

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560342

研究課題名(和文) 不確定性を持つ送電ネットワーク拡張計画における多目的最適化のパレート解計算の研究

研究課題名(英文) Studies on Calculation of a Set of the Pareto Solutions for Multi-objective Optimization in Transmission Network Expansion Planning with the Uncertainties

研究代表者

森 啓之(Mori, Hiroyuki)

明治大学・総合数理学部・教授

研究者番号：70174381

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、パレート解集合を評価する多目的メタヒューリスティクスを用いた送電ネットワーク拡張計画法について研究した。良好な解を評価するために提案法では多目的メタヒューリスティクスとメタヒューリスティクスを融合した多目的ミムティクアルゴリズムを開発した。前者は、多目的最適化問題においてパレート解集合を求める手法であり、後者はパレート解集合の改善を行う手法である。また、負荷変動や再生可能エネルギー(例えば風力発電)によるノード電力の不確定性があるため、確率的供給信頼度指標 EENS(Expected Energy Not Supplied)を考慮した手法について研究した。さらに、与えられた系統を複数のサブシステムに分割する系統分割法について研究した。

研究成果の概要(英文)：In this project, transmission network expansion planning methods have been studied with multi-objective metaheuristics that calculates a set of the Pareto solutions in multi-objective optimization problems. To improve the performance of multi-objective metaheuristics, this project proposed a sort of Memetic Algorithm that integrates multi-objective metaheuristics of the GA-based method with metaheuristics. The former was used to evaluate a set of the Pareto solutions while the latter was utilized to improve the obtained Pareto solution set. Also, probabilistic power supply reliability index EENS (Expected Energy Not Supplied) was considered to deal with the uncertainties due to the changes of load and/or renewable energy such as wind farms in transmission networks. Furthermore, the network decomposition methods were studied to obtain the optimal subnetworks efficiently.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：多目的最適化 進化的計算 メタヒューリスティクス パレート解 送電ネットワーク拡張計画 確率  
の供給信頼度 不確定性 モンテカルロシミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 2009年初頭、米国オバマ政権により、提案されたグリーンニューディール政策の目玉として、低炭素化社会を構築するための次世代電力網のスマートグリッドが脚光をあびている。スマートグリッドの目的は、多種多様であるが、電力ネットワーク運用・計画の視点から省エネルギー、電力ネットワークの安定度・信頼度の向上、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの分散電源導入、競争環境下の電気事業のコスト削減、需要応答制度の導入による電力負荷のピークカット、CO<sub>2</sub>排出削減による地球温暖化への対応が期待されていた。

(2) 従来型の送電ネットワーク拡張計画について目をむけると、従来型法は、一つ時間断面において、将来予想される一定の発電量と負荷量に対して、直流潮流計算およびの制約下で送電線の設置コストを最小化することである。その際、問題の定式化は、単一目的関数を制約付き組合せ最適化問題として表現されて来た。また、送電線の設置場所とその本数を決定する組合せ最適化問題は、容易に解くことができないことが知られているが、コスト削減の見地から、大域的最適値あるいはその高精度近似解を求める必要性がある。そのような要望を満足する手法としてメタヒューリスティクスがある。メタヒューリスティクスとは、単純なルールや発見的な手法(ヒューリスティクス)を反復的に使用して大域的最適値あるいはその高精度近似解を求める最適化手法の総称である。

(3) 従来法の送電ネットワーク拡張計画では、複数の目的関数を評価するために、複数の目的関数を重み付き目的関数の総和で表現するスカラー化された目的関数に変換していた。しかし、その手法について次の問題が指摘されてきた。

- a) 重み付き目的関数の総和の重みの決定法が明確でないため、試行錯誤で決められている。
- b) 得られる解が一つであるため、代替となる解がない。
- c) 複数の目的関数間の関係が明確でないため、実行可能解の分布がどのようになっているか分からない。

## 2. 研究の目的

本研究では送電系統拡張計画において進化的計算のGAにもとづいた多目的進化的計算法を用いて多目的最適化問題における解集合であるパレート解集合を系統的に求める手法を提案した。送電ネットワーク拡張計画のコスト削減と確率的供給信頼度指標EENS (Expected Energy Not Supplied) の

2つの目的関数を最小化するために、発電機と送電線の事故確率を反映した確率的シミュレーションであるモンテカルロシミュレーションを送電ネットワーク拡張計画法として実施する。その際、大域的最適値の高精度近似解を求める手法のための多目的メタヒューリスティクス手法について新しい手法を開発した。多目的メタヒューリスティクス手法としてはSPEA2 (Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm)、MA (Memetic Algorithm) などに基づく手法について検討した。

## 3. 研究の方法

(1) 多目的最適化問題のパレート解集合を求めるために多目的メタヒューリスティクスについて検討した。多目的メタヒューリスティクスはGA(遺伝的アルゴリズム)に基づいている手法であるため、パラメータ設定の困難さ、局所解に陥ることが欠点として挙げることができる。そこで、GAの欠点を克服するためにMAを思いついた。MAとは、GAに局所探索法を組み合わせた手法である。具体的にはMAは「GAで最終的得られた解に局所探索法を用いて解の改善をする手法」と「GAの1回の解探索過程で解の改善を行う手法」に大別されるが、計算時間削減のため前者の「GAで最終的得られた解に局所探索法を用いて解の改善をする手法」を多目的メタヒューリスティクス手法に適用する手法を採用した。

(2) 確率的信頼度指標EENSの評価のためにモンテカルロシミュレーションの計算が必要なため、その効率化について研究した。計算には送電ネットワークのノード指定値に存在する相関を考慮することによって、モンテカルロシミュレーションの計算時間を削減することを検討するモーメント調整について調査検討した。また、実測された風力発電の出力データに基づき、風力発電出力の離散分布を作成し、その分布を乱数として発生させる乱数発生を研究した。相関を考慮したモンテカルロシミュレーションを実施することにより、モンテカルロシミュレーションの計算時間を削減することが期待される。

(3) モンテカルロシミュレーションで確率的信頼度指標EENSを求める手法の代替案として、多目的メタヒューリスティクス手法の適用について研究した。確率的信頼度指標EENSの計算時間が短縮できることが予想できた。

(4) 送電ネットワークの規模が増大するにつれて送電ネットワーク拡張計画法は計算時間がかかるため、ネットワーク分割法を送電ネットワーク拡張計画法に導入することは有用と考える。そこで、送電ネットワーク

拡張計画のためのネットワーク分割法を多目的メタヒューリスティクス手法で研究した。

#### 4. 研究成果

(1) ウインドファームを考慮した送電ネットワーク拡張計画法を提案した。提案法は多目的メタヒューリスティクスの SPEA2 の改良法を用いて多目的最適化問題として定式化された。従来の SPEA2 と提案法の相違点は以下の通りである。従来の SPEA2 は GA (遺伝的アルゴリズム) に基づいている手法であるため、複雑な問題では局所解に陥ることがしばしばある。その問題点を解決するために SPEA2 で得られた解を初期値として解探索するメタヒューリスティクスの TS (Tabu Search) を組み合わせることにより、解探索を向上させた改良型 SPEA2 を用いたことである。この多目的最適化問題の目的関数として、送電ネットワークにおける送電線の設置コストと確率的信頼度指標 EENS が最適化された。確率的信頼度指標 EENS を評価するために従来法の送電ネットワーク拡張計画法とは異なり、複数の系統状態を発生するモンテカルロシミュレーション法を用いた。具体的には、モーメント調整法を用いて関連のある乱数を発生する手法を本問題に適用した。また、IEEE24 ノード送電ネットワーク(図1参照)においてノード1とノード2においてウインドファームが存在するものと仮定し、提案法を IEEE24 ノード送電システムに適用した結果、ウインドファームを考慮した提案法は、ウインドファームを考慮しない手法に比べて解の質が良いことを確認した。

(2) 送電ネットワークにおいて確率的供給信頼度評価を行うために解の多様性を考慮した多目的メタヒューリスティクスの SPEA2 を用いた新しい手法を提案した。送電ネットワークにおいて確率的供給信頼度評価を行う際、モンテカルロシミュレーション法が主流であったが計算時間に難点があった。そこで本研究では系統状態の発生確率と供給支障電力の2つの目的関数から構成される問題として、確率的供給信頼度評価を表現し、その2つの目的関数関係を明確化することを研究した。具体的には改良型 SPEA2 を用いて問題の評価を行った。提案する改良型 SPEA2 では解の多様化戦略を用いて系統状態の多様化を実現し、確率的信頼度指標の効率的な評価を可能にした。ここで、解の多様化戦略とは SPEA2 の次世代解集合生成において複数存在する現在の解に対して次世代解の生成禁止領域を設定することにより、多様な解が発生する仕組みを作り出したことである。提案法を IEEE24 ノード送電ネットワークに適用し、従来法と比較して収束特性について良好な結果が得られたことを確認した。

(3) 系統規模が大きくなるにつれて送電ネ

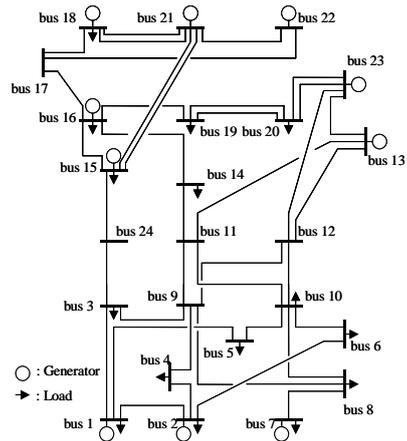


図1 IEEE 24 ノード送電ネットワーク

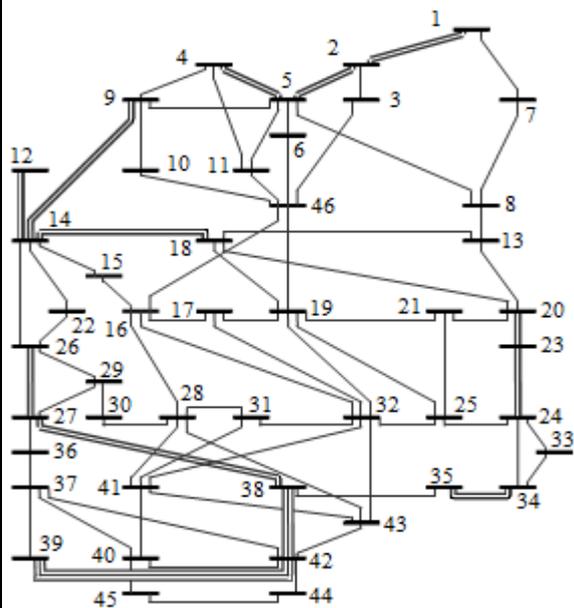


図2 46 ノード送電ネットワーク

ットワーク拡張計画は計算時間が必要となり、計画が困難となることが知られている。そこで、送電ネットワークをサブネットワークに分割して階層的最適化を行うことによって、計算時間の短縮することが考えられることができる。具体的には送電ネットワークを分割する手法として、多目的メタヒューリスティクスの SPEA2 の応用について研究した。目的関数としてはサブネットワークに存在するノード数の均等化、サブネットワーク間のカットセット数最小化、サブネットワーク内において発電と負荷の均等化の偏差最小化の3つを考慮した。ここで、カットセットとはサブネットワーク間に存在するブランチ数、即ち送電線の本数である。また、従来の SPEA2 の解精度を向上させるために、SPEA2

の解に局所探索法の山登り法を適用することを提案した。提案する手法を46ノード送電ネットワーク(図2参照)に適用し、そのネットワークを4つのサブネットワークに分割する問題に適用した結果、SPEA2よりも良好な解を得ることができた。

#### 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 4 件)

- ① Tatsuki Nakadoi and Hiroyuki Mori, “Multi-objective Metaheuristics for Network Decomposition,” Proc. of ISAP2013 (17-th International Conference on Applications of Intelligent Systems) (6 pages), Tokyo, Japan (2013-7). (査読有り)
- ② 角田広樹, 森 啓之: 「解の多様性を考慮した改良型 SPEA2 による確率的供給信頼度評価」, 電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 1, pp. 125-132 (2012-1) (<http://dx.doi.org/10.1541/ieejpes.132.125>). (査読有り)
- ③ Hiroyuki Mori and Hiroki Kakuta, “Multi-objective Transmission Network Expansion Planning in Consideration of Wind Farms,” Proc. of IEEE PES ISGT Europe 2011, 7 pages, Manchester, UK (2011-12) (<http://dx.doi.org/10.1109/ISGTEUROPE.2011.6162676>). (査読有り)
- ④ Hiroyuki Mori and Hiroki Kakuta, “Modified SPEA2 for Probabilistic Reliability Assessment in Smart Grids,” Procedia Computer Science (Elsevier), Vol. 6 (Complex Adaptive Systems), pp. 435-440, (2011-11) (<http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2011.08.082>). (査読有り)

[学会発表] (計 9 件)

- ① 中土居樹, 森 啓之: 「多目的 Memetic Algorithm の系統分割への応用」, 平成 26 年電気学会全国大会予稿集, 講演番号 6-047, 愛媛大学 (2014-3) .
- ② 角田広樹, 森 啓之, 田村滋, 福山良和: 「多目的メタヒューリスティクスの送電系統拡張計画への応用」, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 113, No. 362, pp. 5-8, SSS2013-29, 明治大学、東京 (2013-12).
- ③ 中土居樹, 森 啓之: 「送電系統分割の多目的最適化」, 平成 25 年電気学会全国大会予稿集, 講演番号 6-031, 名古屋大学 (2013-3) .
- ④ Tatsuki Nakadoi and Hiroyuki Mori, “A Hierarchical Optimization Approach to Large-scale Transmission Network Expansion Planning,” presented at

2012 International Conference on Modeling, Analysis and Simulation (ICMAS 2012), Meiji University, Tokyo, Japan (2012-11).

- ⑤ 中土居樹, 森 啓之: 「DR を考慮した送電系統拡張計画」, 平成 24 年電力技術・電力系術合同研究会, 資料番号 PE-12-143/PSE-12-159 東京大学 (2012-8) .
- ⑥ 角田広樹, 森 啓之: 「スマートグリッド環境下におけるウインドファームを考慮した多目的送電系統拡充計画測」, 2011 年度第 1 回電気学会東京支部神奈川支所研究発表会, 講演番号 TK-0000216, 慶応大学 (2012-2) .
- ⑦ 角田広樹, 森 啓之: 「GRASP-SPEA2 による負荷の不確定性を考慮した多目的送電系統拡充計画」, 平成 24 年電気学会全国大会予稿集, 論文番号 6-044, 広島工業大学 (2012-03) .
- ⑧ 角田広樹, 森 啓之: 「解の多様性を考慮した多目的メタヒューリスティクスによる確率的供給信頼度評価」, 平成 23 年電気学会 B 部門大会, 論文 I, 論文番号 22, 福井大学 (2011-8) .
- ⑨ Hiroyuki Mori, “Multi-objective Meta-heuristics for ELD in Consideration of CO<sub>2</sub> Reduction,” Special Invited Session Seminar of Smart Grid of KIEE (韓国電気学会), Cheju Island, South Korea (2011-5).

[図書] (計 0 件)

[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: <http://www.isc.meiji.ac.jp/~hmori/pwr/>

○講習会講師: 森 啓之, 「電力システムへの多目的メタヒューリスティクスの応用」、関西電気関連学会専門講習会「電力システムの最適化技術: 入門から最先端まで」、中央電気倶楽部、大阪 (2013-05) . (<http://www2.iee.or.jp/ver2/kansai/sys/02-conference/05-13.html>)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 啓之 (MORI, Hiroyuki)  
明治大学・総合数理学部・教授  
研究者番号: 70174381

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

以上