電力系統におけるメタヒューリスティクス応用の動向

正 員 森 啓之*

Recent Trends on Applications of Meta-heuristics in Power Systems

Hiroyuki Mori*, Member

This article addresses applications of meta-heuristics to power systems. They are defined as an iterative solution search algorithm that makes use of simple rules or heuristics to obtain better solutions. In practice, they make use of both intensification and diversification functions. They aim at evaluating a highly accurate approximate solution around a global minimum in optimization problems. In recent years, studies on meta-heuristics have been positively made to solve the complicated optimization problems in power system operation and planning. In this paper, the recent trends on the applications of tabu search to power systems are discussed. Different strategies of tabu search are introduced to enhance the solution quality and computational efficiency.

キーワード：メタヒューリスティクス，組合せ最適化，大域的最適化

Keywords: meta-heuristics, combinatorial optimization, global optimization

1. まえがき

電力系統が多様化するにつれて最適化計算はますます重要となっている。複雑な問題を解く解法に対して、得られる解の質が解の精度及び計算効率の両面からの検討が従来よりも一層必要となっている。そのような解法に対する要望を満足する手法としてメタヒューリスティクス (meta-heuristics) が期待されている。メタヒューリスティクスの登場により、工学における最適化計算に新しいパラダイムが築かれつつある。本稿では、電力系統におけるメタヒューリスティクス応用について述べる。

2. メタヒューリスティクス

〈2・1〉メタヒューリスティクスの定義 メタヒューリスティクスは、インテリジェントシステムにおける手法の1つとして見ることができる。図1において、左側の楕円は各種インテリジェントシステムを示し、右側の四角はインテリジェントシステムの役割を示す。電力系統におけるインテリジェントシステムとして、エキスパートシステム⁽¹⁾⁽⁴⁾、ニューラルネットワーク⁽²⁾、ファジー論理⁽³⁾、メタヒューリスティクス⁽⁵⁾⁽⁶⁾の上から下の順番について研

図1 インテリジェントシステムの役割

Fig. 1. Role of intelligent systems.

究されて来た。エキスパートシステムは、推論 (Inference) を処理し、ニューラルネットワークは、学習 (Learning)、分類 (Classification)、最適化 (Optimization) を行うことができる。また、ファジー論理は、推論、学習、分類、最適化と結びつきがあり、多岐に利用されている。図1に示す様に、メタヒューリスティクスは最適化のための手法であり、従来の手法と異なり局所的最適解ではなくて大域的な最適解あるいはその高精度近似解を評価することを目的としている。最適化計算アルゴリズムとして、メタヒューリスティクスとは、最適化問題において、単純なルールある

* 明治大学理工学部電気電子工学科
〒274-8571 川崎市多摩区東三田 1-1-1
Department of Electrical & Electronics Engineering,
School of Science & Technology, Meiji University
1-1-1, Higashimita, Tama-ku, Kawasaki 214-8571

表 1 代表的なメタヒューリスティクスの特徴

Table 1. Features of typical meta-heuristics.

Method	Analogies	Parameters	Search Process	Solution Quality	CPU-time
SA	Annealing	-Initial Temperature -Cooling Schedule -Convergence Criterion	Probabilistic	△	×
GA	Natural Selection	-No. of Populations -No. of Generations -Crossover Rate -Mutation Rate	Deterministic	△	△
TS	Adaptive Memory	-Tabu Length	Deterministic	○	○

Note) ○ : good △ : rather × : not good

図 2 メタヒューリスティクスの探索過程の概念

Fig. 2. Concept of search process in meta-heuristics.

いは発見的手法（ヒューリスティクス）を解の探索課程において反復して使用することにより、質の良い解を評価する手法の総称である⁽¹⁰⁾。換言すると、最適化アルゴリズムで使用されるヒューリスティクスに制御パラメータを導入し、それにより生ずる自由度を用いて柔軟に良質の解、即ち、大域的最適解あるいはその高精度近似解を探索する手法をメタヒューリスティクスと呼ぶ。

〈2・2〉 代表的なアルゴリズム メタヒューリスティクスとして次の3つの代表的なアルゴリズムについて述べる。

- (a) シミュレイトッドアニーリング (SA : Simulated Annealing)⁽⁷⁾
- (b) 遺伝的アルゴリズム (GA : Genetic Algorithm)⁽⁸⁾
- (c) タブサーチ (TS : Tabu Search)⁽⁹⁾

SA は金属の焼きなまし過程を最適化のアルゴリズムへ導入した手法である。SA は確率を用い、解を得るまでに非常に長い計算時間を必要とするため、大規模な組合せ最適化問題に対して有効とはいえない。GA は自然淘汰の過程を最適化手法へと導入した手法である。GA は良好な解を得るために、複数の遺伝パラメータの最適な値を決定する必要がある。また、確率を用いる手法であり、大規模な問題に対して有効であるとはいえない。一方、TS は決定するパラメータがタブレングスのみであり、確率を用いない確定的な手法である。表 1 は上記のアルゴリズムの特徴を示す。同表では、アルゴリズムの類似性、アルゴリズムのパラメータ、解の探索過程、得られる解の質、必要とする計算時間の特徴について SA, GA, TS の性質が要約され

表 2 各手法における集中探索と拡大探索の機能

Table 2. Intensification and diversification functions of each method.

Method	Intensification	Diversification
SA	Solution Space Limitation at Low Temperature	State Transition at High Temperature
GA	-Reproduction -Elite Strategy	-Crossover -Mutation
TS	Neighborhood Search	Tabu List

ている。また、メタヒューリスティクスのアルゴリズムに共通することは、次の2つの探索機能をもつことである。1つは、集中探索 (Intensification) であり、もう1つは拡大探索 (Diversification) である。前者は、ある良い解の近くには良い解が存在する可能性があるという事実に基づいて良い解の周辺を探索することであり、後者は解の多様性を保つために、ある局所解に留まることを防止する方策である。図 2 のようにこの機能を繰り返す行いによって良い解を評価する。また、各手法における集中探索と拡大探索の機能を表 2 に示す。

3. 電力系統におけるメタヒューリスティクス

〈3・1〉 応 用 例 まず、配電系統におけるメタヒューリスティクスの応用例として、配電系統の最適ネットワーク構成⁽¹¹⁾、配電系統の損失最小化問題⁽¹³⁾⁽³³⁾、配電系統の負荷融通⁽¹⁷⁾⁽³¹⁾⁽⁴¹⁾、配電系統のキャパシタ配置問題⁽³⁴⁾、D-FACTS 配置問題⁽⁴²⁾ などがある。

また、送電系統におけるメタヒューリスティクスの応用例として、状態推定のトポロジー可観測性⁽¹²⁾、状態推定のメーター配置問題⁽²⁷⁾、発電機の ELD⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾、発電機の起動停止問題⁽²¹⁾⁽³⁵⁾⁽⁴³⁾⁽⁴⁵⁾、補修計画問題⁽²²⁾、電圧無効電力制御問題⁽¹⁸⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾⁽³³⁾⁽³⁷⁾⁽⁴⁶⁾、電力負荷予測⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾⁽²⁸⁾⁽³⁰⁾⁽³⁹⁾⁽⁴⁷⁾、FACTS 配置問題⁽³⁸⁾、送電線拡張問題⁽⁴⁰⁾⁽⁴⁸⁾ などがある。研究傾向としては、アルゴリズム性能の良さにより、TS による研究が主流になりつつある⁽⁶⁾⁽²⁹⁾⁽³⁶⁾。

(3・2) タブサーチのための種々の戦略 TS は, SA や GA と比較し大規模問題に対して有効である。しかし, さらに大規模な問題を解こうとすると, TS は問題規模の拡大に伴い近傍計算にかかる時間が増大し, 解の精度がタブレングスに依存する。それらを改善する手法として, タブサーチのための戦略を考える必要がある。これまで電力系統で TS を改善する戦略として次の手法が考案された。

- 1) 並列タブサーチ (23) (24) (30) (34) (38) (40)
- 2) ルールベースタブサーチ (32) (35)
- 3) リアクティブタブサーチ (31)
- 4) OO-TS (43) (47) (48) 及び OO-PTS (45) (46)
- 5) 階層型タブサーチ (46)
- 6) 戦略的振動付タブサーチ (44)

上記の 1) は, TS の近傍分割の並列化とタブレングスの多重化を考慮することによって, 計算効率の向上と解の多様化を維持し, TS の性能を改善した。上記の 2) は, 電力系統における問題の探索空間を削減するためにルールを導入することを考えた。ルールの導入により, 無駄な探索を削減することができた。上記の 3) は, 主に TS のパラメータのタブレングスを調節する手法を開発した。上記の 4) は, 確率理論導入することによって近傍作成を削減する手法を提案した。最良解よりも最良解に近い解を評価することに主眼を置いている。上記の 5) は, システムを階層的に分割することで計算時間を削減する手法を開発した。最後に, 上記の 6) は, 一時的に制約を逸脱した解を許容して解の多様化を維持するアルゴリズムを示した。

4. まとめ

本稿では, 電力系統のメタヒューリスティクスについて述べた。まず, メタヒューリスティクスの代表例として, シミュレイテッドアニーリング, 遺伝的アルゴリズム, タブサーチを概説した。アルゴリズムの性能の観点から, 今後, タブサーチを中心に電力系統の最適化の研究や実用化が行われると思われる。電力系統におけるメタヒューリスティクスの応用分野として, 配電系統と送電系統についての研究の応用例を紹介した。電力系統に適用されたタブサーチの計算時間と解の精度を向上させるための種々の戦略についても言及した。さらに, 電力系統のメタヒューリスティクス応用について深い関心がある方は文献 (6) をご一読頂ければ幸いである。

末筆ながら, 電力系統の最適化問題を理解する上で, 種々の助言を頂いた電力系統へのメタヒューリスティクス応用調査専門委員会のメンバーの方々に感謝します。

(平成 15 年 6 月 23 日受付)

文 献

- (1) 電気学会:「電力系統のエキスパートシステム」, 電気学会技術報告, No.339 (1990-6)
- (2) 電気学会:「電力系統へのニューラルネットワーク応用」, 電気学会技術報告, No.515 (1994-10)
- (3) 電気学会:「電力系統へのファジー技術の応用」, 電気学会技術報告, No.625 (1997-4)
- (4) 電気学会:「電力系統の知識工学実用化技術」, 電気学会技術報告, No.756 (1999-12)
- (5) 電気学会編: 遺伝アルゴリズムとニューラルネット, コロナ社 (1998-3)
- (6) 電気学会:「電力系統のメタヒューリスティクス応用技術」, 電気学会技術報告, No.923 (2003-6)
- (7) S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, and M.P. Vecchi: "Optimization by Simulated Annealing", *SCIENCE*, Vol.220, 671-680 (1983-5)
- (8) D.E. Goldberg: *Genetic Algorithm in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company (1989)
- (9) F. Glover: "Tabu Search, Part I", *ORSA Journal on Computing*, Vol.1, No.3, pp.190-206, Summer (1989)
- (10) I.H. Osman and J.P. Kelly (Eds.): *Meta-Heuristics: Theory & Applications*, Kluwer Academic Publishers (1996)
- (11) H.D. Chiang and R.J. Jumeau: "Optimal Network Reconfigurations in Distribution Systems: Part 1 a Formulations and a Solution Accuracy", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.5, No.4, pp.1902-1909 (1990-10)
- (12) H. Mori and H. Tanaka: "A Genetic Approach to Power System Topological Observability", *Proc. of IEEE ISCAS'91*, pp.1141-1144, Singapore (1991-6)
- (13) K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa, and T. Ishihara: "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution System Loss Minimum Re-Configuration", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol.5, No.4, pp.1902-1909 (1992-8)
- (14) H. Mori and K. Takeda: "Power System Decomposition Using a Simulated Evolution Technique", *Proc. of ICARCV'92*, pp.11.2.1-11.2.5, Singapore (1992-9)
- (15) H. Mori and T. Horiguchi: "A Method for Economic Load Dispatching Using a Genetic Algorithm", *Proc. of ICARCV'92*, pp.11.4.1-11.4.5, Singapore (1992-9)
- (16) H. Mori and T. Horiguchi: "A Genetic Algorithm Based Approach to Economic Load Dispatching", *Proc. of Second International Forum on ANNPS'93*, pp.151-156, Yokohama, Japan (1993-4)
- (17) Y. Fukuyama and Y. Ueki: "An Application of Genetic Algorithms to Service Restoration in Distribution Systems", *T. IEE Japan*, Vol.114-B, No.4, pp.361-366 (1994-4) (in Japanese)
- (18) 福山良和・植木芳照:「負荷融通問題への遺伝的アルゴリズムの適用」, 電学論 B, 114, 4, pp.361-366 (1994-4)
- (19) K. Iba: "Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol.5, No.4, pp.685-692 (1994-5)
- (20) H. Mori and K. Takeda: "Parallel Simulated Annealing for Power System Decomposition", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol.9, No.2, pp.789-795 (1994-5)
- (21) K. Nara, Y. Hayashi, Y. Yamafuji, H. Tanaka, J. Hagihara, S. Muto, S. Takaoka, and M. Sakuraoka: "A Tabu Search Algorithm for Determining Distribution Tie Lines", *Proc. of IEEE ISAP'96*, pp.266-270, Orlando, FL, USA (1996-2)
- (22) H. Mori and T. Usami: "Unit Commitment Using Tabu Search with Restricted Neighborhood", *Proc. of IEEE ISAP'96*, pp.422-427, Orlando, FL, USA (1996-2)
- (23) H. Kim, Y. Hayashi, and K. Nara: "An algorithm for thermal unit maintenance scheduling through combined use of GA, SA and TS", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol.12, No.1, pp.329-335 (1997-2)
- (24) H. Mori and T. Hayashi: "An Efficient Method for Capacitor Placement with Parallel Tabu Search", *Proc. of 1997 Intelligent Systems Application to Power Systems*, pp.387-391, Seoul, Korea (1997-7)
- (25) H. Mori and T. Hayashi: "New Parallel Tabu Search for Voltage and Reactive Power Control in Power Systems", *Proc. of IEEE ISCAS'98*, Vol.3, pp.431-434, Monterey, CA, USA (1998-5)
- (26) H. Mori: "A New System Optimization Method; Tabu Search with the Applications to Electric Power Systems", *System Control & Information*, Vol.42, No.7, pp.377-383 (1998-7) (in Japanese)
- (27) 森 啓之:「システム最適化の手法タブサーチ-電力システムへの応用」, システム制御情報学誌, 42, 7, pp.377-383 (1998-7)

- (26) H. Mori and Y. Sone: "A Simplified Fuzzy Inference Method with Tabu Search for Short-term Load Forecasting in Power Systems", Proc. of IEEE Conference on Decision and Control, Vol.4, pp.4240-4245, Tampa, FL, USA (1998-12)
- (27) H. Mori and O. Matsuzaki: "Application of Tabu Search to Meter Placement in Static State Estimation," *Int'l J. Engineering Intelligent Systems*, Vol.7, No.4, pp.203-208 (1999-12)
- (28) H. Mori, Y. Sone, D. Moridera, and T. Kondo: "Accumulative Effect of Discomfort Index for Fuzzy Short-term Load Forecasting", *Int'l J. Engineering Intelligent Systems*, Vol.7, No.4, pp.233-238 (1999-12)
- (29) H. Mori: "Recent Trends of Meta-Heuristics Applications in Power Systems", Proc. of 1999 IEEE International Conf. on Systems, Man and Cybernetics, Vol.6, pp.493-496, Tokyo, Japan (1999-10)
- (30) H. Mori, Y. Sone, D. Moridera, and T. Kondo: "A Parallel Tabu Search Based Fuzzy Inference for Short-term Load Forecasting", Proc. of 2000 IEEE PES Winter Meeting, Vol.3, pp.1702-1707, Singapore (2000-1)
- (31) Y. Fukuyama: "Reactive tabu search for distribution load transfer op", Proc. of 2000 IEEE PES Winter Meeting, Vol.2 pp.1301-1306 (2000-1)
- (32) H. Mori and O. Matsuzaki: "A Rule-Based Tabu Search Technique for Power System Decomposition", Proc. of 2000 IEEE PES Summer Meeting, Vol.4, pp.1990-1995, Seattle, WA, U.S.A (2000-7)
- (33) H. Mori and M. Takahashi: "Application of Ordinal Optimization Based Tabu Search to Voltage and Reactive Power Control in Electric Power Systems", in Vol.59, M. Mohammadian (Ed.), "Advances in Intelligent Systems: Theory and Applications", pp.221-226, IOS Press, Amsterdam, The Netherlands (2000-7)
- (34) H. Mori and Y. Ogita: "A Parallel Tabu Search Algorithm for Capacitor Placement", *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.8/9, pp.1194-1201 (2000-8/9) (in Japanese)
森 啓之・萩田能弘:「配電系統のキャパシタ配置法のための並列タブサーチアルゴリズム」, 電学論 B, **120**, 8/9, pp.1194-1201 (2000-8/9)
- (35) H. Mori and O. Matsuzaki: "Application of Priority-List-Embedded Tabu Search to Unit Commitment in Power Systems", *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.4, pp.535-541 (2001-4) (in Japanese)
森 啓之・松崎 理:「電力系統の発電機起動停止問題への優先リスト付きタブサーチの適用」, 電学論 B, **121**, 4, pp.535-541 (2001-4)
- (36) H. Mori and Y. Fukuyama: "Intelligent Systems in Power Systems: Met-heuristic Methods," *J. IEE Japan*, Vol.121, No.7, pp.454-457 (2001-7) (in Japanese)
森 啓之・福山良和:「電力系統におけるインテリジェントシステム: メタヒューリスティック手法」, 電学誌, **121**, 7, pp.454-457 (2001-7)
- (37) Y. Fukuyama and H.Y. Oshida: "A particle swarm optimization for reactive power and voltage control in electric power systems", Proc. of IEEE CEC 2001, Vol.1, pp.87-93, Seoul, Korea (2001-9)
- (38) H. Mori and Y. Goto: "Optimal Placement of UPFCs with Hybrid Coded Parallel Tabu Search", *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.12, pp.535-541 (2001-12) (in Japanese)
森 啓之・五島雄一郎:「ハイブリットコーディングを用いた並列タブサーチによる UPFC 最適配置問題の解法」, 電学論 B, **121**, 12, pp.1840-1848 (2001-12)
- (39) H. Mori, N. Kosemura, K. Ishiguro, and T. Kondo: "Short-term Load Forecasting with Fuzzy Optimal Regression Tree", *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.12, pp.535-541 (2001-4) (in Japanese)
森 啓之・小瀬村紀行・石黒健太・近藤 徹:「ファジィ最適回帰2進木を用いた短期電力負荷予測」, 電学論 B, **121**, pp.1849-1855 (2001-12)
- (40) H. Mori and Y. Sone: "A Parallel Tabu Search Based Approach to Transmission Network Expansion Planning", Proc. of 2001 IEEE PES PowerTech2001, Porto, Portugal (2001-9)
- (41) H. Mori and Y. Ogita: "A Parallel Tabu Search Based Approach to Optimal Network Reconfigurations for Service Restoration in Distribution Systems", Proc. of 2002 IEEE CSS CCA2002, pp.814-819, Glasgow, UK (2002-9)
- (42) H. Mori and H. Tani: "Two-Stage Tabu Search for Determining Optimal Allocation of D-FACTS in Radial Distribution Systems with Distributed Generation", Proc. of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, Vol.1, pp.56-61, Yokohama, Japan (2002-10)
- (43) 森 啓之・本間建臣:「Ordinal Optimization 法に基づくタブサーチの起動停止問題への適用」, 平成 13 年電気学会 B 部門大会, 論文 II, 論文番号 172 (2001-8)
- (44) Y. Hayashi, J. Matsuki, and H. Takano: "Determination Method for Loss-Minimum Distribution System Configuration Considering Disconnection of Installed Dispersed Generators", *T. IEE Japan*, Vol.122-B, No.12, pp.1376-1383 (2002-12) (in Japanese)
林 泰弘・松木純也・高野浩貴:「分散電源の n-1 解列を考慮した配電損失最小化構成の決定手法」, 電学論 B, **122**, 12, pp.1376-1383 (2002-12)
- (45) 森 啓之・須藤 晋:「OO-PTS を用いた発電機起動停止問題の解法」, 電気学会電力技術研資, PE-02-56, PSE-02-66 (2002-9)
- (46) 森 啓之・斉藤政人:「配電系統の電圧無効電力制御への階層的 OO-PTS の適用」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研資, PE-02-155/PSE-02-165 (2002-9)
- (47) 森 啓之・坂谷嘉則・藤野達郎・沼 一之:「ファジィ短期負荷予測への OO-TS 法の適用」, 平成 18 年電気学会全国大会, No.6-055 (2003-3)
- (48) 森 啓之・飯村吉典:「送電網拡張計画問題への OO-TS の適用」, 平成 15 年電気学会全国大会, No.6-061 (2003-3)。

森 啓之 (正員) 1985 年 3 月早稲田大学院博士課程修了。

工学博士。早稲田大学助手, 明治大学助手, 助教授を経て, 1995 年 10 月同教授, 現在に至る。その間, 1994 年 3 月より, 1995 年 4 月まで米国コーネル大学電気工学科客員準教授。2000 年 10 月より, 2002 年 9 月まで電気学会電力系統へのメタヒューリスティクス応用調査専門委員会委員長。電力系統の系統解析, インテリジェントシステムの研究に従事。IEEE, INNS, AAAI, ACM, SIAM 会員。