

| | |
|--------------|---|
| Title | 発電量が不規則変動する再生可能エネルギー源の電力配電システムへの最適導入 |
| Author(s) | AKANIT, KWANGKAEW |
| Citation | |
| Issue Date | 2023-09 |
| Type | Thesis or Dissertation |
| Text version | ETD |
| URL | http://hdl.handle.net/10119/18780 |
| Rights | |
| Description | Supervisor: 金子 峰雄, 先端科学技術研究科, 博士 |

| | | | |
|---------|--|---------------|-----|
| 氏名 | KWANGKAEW, Akanit | | |
| 学位の種類 | 博士 (情報科学) | | |
| 学位記番号 | 博情第 515 号 | | |
| 学位授与年月日 | 令和 5 年 9 月 22 日 | | |
| 論文題目 | Optimal Integration of Intermittent Renewable Energy Sources in Power Distribution Systems | | |
| 論文審査委員 | 金子 峰雄 | 北陸先端科学技術大学院大学 | 教授 |
| | 丹 康雄 | 同 | 教授 |
| | リム 勇仁 | 同 | 准教授 |
| | 向井 宏明 | 金沢工業大学 | 教授 |
| | Chalie Charoenlarnpparut | タマサート大学 | 准教授 |

論文の内容の要旨

The significance of renewable energy sources, such as solar and wind power, has experienced a remarkable surge in the modern world. Advancements in solar panel technology, along with decreasing costs and the integration of solar power and energy storage, have significantly enhanced the efficiency and cost-effectiveness of solar energy. Similarly, wind energy has made notable strides through the development of larger and more efficient wind turbines, including offshore and floating wind farms. As a result, renewable energy has become an increasingly vital component of power systems.

However, the integration of renewable energy sources presents challenges concerning voltage stability, power loss, and unpredictable reactive power consumption. Voltage instability and power loss in power distribution networks are influenced by the reactive power compensation of renewable distributed generators (RDGs). Consequently, it is important to allocate and determine the optimal placement of RDGs while considering their unpredictable reactive power consumption and the system's capacity for reactive support. This dissertation presents novel methods for the location, sizing, and allocation of RDGs, considering the uncontrolled and reactive power consumption of the generators.

The study begins by addressing voltage instability caused by uncontrolled loads, generators, and the reactive power compensation of RDGs. A methodology is proposed to quantify the system's reactive support capacity and improve voltage stability through the Reactive Power Compensation Support Margin for Voltage Stability Improvement (QSVS). Key functions derived from the complex power formula are utilized to calculate voltage stability and identify the bus most susceptible to voltage collapse. Consequently, the Load-Disabling Nodal Analysis (LDNA) method is introduced for identifying the optimal location and size of RDGs. A methodology is then presented that determines the placement of RDGs using LDNA, which consists of two parts that leverage the QSVS concept. The first part utilizes QSVS as the objective function to maximize the reactive support capacity and determine the optimal location for RDGs. This process of locating RDGs using the QSVS as the objective function to be maximized is called LDNA-QSVS. Subsequently, the loss minimization is conducted to determine the optimal sizing of RDGs. By considering reactive compensation and incorporating safety margins using LDNA-QSVS, the proposed methodology achieves improved power loss reduction and enhances voltage stability. This emphasizes the significance of compensating reactive power in achieving improved reduction in power losses and ensuring resilient voltage stability.

Next, the Normalized Voltage Stability index (Λ) is introduced for identifying RDG locations that address both voltage stability and power loss. Then, the LDNA for Robust Voltage Stability (LDNA-RVS) method is employed to locate RDGs by maximizing Λ as the objective function. This approach improves robust voltage stability and efficiency in reducing power losses during the integration of RDGs. Consequently, the LDNA-RVS method effectively enhances voltage stability and optimizes power loss reduction in RDG allocation. Comparative analyses conducted on the IEEE 33-bus and IEEE 69-bus test distribution systems demonstrate the superior performance of LDNA-RVS over other techniques, particularly in terms of robust voltage stability and power loss reduction.

Lastly, this dissertation presents an innovative allocation approach that addresses the system's robustness against power fluctuations. By incorporating lower and upper power level bounds, the approach ensures a balanced and

stable system operation. The robustness conditions, inspired by the perfect matching concept from Graph Theory, are employed to establish a solid theoretical framework for the proposed approach. To further validate its effectiveness, simulations are conducted using a simplified model of a real power system, demonstrating the successful application of the proposed approach in maintaining system stability and optimizing power allocation under various operating conditions.

This dissertation investigates novel methods for the precise placement, optimal sizing, and efficient allocation of RDGs within power distribution networks. The research addresses the challenges related to power delivery efficiency, particularly in weather-dependent reactance fluctuations. By introducing innovative approaches, this study contributes significantly to various aspects of power distribution networks, including the seamless integration of renewable energy sources, enhancement of voltage stability, reduction of power losses, improvement of safety measures, reinforcement of system resilience, and the facilitation of practical implementation. These contributions collectively advance the field and pave the way for more sustainable and reliable power infrastructure.

Keywords: renewable energy, voltage stability, reactive compensation, system robustness, loss reduction efficiency

論文審査の結果の要旨

現代社会は膨大な電気エネルギー消費によって支えられている一方、化石燃料を使う発電では自然環境へのインパクトが大きく、地球温暖化対策やSDGsの観点からも、太陽光発電、風力発電などの再生可能エネルギーの活用が広く求められている。そうした中、本論文は、常に発電量が不規則変動する再生可能エネルギー源の電力網への導入に係る技術的な課題に対して取り組んだものであり、「Optimal Integration of Intermittent Renewable Energy Sources in Power Distribution Systems (発電量が不規則変動する再生可能エネルギー源の電力配電システムへの最適導入)」と題し、英文7章からなっている。

第1章 Introduction では、現代における再生可能エネルギー源利用の必要性の高まりとその一方で再生可能エネルギー源の既存の電力配電網への導入に関する困難さ、問題点を整理し、本論文の目的が再生可能エネルギー源の特質でもある発電量の変動、特に無効電力変動の効果を考慮した再生可能エネルギー源の最適配置位置・最適定格発電量決定手法の確立にあると述べている。

第2章 Preliminaries では、本論文にて取り扱う電力配電システムの数学的モデルを導入した後、「電圧安定性」、「電力損失」などの重要なシステム評価指標について、それらの意味と計算手法について説明しており、以降の議論における重要な基礎を与えている。

第3章 Related Works では、本論文にて取り扱う問題を改めて整理した上で、多くの既存の関連研究についてサーベイを行い、従来の手法の特徴を整理している。その後、いずれの従来手法においても電圧安定性に係る無効電力の取り扱いが配慮されていないとの問題点を指摘し、こうした無効電力への配慮が本研究の大きな特徴であると述べている。

第4章 Incorporating Safety Margins using LDNA-QSVS: A Methodology for RDGs Location and Size Determination では、電力配電網における電圧安定性についての Reactive Power Compensation Support Margin (QSVS)と名付けた一つの新しい指標を提案し、Load-Disabling Nodal Analysis (LDNA)と名付けられた新しい電力網解析手法と組み合わせた再生可能エネルギー源配置場所・定格発電量決定アルゴリズムを提案している。その手法のIEEE-33等の電力網への適用を行い、既存手法と比較して、電力損失と電圧安定性の面で優れた配置場所・定格発電量を決定できていることを検証している。

第5章 Optimal Location and Sizing of Renewable Distributed Generators for Improving Robust Voltage Stability against Uncontrollable Reactive Compensation では、電力損失改善と電圧安定性改善の2つを同時に評価できる指標として Normalized voltage stability index を導入し、先のLDNA解析手法との組み合わせにて再生可能エネルギー源配置場所・定格発電量を決定する手法を提案している。また、同手法のIEEE-33やIEEE-69等の電力網への適用を行って、電力損失改善効率、電圧安定性改善の両面で優れた配置位置を決定できている事を検証している。

第6章 Allocation Design of Hybrid Renewable Energy Systems considering Robustness Against Fluctuations では、再生可能エネルギー源から各電力負荷への最適な電力分配について、制御できない最悪変動パターンを考慮した電力バランスの観点からの新しいアプローチを提案している。

第7章 Conclusion では、本研究での成果と提案手法の有効性の範囲を整理すると共に、今後の研究についての方向性を示している。

以上、本論文は、容易に発電量変動する再生可能エネルギー源の電力配電網への設置について、その最適設置箇所・最適定格発電量を決定する手法を確立したものであり、学術的に貢献するところが大きい。よって博士（情報科学）の学位論文として十分価値あるものと認めた。