

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 21 日現在

機関番号：13401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820097

研究課題名(和文) 低炭素電力供給システムを支える配電ネットワーク運用形状制御方式の創案

研究課題名(英文) A Study on Optimization Method for Distribution Network Configuration Supporting Smart Power Grids

研究代表者

高野 浩貴 (Takano, Hirotaka)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：50435426

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：配電ネットワークの運用形状は、電力流通に直接作用する最大の要素であり、安定した電力供給の根幹を支える。ただし、現行の形状制御システムは再生可能エネルギーの導入拡大には対応しておらず、スマートグリッドの実現には新たな形状制御システムの開発が急務とされる。本研究では、再生可能エネルギーの導入拡大に係る社会的追加費用を最小限に抑えつつ、再生可能エネルギーの導入促進(社会・導入者側のニーズ)と再生可能エネルギーと調和した配電ネットワークの高度運用の実現(ネットワーク管理者側のニーズ)という異なるニーズを、高い次元でバランス良く達成する新しい配電ネットワーク形状制御方式を創案した。

研究成果の概要(英文)：The radial distribution networks have been designed under the assumption that electricity flows from distribution substations to electric power consumers. However, the recent growth in penetration of renewable energy-based generators (REGs) has invalidated the assumption because the reverse power flow occurs when the output of the REGs exceeds the power consumption in distribution lines. Under the circumstances, the optimization technique, that solves the reconfiguration problem coping with the REG installation, is urgently needed. The aim of this study was to develop the optimization technique of distribution network reconfiguration which achieves the following multi objectives simultaneously: 1) to promote the REGs' installation, and 2) to improve the operation efficiency in the distribution networks, with a view to supporting a smarter distribution network management.

研究分野：工学

キーワード：電力 配電ネットワーク 再生可能エネルギー 最適化

1. 研究開始当初の背景

配電ネットワークの運用形状は、配電ネットワーク内に設置された多数の遠隔制御用開閉器のオンオフにより制御する。配電ネットワークの最適な運用形状（開閉器のオンオフの組み合わせ）の探求は、現行の「経験や勘による直感的な意思決定」から、「最適化理論による論理的な意思決定」にパラダイムをシフトすることで、既設設備の潜在能力を限界まで引き出す電力流通制御を実現するものである。しかしながら、これまでに開発されている技術の多くは、コスト削減や再生可能エネルギー受け入れという単一視点での最適化に特化しており、多様な社会ニーズに公平な視点で応え得るとは言い難い。

スマートグリッドの実現には、再生可能エネルギー電源や蓄電装置の高効率化・低コスト化に目を奪われがちであるが、受入先となる配電ネットワークの運用技術の発展無しでは総合的な効率化は望めない。上記成果から、形状最適化技術の更なる探求が、安定的かつ効率的な電力供給の実現に留まらず、日本型スマートグリッドを確立して世界に発信する上での中核技術になり得ると確信し、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、現行の配電ネットワーク運用方式で再生可能エネルギーをどこまで活用できるのか、更なる活用には何が問題となり得るのかを検討し、日本型スマートグリッドに適した配電ネットワーク形状制御の方向性を見出す。さらに、それを実現し得る配電ネットワーク形状制御技術を開発することを目的とする。応募者は、厳密解法によって配電ネットワークの運用形状を獲得するという独自の視点で配電ネットワーク形状最適化技術を開発しており、実データを元にその効果も明らかにしてきた。また、この技術に再生可能エネルギー利用電源からの電力供給を組み込み、現状の安定供給性を維持しつつ、電力ロスの削減も同時に実現する技術の開発にも取り組んできた。さらに、応募者の有する技術と再生可能エネルギー電源導入時の各種対策技術との協調動作を実現することで、個別対策時の性能を大幅に上回る効果が期待できることも確認してきた。本研究は、より実用的な視点でこれらを融合・発展させるものである。

3. 研究の方法

本研究では、電力利用者・再生可能エネルギー電源導入希望者・配電ネットワーク管理者の異なるニーズに対して、公平かつ適切な電力流通制御で応えるための、新しい最適化技術の開発を目的とした。この実現に向けて、本研究では、これまで殆ど検討されていなかった問題の特徴把握、大域的最適解を基準とした配電ネットワーク形状最適化技術の開発という切り口からのアプローチを試みる。

具体的には、まず、取り扱う問題を応募者の有する技術によって解析し、この解析結果を踏まえて新しい形状最適化問題の枠組みならびにその解法を創案する。さらに、再生可能エネルギー導入拡大に係る社会ニーズを反映したシナリオを作成し、将来の配電ネットワークを想定した多様なシミュレーションを通して次世代配電ネットワークの形状制御の在り方を検討する。

申請書に記載した通り、平成 26 年度に各種最適化手法から有効な探索戦略を抽出して融合した形状最適化手法を開発し、平成 27 年度に再生可能エネルギー導入に係る各種ニーズをバランス良く達成する形状制御方式を創案する、という流れで研究目的の達成を図った。平成 26 年度実施分を 1-1.取り扱う問題の特徴解析、1-2.メタヒューリスティクス手法の探索性能評価、1-3.有効な探索戦略を組合せた最適化アルゴリズムの構築の三つの項目、平成 27 年度実施分を 2-1.再生可能エネルギー電源を組み込んだ常時・非常時の形状最適化技術の開発とそれらの統合、2-2.計算機シミュレーションによる検証の二つの項目にそれぞれ分類し、適宜実施していった。その結果、本研究は、ほぼ計画通りに遂行できたと考えている。

4. 研究成果

本研究の成果として、新しい配電ネットワーク形状最適化問題の枠組みとその解法技術を提案した。例として、本研究の一環として提案した、配電ネットワークにおける事故復旧問題とその解法について示す。

[目的関数]

$$F = G + \alpha \cdot H \rightarrow \text{Minimize} \quad (1)$$

$$G = \sum_{i \in F} \sum_{j \in S} (I'_{j,t} \cdot e_{i,j}(x) - I'_{j,t} \cdot e'_{i,j}(x')) \quad (2)$$

$$H = \sum_{h \in W} |x_h - x'_h| \quad (3)$$

$$\text{ただし, } x_h \in \{0, 1\} \quad (4)$$

[制約条件]

・放射状構成制約

$$\sum_{i \in F} e_{i,j}(x) = 1 \quad (j \in S) \quad (5)$$

・線路容量制約

$$\begin{cases} -C_{i,k} \leq \sum_{j \in K_{i,k}} (I_{j,t}^{LOW} \cdot e_{i,j}(x)) \\ \sum_{j \in K_{i,k}} (I_{j,t}^{HIGH} \cdot e_{i,j}(x)) \leq C_{i,k} \end{cases} \quad (i \in F, k \in S) \quad (6)$$

・電圧制約

$$\begin{cases} \underline{V}_{i,k} \leq V_{0,i,t} - \sum_{l \in M_{i,k}} [Z_l \cdot \sum_{j \in N_{i,l}} (I_{j,t}^{LOW} \cdot e_{i,j}(x))] \leq \overline{V}_{i,k} \\ \underline{V}_{i,k} \leq V_{0,i,t} - \sum_{l \in M_{i,k}} [Z_l \cdot \sum_{j \in N_{i,l}} (I_{j,t}^{HIGH} \cdot e_{i,j}(x))] \leq \overline{V}_{i,k} \end{cases} \quad (i \in F, k \in S) \quad (7)$$

ここで、 G は停電負荷の総和、 H は状態変化のあった開閉器の総数であり、 α は重み係数（第一項に影響しない程度に十分小さな値）である。 x_h は開閉器 h の開閉状態を表す 0-1 変数（開ならば 0、閉ならば 1）、 $e_{i,j}(x)$ は区間 j が根元配電線 i に属するかを示す 0-1 変数

(根元配電線*i*から供給を受ける時1,それ以外で0)を意味する。 $I_{j,t}$ は時刻*t*の区間*j*の見かけの負荷(実際の負荷からPV出力を差し引いたもの), $I_{j,t}^{HIGH}$ と $I_{j,t}^{LOW}$ は時刻*t*に区間*j*の負荷が取り得る範囲の最大値と最小値, $C_{i,k}$ は根元配電線*i*の区間*k*の線路容量である。 $V_{0,t}$ は時刻*t*の根元配電線*i*の送出電圧, Z_l は区間*l*のインピーダンス, $\bar{V}_{i,k}$ と $V_{i,k}$ は電圧許容範囲の上下限をそれぞれ意味する。 F は根元配電線番号, S は区間番号, W は開閉器番号のそれぞれ集合を表し, $K_{i,k}$ は区間*k*から末端区間までに存在する区間番号, $M_{i,k}$ は根元区間から区間*k*までに存在する区間番号, $N_{i,l}$ は区間*l*から末端区間までに存在する区間番号のそれぞれ集合である。「 \cdot 」は、健全時の変数を意味する。

従来の定式化では, (6), (7)式における負荷を, $I_{j,t}$ (真の負荷) によって表現する。これに対して提案した枠組みでは, $I_{j,t}$ が取り得る範囲を予め設定し, その範囲の中で最も制約が厳しい状況为满足する構成を獲得する方針を採っている。 $I_{j,t}^{HIGH}$ と $I_{j,t}^{LOW}$ とは, (8)~(10)式によって定義した。

$$I_{j,t}^{LOW} = I'_{j,t} - (I_{j,t}^{MAX} - I_{j,t}^{MIN}) \quad (8)$$

$$I_{j,t}^{HIGH} = I'_{j,t} + (I_{j,t}^{MAX} - I_{j,t}^{MIN}) \quad (9)$$

ただし, $I_{j,t}^{MIN} \leq I_{j,t} \leq I_{j,t}^{MAX} \quad (10)$

ここで, $I_{j,t}^{MAX}$ は事故発生前からの需要の増加分とPV出力の減少分(天候の変化や解列による)の和, $I_{j,t}^{MIN}$ は需要の減少分とPV出力の増加分の和の想定値をそれぞれ意味する。

図1は, (1)~(10)式で表現された問題と, 従来の考え方との違いを示すものである(B: 従来技術の制約充足形状候補, C: 提案技術における制約充足形状候補)。図1に示すように, 提案した問題では, 評価すべき制約充足形状候補にも違いを生じることから, 結果として得られる最適配電ネットワーク形状も従来とは異なるものとなる。図2は, 提案した問題の解法の流れである。本研究で提案した枠組みでは, 再生可能エネルギー電源に起因する不確かさを最適化問題に反映しているため, 従来とは異なる流れで問題を解くこととなる。また, 数値シミュレーションによってこれらを検証した結果, 提案技術により得られた配電ネットワーク形状では, 再生可能エネルギー電源出力の不確かさに左右されることなく, 確実に電力供給を実現できることを示せた。すなわち, 提案技術は, 電力利用者・再生可能エネルギー電源導入希望者・配電ネットワーク管理者の異なるニーズをバランス良く達成する形状を議論する際の基準となり得ることを確認した。

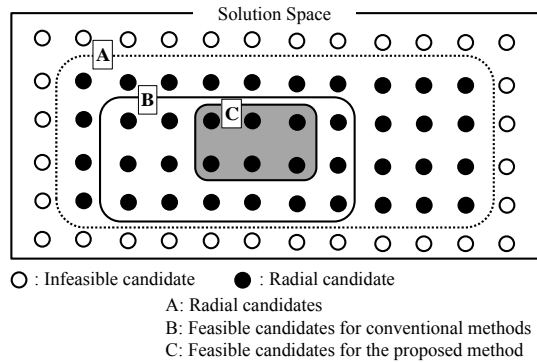


Fig. 1. Difference of feasible solution between proposed technique and conventional one.

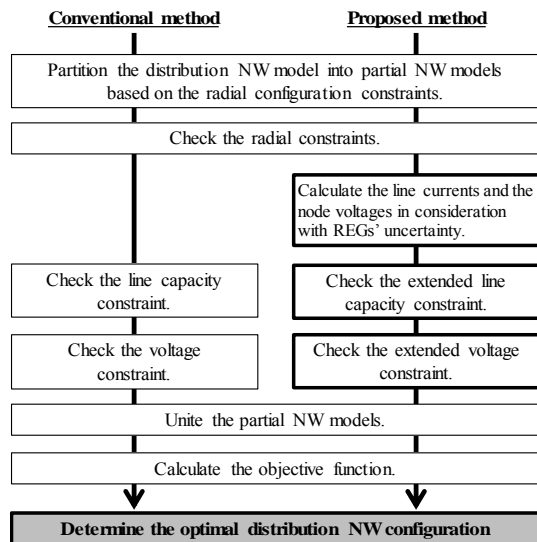


Fig. 2. Difference of determination flow between proposed technique and conventional one.

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 2 件)

高野浩貴, 田岡久雄, 村田純一, 永木雄也, 飯坂達也, 石橋直人, 勝野徹: “太陽光発電の不確か性を考慮した電気事業者の電力取引に関する検討”, 電気学会論文誌 C, Vol. 136, No. 6, 掲載決定

Hirotaka Takano, Yuya Nagaki, Junichi Murata, Tatsuya Iizaka, Naoto Ishibashi, and Tohru Katsuno: “A Study on Electric Power Management for Power Producer-Suppliers Utilizing Output of Megawatt-Solar Power Plants”, Journal of International Council of Electric Engineering, Accepted

〔国際会議論文〕(計 2 件)

Madihah Md Rasid, Junichi Murata, and Hirotaka Takano: “Simultaneous Determination of Optimal Sizes and Locations of Distributed Generation Units by Differential Evolution”, Proc. of 18th Intelligent Systems Applications to Power Systems Conference, SPL1-031 (Porto)

Hirotaka Takano, Yuya Nagaki, Junichi Murata, Tatsuya Iizaka, Naoto Ishibashi, and Tohru Katsuno: “A Study on Supply and Demand Planning for Power Producer-Suppliers Utilizing Output of Megawatt Solar Plants”, Proc. of The International Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2015, 15A-236 (Hong Kong)

〔学会発表〕(計 8 件)

加藤良亮, 澤井貴文, 松浦晃祐, クレイ・ステファン・キブコヌギ, **高野浩貴**, 田岡久雄, 阿部力也: “デジタルグリッドにおける複数セルグリッド間の電力融通制御の評価”, 平成 27 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 2015-9 (東北大学)

秋山直樹, 朱敏敏, 本堂義紀, **高野浩貴**, 田岡久雄: “低炭素型公共施設内マイクログリッドの実験による検証”, 平成 27 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 2015-9 (東北大学)

山内壮太, **高野浩貴**, 田岡久雄, 村田純一, 飯坂達也, 石橋直人, 勝野徹: “メガソーラーと電気事業者の協調運用効果に関する一検討”, 平成 27 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2015-9 (金沢工業大学)

高野浩貴, 村田純一, 田岡久雄: “配電ネットワーク構成の最適化に関する研究”, 平成 27 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 招待講演, 2015-9 (金沢工業大学)

高野浩貴, 村田純一, 飯坂達也, 石橋直人, 勝野徹: “メガソーラーの不確実性を考慮した電気事業者の電源運用計画に関する一検討”, 平成 27 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2015-8 (名城大学)

高野浩貴, 大賀博文, 村田純一: “PV の導入拡大に対応した配電 NW 事故復旧に関する検討”, 平成 27 年電気学会全国大会, 2015-3 (東京都市大学)

高野浩貴, 大賀博文, 村田純一, 飯坂達也, 樺澤明裕: “PV の不確実性に対応した配電ネットワーク復旧問題の一解法”, 平成 26 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 2014-9 (大阪府立大学)

大賀博文, **高野浩貴**, 村田純一, 飯坂達也, 樺澤明裕: “太陽光発電の時間帯毎最大可能出力に基づくロバスト最適化を用いた配電システム事故復旧構成決定法”, 平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2014-9 (同志社大学)

〔図書〕(計 1 件)

Hirotaka Takano, Kiyonori Kawamura, and Tatsuya Iizaka: “Industry Practice and

Operational Experience of Key Distribution Applications of Smart Grid Technologies”, Handbook of Smart Grid Development (Editor in Chief: Chen-Ching Liu, Stephen McArthur, and Seung-Jae Lee), SGD 42, Accepted

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高野 浩貴 (TAKANO HIROTAKA)

福井大学・工学研究科・講師

研究者番号: 50435426

(2) 研究分担者

なし ()

(3) 連携研究者

なし ()