電力系統分野への最適化技術の適用
――新しい最適化技術「メタヒューリスティクス」の適用――

髙山 信一（たかやま しんいち） 林 巨己（はやし なおき） 福山 良和（ふくやま よしかず）

1 まえがき

電力系統は，大規模・複雑なネットワークと考えられ，さまざまな機器の複合的な動作によって，状態が時々刻々と変化していく動的なシステムである。このように大規模・複雑で，かつ動的なシステムを計画・運用するため，わが国の電力会社では，計画・運用のノウハウを蓄積した運用ルールを構築し世界で最も信頼性の高いシステムを作り上げてきた。

このような電力系統の計画・運用においては，対象業務の遂行に対して，適切な計画案および運用操作（対象問題に対する解）を求めることが必要である。また，有効な解の中から最適な解を求める探索技術が必要となる。この探索技術に対しては，従来，発見的アルゴリズム（ロジック），エキスパートシステム，ファジィ理論，ニューラルネットワーク，数理計画法などのさまざまな手法が利用されてきた[(1)(2)]。初期の段階では，対象問題を純粋に数学的な定式化を行うことにより簡略化して考える数理計画法や，さまざまなノウハウや運用ルールを発見的なアルゴリズムとして，プログラム化する方法により解決してきた。その後，1980年代から，ノウハウや運用ルールを明示的な知識として記述することにより問題解決を行うエキスパートシステムやファジィ理論が利用されてきている。また，状態変数に対する解の多くを学習することにより，ある状態変数に対する解を得るニューラルネットワークも利用されてきている。しかし，数学的な数理計画法では，ノウハウや運用ルールを式としてうまく表現できず，簡略化せざるを得ない場合があるという根本的な問題がある。また，ノウハウをうまく表現した発見的アルゴリズム（ヒューリスティクス），ファジィ理論，ニューラルネットワークなどでは，最適な解を得る保証がなく，検討していなかったケースについてどのような解が得られるか分からないという問題があった。つまり，ノウハウや運用ルールを考慮でき，かつ最適化が可能な方法というものが電力系統分野では切望されている。

このような背景において，1970年代から開発されてきたメタヒューリスティクス（MH：Meta-Heuristics，688ページの「解説」参照）が脚光を浴びている。MHは，物理現象や生物・生命にかかわる動きの模擬など，自然のプロセスを最適化問題に利用する手法である[(2)]。この手法には，遺伝子の世代交代をまねた遺伝的アルゴリズム（GA：Genetic Algorithm[(3)]），金属の焼なまし現象をまねたシミュレーティッドアニーリング（SA：Simulated Annealing[(4)]），人間の経験に基づいたタブサーチ（TS：Tabu Search[(5)]），動物の群れの動きをまねたパーティクルスワームオプティミゼーション（PSO：Particle Swarm Optimization[(6)]）などが含まれる。これらのMHでは，従来の数理計画法のように数式で表現できるものしか扱えないという制約がなく，計画・運用のノウハウやルールなどを容易に扱うことができ，かつ対象とする目的関数を最大・最小化することが可能である。したがって，従来法の欠点を克服できる最適化手法として有望な手法と考えられている。

本稿では，MHの基本的な特性などについて述べ，富士電機が手がけているMHの電力系統への適用例について述べる。

2 新しい最適化技術「メタヒューリスティクス」

従来のヒューリスティクスは，問題に依存したノウハウなどをそのまま表現していた。これに対し，MHは，物理現象や生物・生命にかかわる動きの模擬を利用して，問題に依存しない一般的な探索の枠組みを提供する手法である。

上述のように，MHには，GA，SA，TS，PSOなどのさまざまな手法がある。GAは問題を遺伝子で表現し，複数の遺伝子を用いた交差・突然変異などの遺伝子操作および自然淘汰（とうた）による世代交代により解を探索する。SAは，鉄が液体状態から固体状態に冷えて固まる際に，分子レベルでは振動が徐々に小さくなりエネルギー最小の状態になることを模擬して解を探索する。TSは，前に探索した解に戻ることをタブー（禁止）として，タブーとなる解のリスト（タブーリスト）を利用して解を探索する。PSOは，渡り鳥などの群れがうまく集団で飛んでいく様子や，人間の集団が個人の情報を集団内でうまく共有しな

髙山 信一

電力・産業分野のソリューション技術に関する研究開発に従事。現在，事業開発室ITソリューション部。電気学会会員。

林 巨己

電力分野のソリューション技術に関する研究開発に従事。現在，事業開発室ITソリューション部。電気学会会員。

福山 良和

電力・産業分野のソリューション技術に関する研究開発に従事。現在，事業開発室ITソリューション部担当課長。工学博士。電気学会会員，IEEE会員。

がら解を導き出す過程を模擬することにより解を探索する。それぞれの手法の比較を**表1**に示す。

GA が1970年代と最も古いが，他の手法は1980年代，1990年代に入ってから開発された発展途上の手法である。組合せ最適化問題とは，さまざまな解の組合せ（例えば，発電機10台の中から起動する 2 台を選択する組合せなど）の中から最適な組合せを見つける問題であり，連続型最適化問題とは，連続変数（例えば，10台の発電機おのおのの経済的な有効電力出力値など）の中から最適な値を見つける問題である。また，混合整数非線形最適化問題とは，離散変数（例えば，変圧器のタップ値など）と連続変数を両方含むような状態変数に対して，最適な値の組合せを見つける問題である。電力系統では，タップなどの離散量と発電機の有効電力出力値などの連続量を両方考慮する必要がある場合などが多く，電力系統の問題の多くは，本質的には混合整数非線形最適化問題となる。

GA，SA，TS は離散変数を利用した組合せ最適化問題に適用可能であり，PSO は連続型最適化問題，および混合整数非線形最適化問題に適用可能であり，手法ごとに適用できる対象問題が異なる。一般的には，TS および PSO により短時間に良質な解を得ることが可能である。

GA は近年，多目的最適化問題（目的関数が多数ある問題，例えば，環境への配慮とコスト削減を同時に実現したいなど）への適用有効性が検討されている。さらに，島モデルを用いる並列遺伝的アルゴリズム（PGA：Parallel Genetic Algorithm）により良質な解が得られることが知られている[7]。SA は，探索点を多数にすることにより，解の探索能力を飛躍的に高めたパラレル SA（PSA：Parallel Simulated Annealing）などの改良手法が開発されている[8]。TS は，タブーとする解の数を事前にパラメータとして設定する必要があるが，これを適応的に変更することにより，解がサイクリックになってしまうことを回避するリアクティブ TS（RTS：Reactive Tabu Search[8]）などの改良手法が開発されている。PSO は，GA の自然淘汰の概念を組み合わせたハイブリッド PSO（HPSO：Hybrid Particle Swarm Optimization）などの改良手法が開発されつつある[9]。

3　メタヒューリスティクスの電力系統への適用例

富士電機では，電力系統分野のさまざまな問題に対して MH の適用を試みている。以下に適用を検討している分野例と手法をあげる。

(1)　発電機の最適導入計画（PGA[7]）
(2)　送電系統の電圧無効電力制御（VQC）（RTS，PSO[10]）
(3)　配電系統のロス最小化（GA，RTS[11][12]）
(4)　配電系統の事故時負荷融通（GA，PGA，TS，RTS，PSA[8][13][14]）
(5)　配電系統の長期設備増強計画（RTS[15]）
(6)　配電系統の状態推定（PSO，HPSO[9]）
(7)　配電系統の電圧制御機器の最適整定（RTS[16]）

上記の分野のうち，(2)〜(7)は関西電力(株)との共同研究で適用検討を行ってきており，(3)は関西電力(株)の営業所にて実用化されている。以下，例として，(2)(5)について述べる。

3.1　送電系統の VQC への適用例[10]

VQC は，無効電力の供給とのバランスを考慮したうえで，時々刻々変化する送電系統内の負荷に追従して電圧の適正維持，電圧安定性維持を行うオンライン制御である。VQC は，発電機励磁系の自動電圧調整器（AVR）の電圧指令値などの連続（実数）変数と，変圧器タップ制御系の負荷時タップ切換装置（OLTC）タップ位置，調相設備導入台数などの離散（整数）変数を含む混合変数を用いて，経済運用を考慮したロスミニマムなどを目的関数とする混合整数非線形最適化問題として定式化できる。従来，VQC は，すべてを連続変数として計算を行い，離散値については得られた連続解から隣接の離散値を解とするアプローチか，連続変数を離散値としてすべて離散型の最適化問題として計算を行うアプローチか，または離散値を扱えるような計算手法を組み合わせた数理計画的アプローチなどによって実現されてきた。このような VQC 問題に対し，電圧信頼度を考慮して PSO により高速で良質な解を生成す

表1　MH の比較

項目＼手法	GA	SA	TS	PSO
開発時期	1970年代	1983年	1989年	1995年
対象問題	組合せ最適化問題	組合せ最適化問題	組合せ最適化問題	連続型最適化問題 混合整数非線形最適化問題
状態変数	離散変数	離散変数	離散変数	連続変数 離散変数
探索点数	多点探索	1点探索	1点探索	多点探索
解の保証	解全体が良い方向に行くことは数学的に保証されている。	大域最適解が得られることが数学的に保証されている。	数学的な保証はない。	探索の振舞いを数学的に解析する試みが始められている。
実行時間	やや長い	長い	短い	短い
特　徴	近年は，多目的最適化問題への適用有効性が検討されている。	長時間をかければ良質な解が得られる。	組合せ最適化問題に対し，一般的にGA，SAより短時間に良質な解が得られる。	従来法では解を求めることが困難であった混合整数非線形最適化問題に対し，短時間で良質な解が得られる。

る方式を開発した。

開発方式は連続・離散の両方の各変数の初期値をランダムに生成し，PSO を用いた多点探索を行い，制御候補を生成する。以下に制御候補生成の定式化をまとめる。

(1) 状態変数
- ○AVR の電圧指令値（連続値）：
  潮流計算の P–V 指定ノードとして扱う。
- ○OLTC タップ値（離散値）：
  潮流計算のタップ比として扱う。
- ○調相設備（SC など）の導入台数（離散値）：
  各ノードのサセプタンス値として扱う。

(2) 目的関数
- ○対象系統の全系ロス最小化

(3) 制約条件
- ○母線電圧上下限制約
- ○線路潮流上限制約
- ○電圧信頼度制約

オリジナルの PSO は，連続型最適化問題に適用可能であるが，本適用において混合整数非線形最適化問題へ適用可能なように拡張し用いた。**図１**に混合整数非線形最適化問題となる VQC 問題の解空間における PSO の探索概念を示す。

開発した方式では，生成した各制御候補に対し，最終的に電圧信頼度を考慮して制御方法を選択している。電圧信頼度評価では，発電機出力増加，負荷増加，制御機器動作シナリオを考慮して P–V カーブを計算することにより，現在の運用点と電圧崩壊点の差である負荷増加の余裕値（MW）を計算できる連続型潮流計算（CPFLOW 法）を用いている。この電圧信頼度評価では，過酷事故を見いだし，この過酷事故に対する信頼度確保が可能かどうかを判定することで，規定の信頼度が得られる最良解を最終的な制御方策として出力している。過酷事故を見いだすのに各種シナリオを考慮したＰ–Ｖカーブを二次関数で近似して高速に負荷増加の余裕値（MW）を計算する Look–Ahead 法を用いている。信頼度確保の可否判断では詳細なシナリオを考慮した CPFLOW 法によっている。**図２**に，開発した VQC アルゴリズムを示す。

IEEE14 母線系統と実規模 112 母線系統を用いてシミュレーション検証し，開発方式（PSO）と RTS あるいは列挙法との比較を行った。いずれの母線系統でも開発方式は RTS および列挙法よりロスが少なく，計算時間については，RTS より高速となり PSO の有効性が確認されている。なお，VQC 問題は，混合整数非線形最適化問題であるが，RTS を適用する場合，発電機の AVR 電圧指令値を離散値のみ指定できると仮定することで，組合せ最適化問題と見なしている。**表２**にロス最小化結果および計算時間を示す。また，**図３**に実規模 112 母線系統に対する典型的な収束例を示す。

実規模 112 母線系統に対する Look–Ahead 法による想定事故のランキングの計算時間は11秒（対象想定事故 112 ケース）であり，CPFLOW 法の１回の計算は２秒であった。よって，過酷事故３ケースのみ詳細計算を実行したとすると，電圧信頼度計算の時間は合計17秒となる。したがって，全体の計算時間は，PSO による制御候補の生成にかかる54秒と電圧信頼度計算にかかる17秒を合計し，71

図１　VQC 問題の解空間における PSO の探索概念

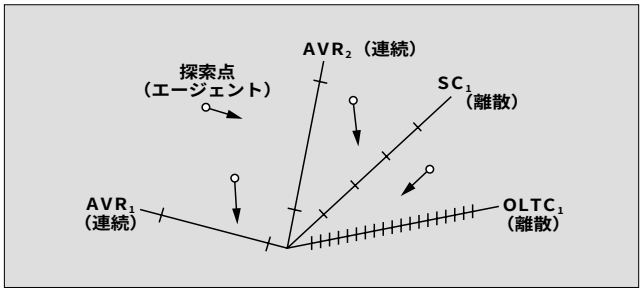


図２　開発した VQC アルゴリズム

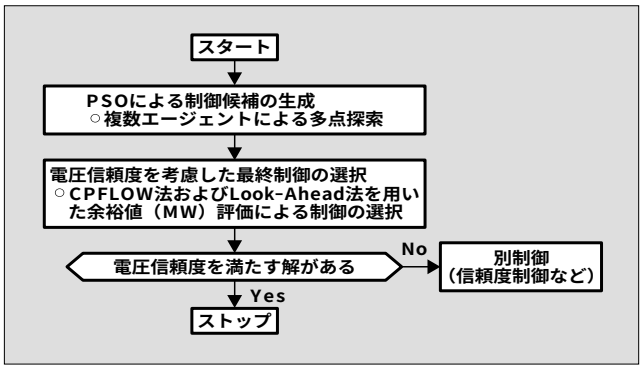
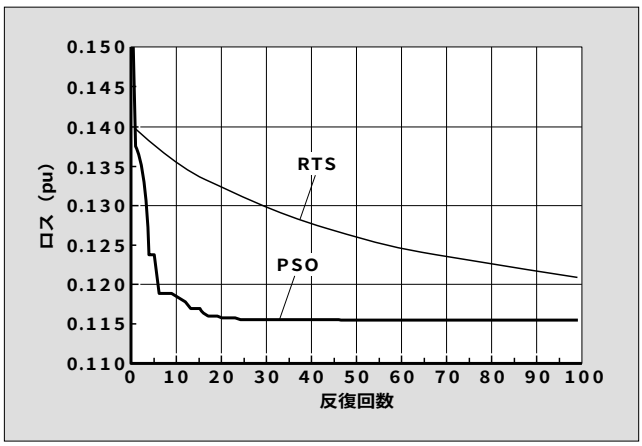


表２　開発方式と RTS によるロス最小化結果および計算時間

項目 ＼ 母線系統		IEEE14 母線系統	実規模112 母線系統
開発方式	ロス最良値（pu）	0.1323276	0.1134947
	ロス平均値（pu）	0.1335090	0.1175230
	計算時間（s）	16.5	54.2
RTS	ロス最良値（pu）	0.1323657	0.1208179
	計算時間（s）	19.5	220.3

ロス値：全系ロス
計算時間：平均実行時間（試行回数は100回）

図３　実規模 112 母線系統に対する典型的な収束例



秒となる。このようにVQC問題は，RTSなどを用いた組合せ最適化問題として考えるのではなく，混合整数非線形最適化問題としてそのままPSOによる適用を検討した方が効率的であることが分かる。

3.2 配電系統の長期設備増強計画への適用例[15]

負荷電力の増加や負荷新設に伴う配電系統の設備増強にあたっては，配電設備工事コスト，配電線利用率，供給信頼度，電線ロスなどを総合的に評価したうえで最適設備増強計画案および最適系統構成を決定する必要がある。ついては，長期間（例えば10年）にわたる設備増強コストと電線ロスなどを総合的に評価し，フィーダや区間の最大電流制約，電圧（最小）制約を満足させつつ，計画期間における総合経費（＝ロスコストと年経費化した工事費との合計）を最小に仕上げる配電系統設備増強計画案を策定する方法を開発した。

電気料金の低減や省エネルギー化による環境保全が叫ばれるようになり，配電系統の効率的運用，設備増強コストの低減が求められている。配電系統においてこれに効果的に対応するためには，フィーダ，連系・区間スイッチ，連系線の新設，および既設配電線の太線化，ステップ式自動電圧調整器（SVR）の新設といったさまざまな種類の工事を増強の目的に応じて適切に組み合わせて設備増強案を検討する必要がある。他方，長期計画においては，評価期間において増強が必要となる都度この組合せ検討を行い，設備増強コストと配電系統でのロスコストを合わせて評価しなければならない。つまり，さまざまな制約下において，幾とおりもの組合せの系統増強シナリオを大域的に探索する必要がある。

また，各年度の系統においては，事故時復旧への対応可能性および常時系統のロス最小化を検討する必要がある。事故時負荷融通における復旧系統およびロス最小化系統構成の探索は，対象系統内のスイッチの入切を変更することにより求めることができる組合せ最適化問題となる。つまり，配電系統の長期設備増強計画は，目的の異なるさまざまな組合せ最適化問題を解き，各目的関数の最適状態（または制約条件）を同時達成できる状態を求めることにより，実現できる。

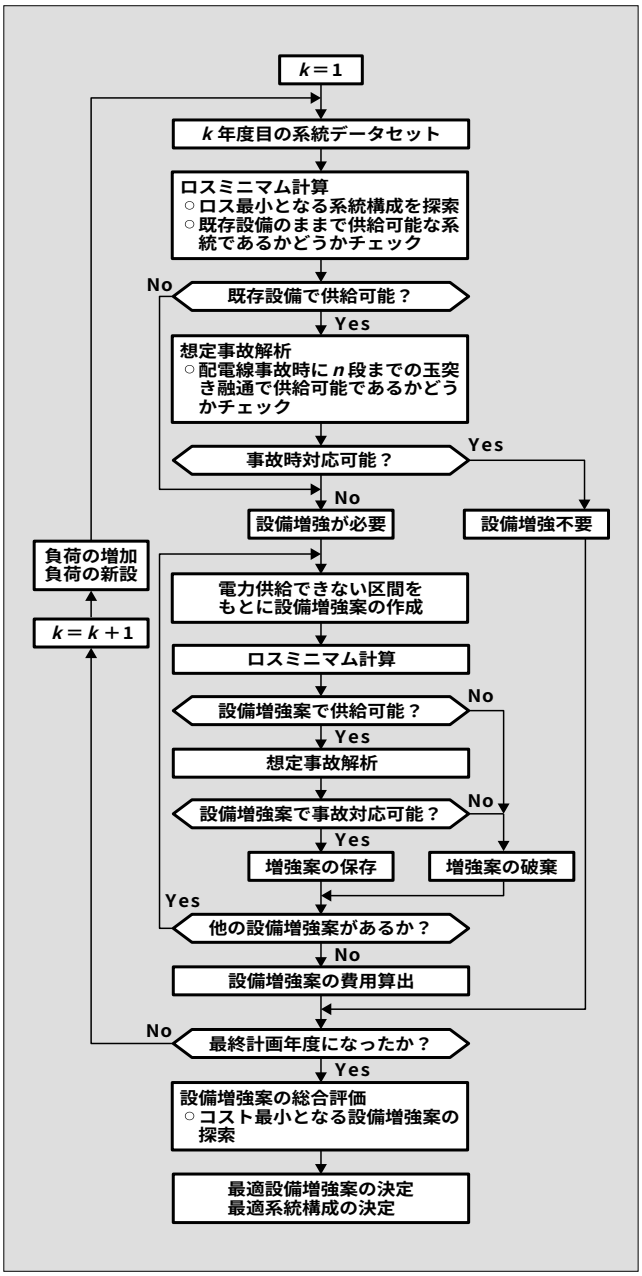
図4に開発した長期設備増強計画のアルゴリズムを示す。適用する工事案の選定にはエキスパートシステム，想定事故解析（事故時負荷融通可能性の検討）およびロスミニマム計算（ロス最小化系統構成の作成）には，RTSを用いている。また，電圧・電流の基本計算には，三相不平衡潮流計算を用いている。以下，事故時負荷融通の復旧目標系統の生成を例として，RTSの定式化を述べる。

(1) 状態変数
- ○対象系統の各区間の上流側区間番号（整数値）

(2) 目的関数
- ○電源供給予備力の平均化＋対象系統内の負荷区間最低電圧の最大化

(3) 制約条件

図4　長期設備増強計画のアルゴリズム



- ○放射状制約
- ○電源容量制約
- ○電圧制約
- ○フィーダ容量制約

システム全体の検証としては，EWS（Engineering Workstation）上に製作したシミュレーション用プログラム実行環境において，実系統を対象とした2フィーダ7区間から4フィーダ27区間まで6例のモデルケースについて10年間の設備増強計画を処理させることで実施した。**図5**に実配線系統モデルの例，**図6**にフィーダ分割と連系開閉器新設増強結果の例を示す。設備の増強遷移としてはおのおののケースについて5～16とおりの妥当な増強計画が得られている。これにかかる処理時間は80～830秒程度であり，シミュレーションレベルとしては有効かつ実用的である。

図５　実配電系統モデルの例

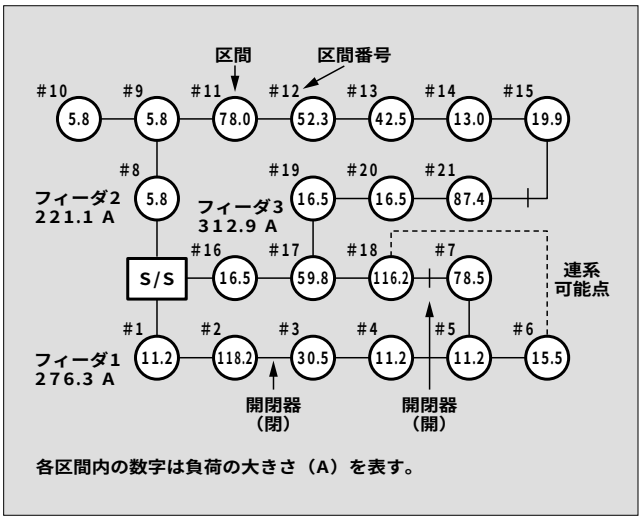
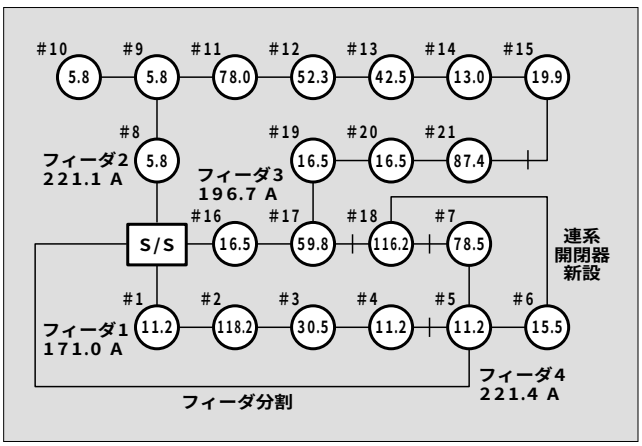


図６　フィーダ分割と連系開閉器新設増強結果の例



4　あとがき

本稿では，新しい最適化手法であるメタヒューリスティクスの電力系統分野への適用についての富士電機の取組みについて述べた。また，例として関西電力(株)と共同で開発したシステムについて述べた。

電力系統では，電力自由化の進展や高効率化の要求のために，ますますさまざまな問題を統合的に解いていく必要がでてくる。この際，大規模かつ複雑な問題に対して，運用ルールなどを考慮して短時間に良質な解を得るためには，今後ともメタヒューリスティクスの適用を検討していく必要があると考える。

参考文献

(1) 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ク手法――．電気学会雑誌．vol.121，no.7，2001，p.454-457.
(2) 奈良宏一，佐藤泰司．システム工学の数理手法．コロナ社．1995.
(3) Holland, J. Adaptation in Natural and Artificial Systems : An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. Bradford Books. 1975.
(4) Krikpatrick, S. et al. Optimization by Simulated Annealing. Science. vol.220，no.4598，1983，p.671-680.
(5) Glover, F. Tabu Search Part I. ORSA Journal of Computing. vol.1，no.3，1989.
(6) Kennedy, J. ; Eberhart, R. Particle Swarm Optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. vol. IV，1995，p.1942-1948.
(7) 福山良和ほか．パラレルプロセッサを用いた並列遺伝的アルゴリズムの電源計画問題への適用．電気学会論文誌 B. vol.114，no.12，1994，p.1250-1256.
(8) 不動弘幸ほか．負荷融通問題に対する Reactive Tabu Search の適用と GA 及び PSA との比較検討．電気学会論文誌B．vol.119，no.3，1999，p.317-325.
(9) 仲成規ほか．実系統機器の特性を考慮した配電系統状態推定方式の検討．電気学会論文誌B．vol.120，no.12，2000，p.1566-1572.
(10) 吉田裕守ほか．電圧信頼度を考慮した Particle Swarm Optimization による電圧無効電力制御方式の検討．電気学会論文誌B．vol.119，no.12，1999，p.1462-1469.
(11) 金守泰徳ほか．配電系統ロス低減機能の開発．電気評論．p.38-42，1998-3.
(12) 不動弘幸ほか．配電系統のロスミニマム問題に対する Reactive Tabu Search の適用．電気学会電力技術研究会．PE-97-32，1997.
(13) 福山良和ほか．負荷融通問題への遺伝的アルゴリズムの適用．電気学会論文誌 B. vol.114，no.4，1994，p.361-366.
(14) 福山良和ほか．並列遺伝的アルゴリズムの負荷融通問題への適用．電気学会電力技術研究会．PE-95-155，1995.
(15) 朝倉孝宜ほか．実配電系統を対象とした配電系統長期設備増強手法の開発．電気学会論文誌B. vol.120，no.12，2000，p.1574-1581.
(16) 仲成規ほか．分散電源の連系を考慮した電圧制御機器の最適整定の検討．電気学会論文誌B．vol.120，no.12，2000，p.1558-1565.

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。