

研究計画・目的：

スマートグリッドにおける運用・計画に対して大域的最適化を行うロバスト高性能進化的計算と深層学習について研究する。スマートグリッドにおける Active 配電ネットワークが近年、米国で新しい技術として注目されている。Active 配電自動化は従来の配電自動化と比べて、積極的に太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーを分散電源として用いる技術であり、系統状態が変化する不確定性を考慮した最適化が必要である。その解法としてロバスト高性能進化的計算について研究する。また、再生可能エネルギーの出力予測は、予測することは容易でないため、非線形関数近似能力が優れた深層学習を用いた深層ニューラルネットを用いて、高精度予測モデルを構築することを研究する。

研究活動：

在外研究中に次の研究活動を行った。

- 1) スマートグリッドにおける運用・計画に対して大域的最適化を行うロバスト高性能進化的計算の研究として、電圧無効電力制御の分散化を進化的計算の Brain Storm Optimization (BSO) を用いたロバスト最適化で最適ネットワーク分割をする手法について研究した。電圧無効電力制御は分散制御が可能のため、分散型電圧無効電力制御が可能である。その課題の1つは、分散型電圧無効電力制御を実現するためにどの様にネットワーク分割するかということである。系統分割法は進化的計算法である BSO を用いる。進化的計算の集中探索と拡大探索を強化する手法として生態系の餌と捕食者の関係の類似性を用いた Predator-Prey (PP) 戦略および進化的計算法の解の改善法である Scatter Search (SS) を BSO に適用することで SSPPBSO を開発した。系統状態の不確定性を考慮するために、最悪のシナリオに対する最適化を行うことでリスクを最小化するロバスト最適と SSBSO を融合した手法について研究した。ここで、非線形システムのロバスト最適化は min max 問題に帰着する。
- 2) 配電ネットワーク内に存在する分散電源、エネルギー貯蔵装置、需要家応答 (Demand Response: DR), 仮想発電所 (Virtual Power Plant: VPP) を用いて配電ネットワークの運用・計画を行う Active 配電ネットワークの制御について研究した。1つはパワーエレクトロニクス機器の D-FACTS を用いて、分散電源として再生可能エネルギーを持つ配電ネットワークの不確定のリスクを解消し、配電ネットワークのネットワーク損失最小化法を開発した。数多くある D-FACTS (Distribution AC Transmission System) の中で STATCOM (Static synchronous COMPensator) の使用について検討した。STATCOM は受電端電圧の安定化、系統安定度向上、負荷変動による電圧フリッカの補償などに有効である。具値的には、進化的計算 BSO を用いたロバスト最適化法を開発した。ここで、ロバスト最適化法とは非線形最適化法である。もう1つは分散電源として再生可能エネルギーを持つ配電ネットワークに対して離散変数のキャパシタバンクを持ちいて配電ネットワークの損失を最小化する手法提案した。最適化手法として

同様に進化的計算 BSO を用いたロバスト最適化法を適用した。

- 3) 配電系統状態推定を効率的に行うための新しい配電系統状態推定法を提案した。従来、配電系統において観測値が少ないため、状態推定が困難であった。送電系統と配電系統では大きな環境の違いがあることを無視して、十分に観測値が入手できる送電系統における環境を観測値が少ない配電系統の状態推定法に仮定した非現実的な手法が従来、提案されていることに大きな問題がある。具体的には、送電系統では観測値が多くあるため、状態推定は重みつく最小二乗法 (Weighted Least Squares: WLS) を用いられて来たが、配電系統では WLS を以下の理由で用いることができない。その理由は、状態変数の数よりも観測値の数が少ないため、線形化された観測方程式では観測行列のランク落ちが発生するためである。そこで、配電系統電力潮流計算に特化した DistFlow のネスト構造に着目した数学的定式化において次のことを考案した。

① 観測値のノイズに強い L1 ノルムを使用すること

② 数学的定式化は配電変電所の状態変数を推定することに帰着する非線形最適化問題を進化的計算 BSO で解くこと

- 4) 電力価格予測に対して新しい深層ニューラルネットワークを提案した。その深層ニューラルネットワークは、スパースオートエンコーダーと一般化ラジアル基底関数ネットワークの合成から構成されるスパースオートエンコーダーはオートエンコーダーの1種である。深層ニューラルネットワークにおいてオートエンコーダーは入力変数の次元圧縮に有効な事前学習モデルとして知られている。オートエンコーダーは同数のユニット数を持つ出力と入力から構成される三層パーセプトロンにおいて出力と入力が同一となるように学習して作成、前半と後半をそれぞれエンコーダーとデコーダーと呼ぶ。スパースオートエンコーダーは中間層の出力をゼロに近づくように設定されたニューラルネットワークである。一般化ラジアル基底関数ネットワークは重み付きガウス関数の和で表現されるニューラルネットワークの拡張モデルである。その違いは一般化ラジアル基底関数ネットワークがガウス関数のパラメータも学習時に学習することである。

研究成果：

- [1] Hiroyuki Mori, “Integration of Evolutionary Computation and Robust Optimization for Decentralized Voltage and Reactive Power Control,” presented at Panel on Integration of Robust Optimization with Evolutionary Optimization in Smart Grid, IEEE PES T&D2022, New Orleans, LA, USA, Apr. 2022.
- [2] Hiroyuki Mori, “Fusion of Modern Heuristics and Robust Optimization for Decentralized Voltage and Reactive Power Control,” presented at Panel on

- Advanced Techniques of Modern Heuristics for Robust Optimization in Smart Grid, IEEE PES General Meeting 2022, Denver, CO, USA, July 2022.
- [3] Shota Ogawa and Hiroyuki Mori, “Robust Optimization for Network Decomposition of VQC with Scatter-Search-Predator-Prey Brain Storm Optimization,” IFAC-PapersOnline (Elsevier), Vol. 55, No. 9, pp. 402-407, Dec. 2022.
 - [4] 河内勇裕、森啓之：「アクティブ配電ネットワークにおけるロス最小化のためのロバスト最適化に基づく BSO 最適化手法」令和 4 年電力技術・電力系統合同研究会, PE-22-119/PSE-22-127, オンライン開催(2022-8)
 - [5] 河内勇裕、森啓之：「アクティブ配電ネットワークにおけるロス最小化のための BSO に基づくロバスト最適化手法」令和 4 年電気学会 B 部門大会, 論文Ⅱ 論文番号 288, 福井大学, 福井(2022-9)
 - [6] Yusuke Kawauchi and Hiroyuki Mori, “Application of BSO to Robust Optimization for Minimizing Losses in Active Distribution Networks,” The Sixth International Workshop on Smart Power and Energy (SPE2022), Taoyuan, Taiwan, Oct. 2022.
 - [7] 河内勇裕、森啓之：「アクティブ配電ネットワーク損失最小化への BSO に基づくロバスト最適化手」進化計算学会進化計算シンポジウム、論文番号 S4-07, 北大、札幌 (2022-12)
 - [8] 染谷直寿、森啓之：「PPBSO を用いた D-STATCOM のロバスト最適出力制御」, 令和 4 年電気学会 B 部門大会, 論文Ⅱ, 論文番号 295, 福井大学, 福井(2022-9)
 - [9] 染谷直寿、森啓之：「PPBSO を用いた D-FACTS の出力変数の最適化」進化計算学会進化計算シンポジウム、論文番号 S4-08 北大、札幌 (2022-12)
 - [10] 伊藤亮朗、森啓之：「Predator Prey Brain Storm Optimization を用いたロバスト配電系統状態推定法」, 令和四年電気学会 B 部門大会, 論文Ⅰ 論文番号 29, 福井 (2022-9)
 - [11] Akio Ito and Hiroyuki Mori, “A BSO-based Robust Method for Distribution Network State Estimation,” The Fifth International Workshop on Smart Power and Energy (SPE2022), ,Taoyuan, Taiwan, Oct. 2022.
 - [12] 伊藤亮朗、森啓之：「Predator Prey Brain Storm Optimization を用いたロバスト配電系統状態推定法」, 電気学会論文誌 B、143 巻、2 月号掲載決定 (2023-2)。
 - [13] 三輪陸人、森啓之：「スパースオートエンコーダを用いた深層ニューラルネットワークによる電力価格予測」、令和 4 年電気学会電力・エネルギー部門大会、論文Ⅱ 論文番号 128、福井(2022-9)

- [14] Rikuto Miwa and Hiroyuki Mori, "Deep GRBFN for Short-term Load Forecasting," The Fifth International Workshop on Smart Power and Energy (SPE2022), Taoyuan, Taiwan, Oct. 2022.
- [15] 三輪陸人, 森啓之: 「BSO を用いた Lasso-GRBFN による電力価格予測」, 電気学会論文誌 C、143 巻、2 月号掲載決定 (2023-2)。

今後の展望:

- 1) 今回、研究テーマである進化的計算を用いたロバスト最適化は、進化的計算とロバスト最適化の融合分野であり、電力系統やスマートグリッドにおいて不確定に対処するため重要な役割を果たすことが期待されている。進化的計算を用いたロバスト最適化に関しては米国のテキサス州の Baylor 大学、ブラジルのサンパウロ大学、日本の広島大学、岐阜大学と共に IEEE (米国電気電子学会) のパネルセッションや IFAC(国際自動制御連盟)の Invited Track において先端テーマとして取り扱われ、今後、発展してゆく分野である。
- 2) もう 1 つの研究テーマである深層学習を用いた深層ニューラルネットは時系列予測において重要な技術であるため、風力発電予測、太陽光発電予測、電力価格予測、電力負荷予測などの分野に応用し、実用化されることが期待されている。

教育への効果:

- 1) 大学院生および学部生は Computational Intelligence 分野において先端的な技術である進化的計算および層学習を用いた深層ニューラルネットの理論と応用分野としてスマートグリッドについて Computational Intelligence 分野に造詣がある指導教員を通じて容易に学ぶことができた。
- 2) 研究室に所属する大学院生および学部生が英語による研究発表のプレゼンテーションについて学び、台湾の桃園市にある中原大学で開催された国際研究会 SPE2022 (The fifth International Workshop on Smart Power and Energy) で英語による研究発表のプレゼンテーションを実践したことは、国際性の向上という意味で有意義であった。
- 3) 研究室に所属する大学院生および学部生の研究に対するモチベーションが上がり、その表れとして、2022 年 9 月に福井大学文教キャンパスで開催された令和 4 年度電気学会電力エネルギー部門大会で院生 2 名、大学院進学予定の学部 3 年生 1 名の計 3 名がそれぞれの研究発表において YOC (Young engineer Oral presentation Competition) 奨励賞を受賞した。

以上