計算がない。そこで本研究では、手始めに送電設備過負荷に着目し、領域サイズを求める問題を定式化した。これは、今後、監視手法として利用可能と考えられる。

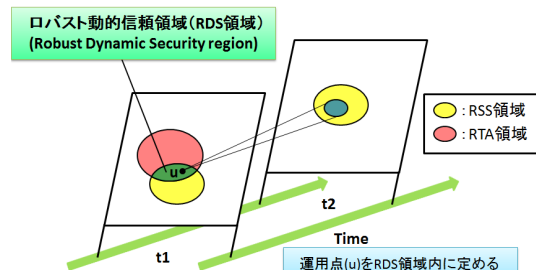


図2 時刻 t1 におけるロバスト信頼領域

(2) 需給制御におけるロバスト信頼度制御手法の開発

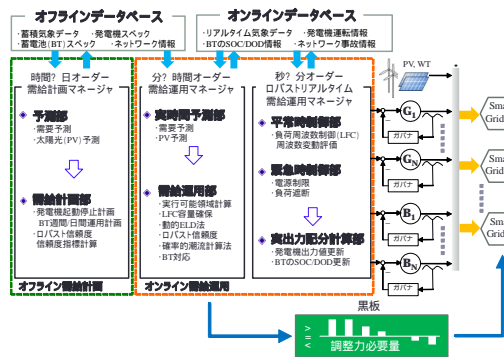


図3 需給制御マネージャ(SMU)の機能

需給制御とは、電力システム全体の需要を予測し、これに対応する供給力を準備し、需要と供給のバランスを維持しながら、有効電力フローを適正に調整する制御である。大規模システムの実運用にはさらに電圧制御が必要であるが、ここでは対象としていない。

研究代表者はこれまで、既存の集中型大規模電力システムの中央給電指令所で使用されている手法（主に需要予測、発電機運用計画、リアルタイム運用制御）について多くの研究実績があり、この一環として図3に示す需給制御マネージャ(SMU)の構築を行ってきた。

SMUは現在、電力システムシミュレータとして機能しているので、本研究ではこの中でロバスト信頼度の概念を具現化した。具体的には、リアルタイム(1~5分間隔)で各発電機に指令を出すダイナミック経済負荷配分法をベースに、実用性のある形でロバスト信頼度の考え方を取り入れることで、新たに手法開発を行った。

4. 研究成果

(1)ロバスト信頼度監視手法の確立

まず、実際の需給運用で用いる発電機の運転計画に対応して、(a)~(c)のように信頼領域を定義した。

(a) 静的信頼領域(SS領域)

特定の時間断面でN-1信頼基準を満たす運用領域（発電機の出力可能領域）

(b) ロバスト静的信頼領域(RSS領域)

PV出力変動などの不確実性が存在しても信頼度が満たされる運用領域

(c) ロバスト動的到達可能領域(RRS領域)

現在時刻における発電機の初期運転点から、出力変化率制約を考慮して、将来時刻に到達可能なRSS領域内の運用領域

上記の領域を計測することで信頼度を定量的に見積もることが可能になる。本研究ではこのためのBi-Level最適化問題を定式化し

た。ここでは、目的関数として、発電機の運転可能領域の最大化、運用費用の最小化など、任意の線形関数を設定し、需給制御問題における制約条件を設定し、さらに太陽光発電等の不確実性を信頼区間として設定した。これにより、予測が最悪のパターンで外れた際の上記ロバスト信頼領域を算出できる。

(2)需給制御におけるロバスト信頼度制御手法の開発

(1)での定式化に基づき、テストシステムモデルを使用して、シミュレーションを実施した。PVの導入箇所は任意に設定し、発電機の初期運転点は、需給制御マネージャで算出した値を用いた。一例として、PV導入量を現状に対して50%増加させたケースと、線路制約を厳しく(2回線中1回線事故を簡易模擬)したケースについて、それぞれシミュレーションを行った。

発電機の総出力を最大・最小とすることで、総需要がとることのできる範囲を求めることができる(図4)。

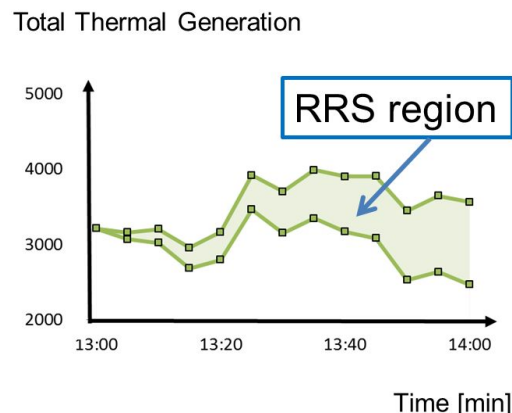


図4 RRS領域 (PV導入量100%ケースにおける発電機総出力の上下限領域)

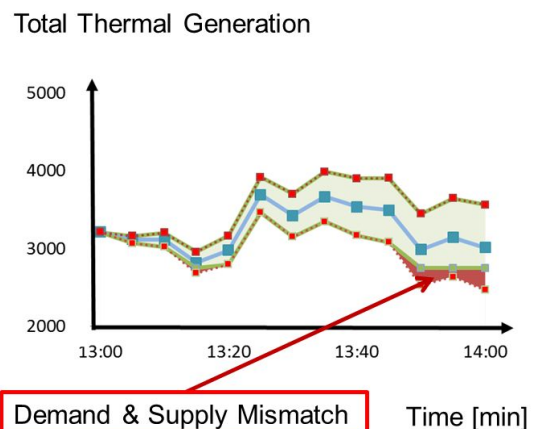


図5 RRS領域 (PV導入量150%ケースにおける発電機総出力の上下限領域)

Total Thermal Generation

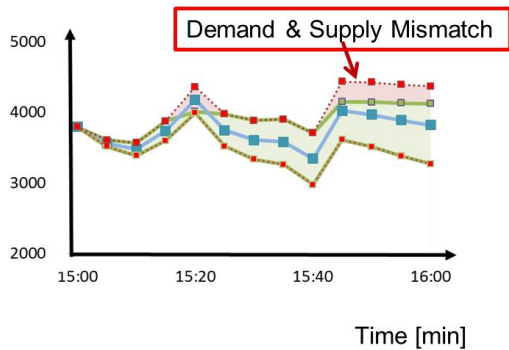


図 6 RRS 領域 (PV 導入量 100%, 線路潮流制約を厳しくしたケース)

次に、PV の予測誤差の有無による比較・検討を行った。予測誤差を考慮した見かけ上の需要と RRS 領域を比較することで、どの時間帯にどれくらいの需給不均衡が生じているかを視覚的に把握することができた。

図 5 より、PV 導入量を現状から 50%増加させたケースでは、13:50 から需給不均衡が生じる可能性（不確実性が最悪な形で実現する場合）があることがわかる。

線路潮流制約を厳しくしたケース(図 6)では、不確実性が最悪な形で実現する場合、線路過負荷により送電が困難となり、需給不均衡が発生する可能性があることがわかる。

以下は開発した手法の特長である。

特長 1：ロバスト信頼度の考え方にに基づき、系統崩壊に直結し得る周波数変動（需給バランス制約）に関して、太陽光発電の出力予測値の不確実性を信頼区間で取り扱い、系統崩壊を確実に回避できる手法を構築した。

特長 2：項目(1)におけるロバスト信頼領域が消滅するような極端なケースも取り扱える柔軟な計算技術を開発した。

特長 3：種々の事象の特徴を考慮し、送電線過負荷のみを対象として確率的な取り扱いも併用した。そして、想定故障を考慮して予防的に危機回避をしながら発電機出力指令値をリアルタイムで算出する手法として完成させた。

(3)レジリエントシステム構築法に関する考え方の整理と検討

前述の項目(1)と(2)は、ロバスト信頼度研究の中核的な成果である。これに対して、本項目はレジリエントシステムの構築に向けての将来の方向性を探る補足的項目である。

本研究では図 3 の SMU による頑強なシステム構築を目指しているが、一方で発想を変えて SMU を分散型の部分システムとして機能させることについて検討を行った。ここでは、SMU により頑強な部分システムを構成し、SMU の集合体としてレジリエントシステムを構築できる可能性を調べた。これは将来有望なアプローチである。

(4) 将来展望

供給信頼度の維持に関して、十分な信頼に足る有効な手法がない現状において、研究代表者らが提案した「ロバスト信頼度」は、不確実性に対して確定論的に電力システムの信頼性を維持する、他に類のないアプローチである。

本研究はまだ途についたばかりで、実用に供するための計算速度の向上や応用範囲の拡大や一般化など多くの課題がある。しかし、本研究により問題の定式化や解法の確立など、方向性を示すことができたことは大きな成果であり、波及効果は大きいものと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

1. Naoto Yorino, Abdillah Muhammad, Yutaka Sasaki, and Yoshifumi Zoka, “Robust Power System Security Assessment under Uncertainties Using Bi-Level Optimization,” IEEE Transactions on Power Systems, 査読有, Vol.PP, No.99, 2017, pp.1-11, DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2689808

2. Yutaka Sasaki, Naoto Yorino, Yoshifumi Zoka, and Imam Farid Wahyudi, “Robust Stochastic Dynamic Load Dispatch against Uncertainties,” IEEE Transactions on Smart Grid, 査読有, Vol.PP, No.99, 2017, pp.1-6, DOI: 10.1109/TSG.2017.2690360

3. 佐々木豊, 餘利野直人, Imam Fardi Wahyudi, 清木場大, 朝田光雅, 馬立英, 造賀芳文, “ローカル電力需給制御に適した太陽光発電量の予測手法,” 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), 査読有, Vol.137, No.7, 2017, pp.1-8, Web: <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/ieejpes/-char/ja/>

4. Yoshiharu Okumoto, Naoto Yorino, Yutaka Sasaki, Yoshifumi Zoka, Tomohisa Akiyoshi, and Tomohiro Isoya, “A Study on the Power System Security under Future Uncertainties: An Examination based on the Robust Power System Security,” Electrical Engineering in Japan, 査読有, Vol.197, No.1, 2016, pp.15-25, DOI: 10.1002/eej.22855

5. Naoto Yorino, Muhammad Abdillah, Tomohiro Isoya, Yutaka Sasaki, and Yoshifumi Zoka, “A New Method of Evaluating Robust Power System Security against Uncertainties,” IEEE

Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読有, Vol.10, No.6, 2015, pp.636-643, DOI: 10.1002/tee.22130

〔学会発表〕(計 33 件)

1. 餘利野直人, “安全・安心社会の電気エネルギーセキュリティ,” 平成 29 年電気学会全国大会, 平成 29 年 3 月 15 日 ~ 17 日, 富山市, 富山県

2. Abdilllah Muhammad, “Robust Power System Security against Uncertainties - Monitoring of Total Transfer Capability,” 平成 29 年電気学会全国大会, 平成 29 年 3 月 15 日 ~ 17 日, 富山市, 富山県

3. 佐々木豊, “翌日・リアルタイム太陽光発電量予測を用いた電力需給マネージャの開発,” 電気学会電力技術・電力系統技術・半導体電力変換合同研究会, 平成 29 年 3 月 8 日 ~ 10 日, 久米島町, 沖縄県

4. Abdilllah Muhammad, “Monitoring the Region of Robust Power System Security against Uncertainties,” Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Asia) 2016, Nov. 28 - Dec. 1, 2016, Melbourne, Australia

5. 伊澤靖晃, “需給制御マネージャにおける前日・リアルタイム太陽光発電量予測手法,” The 18th IEEE Hiroshima Section Student Symposium, 平成 28 年 11 月 19 日 ~ 20 日, 宇部市, 山口県

6. 鶴見俊哉, “広域系統モデルを対象とした動的経済負荷配分法,” The 18th IEEE Hiroshima Section Student Symposium, 平成 28 年 11 月 19 日 ~ 20 日, 宇部市, 山口県

7. 朝田光雅, “中西日本系統モデルを対象とした太陽光発電量予測,” 平成 28 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 平成 28 年 10 月 22 日, 東広島市, 広島県

8. 佐々木豊, “確率的な動的経済負荷配分法を適用した需給制御マネージャの開発,” 平成 28 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 平成 28 年 9 月 20 日 ~ 21 日, 福井市, 福井県

9. 今村亮太, “太陽光発電大量導入時における動的なロバスト信頼領域の算出手法,” 平成 28 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 平成 28 年 9 月 7 日 ~ 9 日, 北九州市, 福岡県

10. 佐々木豊, “マイクロ EMS への適用を目的とした需給制御マネージャの開発,” 2016 年

電気設備学会全国大会, 平成 28 年 9 月 6 日 ~ 7 日, 岡山市, 岡山県

11. Abdilllah Muhammad, “A Method for Evaluating Robust Power System Security against Uncertainties,” International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Jul. 28-30, 2016, Lombok Island, Indonesia

12. Mitsumasa Asada, “Dynamic Economic Load Dispatch Method applied to a micro-EMS,” The International Conference on Electrical Engineering '16 (ICEE2016), Jul. 3-7, 2016, Naha, Okinawa, Japan

13. Yutaka Sasaki, “Probabilistic Economic Load Dispatch Applied to a micro-EMS Controller,” 19th Power System Computation Conference (PSCC), Jun. 20-24, 2016, Genoa, Italy

14. 餘利野直人, “安全・安心社会の電気エネルギーセキュリティ,” 平成 28 年電気学会全国大会, 平成 28 年 3 月 16 日 ~ 18 日, 仙台市, 宮城県

15. 東 克俊, “需給制御シミュレータへの負荷周波数制御機能の実装,” 平成 28 年電気学会全国大会, 平成 28 年 3 月 16 日 ~ 18 日, 仙台市, 宮城県

16. 東 克俊, “需給制御マネージャにおける翌日・短時間先 PV 発電量予測の検討,” The 17th IEEE Hiroshima Section Student Symposium, 平成 27 年 11 月 21 日 ~ 22 日, 岡山市, 岡山県

17. 信長翔太, “需給制御シミュレータの開発 - 不確定環境下における負荷周波数制御 -,” 平成 27 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 平成 27 年 10 月 17 日, 宇部市, 山口県

18. 岡野尚輝, “蓄電池運用計画を考慮した動的経済負荷配分法の基礎的検討,” 平成 27 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 平成 27 年 10 月 17 日, 宇部市, 山口県

19. 今村亮太, “ロバスト信頼領域を用いた電力需給状況の評価に関する基礎的検討,” 平成 27 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 平成 27 年 10 月 17 日, 宇部市, 山口県

20. 朝田光雅, “需給制御マネージャにおける翌日・リアルタイム太陽光発電量予測手法について,” 平成 27 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 平成 27 年 10 月 17 日, 宇部市, 山口県

21. 藤本陽大, “不確定環境下における動的なロバスト信頼領域の計算手法,” 平成 27 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 平成 27 年 9 月 16 日～18 日, 仙台市, 宮城県
22. 今村亮太, “不確定環境下におけるロバスト信頼領域の導出,” 平成 27 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 平成 27 年 8 月 25 日～27 日, 名古屋市, 愛知県
23. 朝田光雅, “需給制御マネージャにおける翌日・短時間先 PV 発電量予測の検討,” 平成 27 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 平成 27 年 8 月 25 日～27 日, 名古屋市, 愛知県
24. Shota Nobunaga, “Development of the DS-Manager for Utilizing the Existing Generators,” The International Conference on Electrical Engineering, Jul. 5-9, 2015, Hong Kong, China
25. Naoto Yorino, “Monitoring of Robust Power System Security-Computation of Feasibility Margin of Power System Operation against Uncertainties,” 13th International Workshop on Electric Power Control Centers (EPCC13), May 17-20, 2015, Bled, Slovenia
26. Yutaka Sasaki, “A Day-Ahead Regional PV Generation Forecast Applied to Micro EMS,” 13th International Workshop on Electric Power Control Centers (EPCC13), May 17-20, 2015, Bled, Slovenia
27. 餘利野直人, “再エネ導入に伴う電力システムの信頼性維持の課題,” 平成 27 年電気学会全国大会, 平成 27 年 3 月 24 日～26 日, 東京都
28. 朝田光雅, “既存発電機を有効に活用する需給制御マネージャの開発～需給予測部に関する検討～,” 平成 27 年電気学会全国大会, 平成 27 年 3 月 24 日～26 日, 東京都
29. 岡野尚輝, “既存発電機を有効に活用する需給制御マネージャの開発～需給運用部に関する検討～,” 平成 27 年電気学会全国大会, 平成 27 年 3 月 24 日～26 日, 東京都
30. 信長翔太, “複数シナリオを考慮した確率的最適化を用いた発電機起動停止計画に関する研究,” 平成 26 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 平成 26 年 10 月 25 日, 福山市, 広島県
31. 清木場大, “需給制御マネージャにおけ

る PV 発電量予測導入の一検討,” 平成 26 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 平成 26 年 10 月 25 日, 福山市, 広島県

32. 沖原 潤, “複数台の発電機に対応した発電機起動停止計画,” 平成 26 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 平成 26 年 10 月 25 日, 福山市, 広島県

33. Yoshiharu Okumoto, “A Study on the Power System Security with Increased PV Penetration by Applying the Robust Power System Security,” Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe) 2014, Oct. 12-15, 2014, Istanbul, Turkey

6. 研究組織

(1) 研究代表者

餘利野 直人 (NAOTO YORINO)
広島大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：70182855

(2) 研究分担者

佐々木 豊 (YUTAKA SASAKI)
広島大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：10511561

造賀 芳文 (YOSHIFUMI ZOKA)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：40294532