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

正 員 森 啓之 (明治大) 学生員 松崎 理 (明治大)

Application of Priority-List-Embedded Tabu Search to Unit Commitment in Power Systems
Hiroyuki Mori, Member (Meiji University) and Osamu Matsuzaki, Student Member (Meiji University)

This paper proposes a tabu-search method with the priority list of generator for the unit commitment in power systems. Embedding the priority list into tabu search works to reduce the solution space efficiently. The unit commitment is formulated as a mixed-integer problem. In this paper, it may be decomposed into problems to determine on-off conditions and output of generator. The former is solved by tabu search while the latter is done by the equal-lambda method. This paper focuses on a fast and rigorous method for determining the on-off conditions in binary number. Tabu search is effective for solving a combinatorial optimization problem. However, it is inclined to time-consuming due to the increase of solution candidates in larger problems. Therefore, this paper proposes a tabu search technique that considers the priority list in the unit commitment. It allows to reduce computational effort drastically. The effectiveness of the proposed method is tested in sample systems.

キーワード：発電機起動停止問題，組合せ最適化問題，タブサーチ，発電機の優先リスト

1. まえがき

本稿は、電力系統の発電機起動停止問題に対し、発電機の優先リスト付きタブサーチを用いた解法を提案する。発電機起動停止問題は、事前に計算された負荷予測値を満足すると同時に、運用コストを最小化するような発電機群の運用計画を行う問題である。同時に発電機起動停止問題は、発電機や系統機器の特性、系統要求等による複数の制約を満足する必要がある。よって、問題の定式化は、離散変数である各発電機の起動・停止状態及び連続変数である発電機出力を最適化する制約付き最適化問題となる。発電機起動停止問題は近年の系統の大規模化、制約の多様化に伴い複雑化しており、効率良く良質の解を得る手法が望まれる。従来の発電機起動停止問題に対する主な解法は、優先リスト法^(1, 2)、動的計画法⁽³⁾、ラグランジェ緩和法⁽⁴⁾、メタヒューリスティクスを用いた解法⁽⁵⁻⁸⁾が存在する。優先リスト法は、事前の発電機試験等から設定された起動・停止順のリストに従い、起動・停止計画を行う。よって、優先リスト法は他の手法に比べ高速であるが、解の質は比較的劣る。動的計画法は、基本的に計画可能な組合せ全てを評価し、最適解を得る手法である。よって、問題規模の拡大に伴いいわゆる「組合せの爆発」が起こり、大規模問題への適用が容易でない。ラグランジェ緩和法は、燃料コスト関数を2次関数に近似し、最適解を求める解法である。ラグランジェ緩和法は、大規模問題にも適用可能で比較的良好な解を得る。しかし、評価関数の形が制限され、得られた解が局所的であるという問題がある。これに対し

近年、メタヒューリスティクスを用いた解法が注目されている。メタヒューリスティクスとは、簡単なヒューリスティックやルールを用いた解探索を反復し、最適化を行う手法である。メタヒューリスティクスが注目される主な理由を以下に示す。

- ① 局所解にとどまることなく大域的に解を探索すること、より質の良い解の探索を行う。
- ② 評価関数、制約の形や種類に依存せず、多様な目的、制約を扱うことが可能である。

代表的なメタヒューリスティクスとしては、シミュレティッドアニーリング (Simulated Annealing, 以下SAと略記)、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下GAと略記)、タブサーチ (Tabu Search, 以下TSと略記)が存在する。これらの手法の特徴を表1に示す。表中のSAは金属の焼き鈍し過程を模擬した最適化手法である⁽⁹⁾。反復毎に解をランダムに更新させ、その更新が解を改善するなら許容し、改悪する更新も温度パラメータに従い確率的に認める。SAは温度パラメータをゆっくりと冷却し、大域的最適解の近似解として十分良質な解を得る。しかしSAの適用において、良質の解を得るために膨大な計算時間を要することが、様々な論文から報告されている⁽¹³⁻¹⁷⁾。次に、GAは生物の進化の過程を模擬した最適化手法である⁽¹⁰⁾。GAの基本的な探索原理は、多数の個体による多点探索と、淘汰、交叉、突然変異を含む遺伝子操作による個体同士の相互作用である。しかし、GAの探索能力は、淘汰方式、交叉率、突然変異率

表1 代表的なメタヒューリスティクス

Table 1. Typical Meta-Heuristics

手法	概念	特徴
SA	金属の焼き鈍し過程	<ul style="list-style-type: none"> ・乱数を用いた解の更新機構 ・温度パラメータに従う解の山登り ・計算時間が膨大
GA	生物の進化	<ul style="list-style-type: none"> ・乱数を用いた多点探索 ・遺伝子操作による解の相互作用 ・探索パラメータの調整が困難
TS	ワーキングメモリ	<ul style="list-style-type: none"> ・確定的な解の近傍探索 ・メモリ機能に従う解の山登り ・問題規模拡大に伴い近傍が大化型

を含む多数の探索パラメータに依存するため、適切なパラメータの決定が容易でない。そこで、本稿ではこれらの手法よりも効率よく良質の解を得るTSに注目する。TSは人間の脳のワーキングメモリを模倣したメタヒューリスティクスである⁽¹¹⁾。ワーキングメモリは情報を一定期間記憶し、最新の情報が入力されると、最も古い情報を忘却する。TSの探索原理は、解の近傍の確定的な探索及び移動履歴を保存するメモリを用いた局所解からの脱出からなる。TSは他のメタヒューリスティクスと比較して、より良質の解を効率よく得る能力を持ち、電力系統の様々な組合せ最適化問題に適用されてきた⁽¹²⁻¹⁷⁾。しかし、TSは問題規模の拡大に伴い近傍が増大するため、近傍計算に要する時間が急激に増加する問題がある。よって本稿は、この欠点を改善し、大規模システムに対するTSの適用を容易とするために、発電機の優先リストを用いた近傍削減手法を提案する。即ち、優先リスト上でコスト安な発電機は起動、コスト高な発電機は停止状態に固定し、起動と停止の境界付近に位置する発電機の状態のみを近傍探索の対象とする。優先リストを用いて解の改善に効果が大きいと思われる状態を集中探索し、大規模システムに対し短時間で効率よい探索を行う。提案法を10機及び54機システムに適用し、従来のTS、SA、GA、優先リスト法と、解の質及び計算時間について比較を行い、提案法の有効性を示す。

2. 発電機起動停止問題の定式化

制約付き最適化問題として示される発電機起動停止問題の定式化を以下に示す。

評価関数:

$$f = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^T \left\{ f_i(P_{i,j}) + S_i V_{i,j} (V_{i,j} - V_{i,j-1}) + D_i V_{i,j-1} (V_{i,j-1} - V_{i,j}) \right\} \quad (1)$$

制約条件:

$$\sum_{i=1}^n V_{i,j} P_{i,j} = F_j + P_{loss,j} \quad (2)$$

$$V_{i,j} P_{min,j} \leq P_{i,j} \leq V_{i,j} P_{max,j} \quad (3)$$

$$V_{i,j-1} (V_{i,j-1} - V_{i,j}) \left(\sum_{m=1}^{K_{on,i}} V_{i,j-m} - K_{on,i} \right) = 0 \quad (4)$$

$$V_{i,j} (V_{i,j} - V_{i,j-1}) \left(\sum_{m=1}^{K_{off,i}} V_{i,j-m} \right) = 0 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n V_{i,j} P_{max,i} \geq F_j + P_{loss,j} + R_j \quad (6)$$

但し、 n : 系統の発電機数、 t : 期間数、 $f_i(\cdot)$: 発電機 i の発電コスト関数、 $P_{i,j}$: 発電機 i 期間 j の発電量、 $V_{i,j}$: 発電機 i 期間 j の起動・停止状態(1: 起動状態, 0: 停止状態)、 S_i : 発電機 i の起動費、 D_i : 発電機 i の停止費、 F_j : 期間 j の予想負荷量、 $P_{loss,j}$: 期間 j の系統の送電損失、 $P_{min,i}$: 発電機 i の最小発電量、 $P_{max,i}$: 発電機 i の最大発電量、 $K_{on,i}$: 発電機 i の最小運転期間、 $K_{off,i}$: 発電機 i の最小停止期間、 R_j : 期間 j の供給予備力

(1) 式の評価関数は発電機運用コストを表し、第1項の発電コストと、第2項及び第3項の発電機の起動・停止費の総和を最小化する。なお、本稿では簡単化のため起動費を定数として扱ったが、起動費を停止時間の関数とする場合への拡張も可能である。制約条件の(2)式は需給電力量のバランス制約を表し、左辺の全発電量と右辺の負荷需要と送電損失の和を等しくおく制約である。(3)式は発電機出力の上下限制約であり、各発電機の出力を事前に与えられる安定出力範囲の上下限内に保つ制約である。(4)式、(5)式はそれぞれ発電機の最小運転・停止期間制約と呼ばれ、各発電機が機器特性上、最低限必要とする連続運転・停止期間を与える。(6)式は供給予備力制約と呼ばれ、発電機の事故、負荷の急変に対応した予備の出力を確保する制約である。供給予備力制約は、各期間毎に左辺の運転中の発電機の最大出力の合計が、右辺量の負荷予測値、系統損失、事前に定める系統の予備力以上とする。

3. タブサーチ

本節ではTSについて概説する。TSは1980年代にGloverにより提案された最適化手法である⁽¹¹⁾。TSの探索は、局所的探索手法である山登り法で用いられる近傍探索へのメモリ機能の導入に基づいている。近傍探索は初めに、現在の解からハミング距離等を用いて確定的に微小変化させた解候補の集合を、解の近傍として定義する。次に、近傍に属する解候補全てを評価し、近傍中で最も良い評価関数を与える解候補を次の反復における初期解とする。山登り法の近傍探索では局所解に至るまで上記過程を繰り返し行う。一方、TSは局所解を脱出し、より良い解を探索するために、タブリストと呼ばれるメ

モリを使用する。タブリストは、解の遷移方向を同定する解の属性を一定反復の間保存し、保存された属性に対応する解候補への移動を禁止する。このタブリストの機能により、TSは局所解によって発生する解の短期的循環を防止し、局所解からの脱出を可能とする。ここで、TSが解の属性を保存する期間はタブレングスと呼ばれ、TSの探索性能に影響を及ぼす探索パラメータとなる。さらにTSは、近傍中に現在までの最良解を更新する解を発見したとき、タブリストに保存されている属性の変化も許容するアスピレーションレベルを基本戦略として備える。以上の探索により、TSは大域的最適解の良質な近似解を得る。しかし、TSの近傍に含まれる解候補の数は、変数の次元の拡大に伴い増大する。このため、変数が多次元化すると、反復毎の近傍計算の時間が膨大となる。よって、大規模問題において短時間で効率よい探索ができるように、TSの近傍を適切な規模に制限することが重要である。本稿は、近傍を制限する手法として、優先リストの導入に注目した。

4. 提案法

本稿は、発電機起動停止問題に対しTSの探索に優先リストを用いた近傍制限の手法を組み込んだ解法を提案する。提案法は、TSの近傍中で解を改善する可能性の低い解候補を優先リストに基づき評価対象から除き、近傍計算に要する時間を短縮する。具体的には、優先リスト上で他の発電機よりも発電コストが十分に安い発電機は起動状態として固定する。逆に、発電コストが高い発電機は停止状態として固定する。さらに、各状態に固定された発電機グループの境界付近に、数台の発電機の幅を取り、これらの発電機の起動・停止状態をTSにより集中的に最適化する。なお、各起動・停止状態における発電機出力は、等ラムダ法を用いて決定する。以上の優先リストを用いた近傍制限の概念を、図1を用いて説明する。同図(a)は従来のTSの近傍領域を、同図(b)は優先リストを用いた提案法の部分近傍領域をそれぞれ示す。それぞれ、横軸は考察期間を、縦軸は優先リスト上で順位の高いものから低いものへ並べられた各発電機の出力の積み上げを示し、図に示される負荷曲線への供給を仮定する。図において斜線部分に存在する記号*は最適化される1/0の起動・停止状態変数を表す。同図(a)において従来のTSは、全期間、全発電機のピットをハミング距離1だけ変化させた解候補全てが近傍となる。よって、従来のTSにおける解の近傍の規模は、発電機数と考察期間数の積となり、大規模問題に対しては、近傍探索に時間を要する原因となる。これに対し、同図(b)の提案法の解の近傍は、優先リストを用いて出力の合計が負荷曲線の境界付近に存在する発電機の起動・停止状態のみを最適化する。例えば、図において境界の発電機数を3と仮定したとき、区間Iでは、優先リスト上で負荷曲線の境界付近に位置する発電機#1、#2、#3の起動・

(a) 従来のタブサーチの近傍

(b) 提案法の部分近傍^{*1}

註) *1: 境界の発電機数は3と仮定

- 起動・停止状態を最適化する領域
- 起動状態に固定
- 停止状態に固定

図1 優先リストを用いた近傍制限の概念

Fig. 1. Concept of Restricted Neighborhood with Priority List

停止状態のみが近傍探索の対象となる。一方、優先リスト上で斜線部より上に位置する発電機、即ち他の発電機よりも発電コストが高い発電機は停止状態として固定される。逆に、優先リスト上で斜線部より下に位置する発電機はコスト安であることから、起動状態として固定される。これにより、優先リスト上で、明らかにコスト高、コスト安な発電機の状態をTSの近傍から除き、不必要な近傍探索に要する計算量を削減する。ここで、境界の発電機数は提案法の探索に影響を与える探索パラメータであり、事前シミュレーションを必要とする。

提案法のアルゴリズムを以下に示す。

- Step1: 各発電機の発電機データを基に優先リストを作成する。
- Step2: 優先リストから初期起動・停止状態 V_0 を生成する。タブレングス、反復回数 $k=0$ を設定する。
- Step3: 優先リストに従い、起動・停止状態 V_k の部分近傍 N_k を作成する。
- Step4: 作成された部分近傍 N_k に含まれる全ての解候

補に対し等ラムダ法を適用し、各起動・停止状態における発電機出力を決定する。

Step 5: 評価関数・制約を計算し、タブリストに違反しない最良解 V^* を、次の反復における初期値 V_{k+1} として選定する。但し、アスピレーションレベルを考慮する。

Step 6: 一定回数の反復が経過したらアルゴリズムを停止する。そうでなければ、タブリスト、反復回数を更新し、Step 3に戻る。

但し、Step 2における解の初期値は、期間毎に優先リスト順にコスト安な発電機から1台ずつ起動し、その期間の負荷に供給可能となった状態を初期値とする。即ち、Step 2の時点では、複数の期間にわたる最小運転・停止期間制約は考慮されず、以降の探索で最適化される。

5. シミュレーション

〈5・1〉 シミュレーション条件 シミュレーションは以下の条件で行う。

表2 各手法のパラメータ
Table 2. Parameters of Each Method

手法	パラメータ	例題系統	
		10機	54機
提案法 TS	タブレングス	4	32
	反復回数	100	2000
SA	同一温度内反復数	100	200
	収束判定(同一解反復)	10000	50000
	初期温度	100	2000
	クーリング係数	0.999	0.9999
GA	個体数	50	200
	世代数	3000	10000
	交叉率	0.4	0.4
	突然変異率	0.001	0.0001
	一点交叉、ルーレットルール、エリート保存		

(i) 例題系統としてNew England 10機39母線系統⁽¹⁸⁾及びIEEE 118母線54機系統を使用する。考察期間はいずれも1日24期間とする。これによる問題の組合せ総数はそれぞれ 1.77×10^{12} 通り、 1.36×10^{39} 通りである。

(ii) 制約における供給予備力は各期間の負荷の5%とする。また、等ラムダ法により考慮されない最小運転・停止期間制約、供給予備力制約の違反量は、ペナルティとして重みをかけ評価関数に加算される。

(iii) 提案法において、優先リストは各発電機の最大出力時の平均燃料コストを用いて決定する⁽¹⁹⁾。また、境界の発電機数は事前シミュレーションより、発電機総数の半数とする。即ち、10機系統においては各期間毎に10台中5台、54機系統においては54台中27台の起動・停止状態を最適化する。

(iv) 提案法の他に従来のTS、SA、GAを用いた解法及び優先リスト法⁽¹⁹⁾についてシミュレーションを行い、解の質及び計算時間について比較を行う。各手法のパラメータは事前シミュレーションから決定された表2の値を用いる。TS、SAの初期値は提案法と同様に決定し、GAは多数の初期個体が必要なため、乱数を用いて複数生成する。さらに、SA、GAはアルゴリズム中で乱数を使用するため、50回の実行結果を用いる。計算機は富士通ワークステーション S-7/7000U model 45である。

〈5・2〉 シミュレーション結果

New England 10機39母線系統

初めに、10機系統における提案法とTSの収束特性を図2に示す。発電機総数が10であるため、従来のTSは境界の発電機数10の提案法と同一である。同図において、従来のTSと境界の発電機数を5と設定した提案法は同一の収束特性を示し、境界の発電機数を1と設定したときは異なる収束特性を示した。これは、境界の幅を広く設定すると、提案法の部分近傍中の最良解と従来のTSの近傍中の最良解が一致するためである。逆に、境界の幅を狭く設定すると、これが一致しないため、異なる収束特性を示す。しかし、最終的に各条件において得られた解は、すべて等しい状態を示し、評価関数は

図2 10機系統における提案法とTSの収束特性

Fig. 2. Convergence Characteristics of Proposed Method and TS in 10-Unit System

57242であった。このことは、優先リスト上で境界付近に位置する発電機の状態のみを探索すれば、提案法は長期的な探索過程において十分良質な解を得る能力を示す。また、全ての条件において、解の長期的な循環が見られた。これは、問題の非線形性が弱いためであり、問題規模が比較的小さいことに起因する。

図3 10機系統における境界の発電機数の影響
Fig. 3. Influence of No. of Boundary Units on Cost Function in 10-Unit System

表3 10機系統におけるシミュレーション結果
Table 3. Simulation Results in 10-Unit System

手法	評価関数		計算時間		解候補の評価個数
	値	比 ^{*3}	時間 (s)	比 ^{*3}	
提案法	57242	1	2.37	1	12000
TS	57242	1.000	4.64	1.96	24000
SA ^{*1}	57546 (57478)	1.005 (1.004)	69.89	29.49	131011
GA ^{*1}	57870 (57242)	1.011 (1.000)	51.81	21.86	150000
優先リスト	61887	1.081	0.10	0.04	*2

註) *1: SA、GAの値は50通りの初期値に対する平均値、括弧内の値は最良値をそれぞれ示す。
*2: 文献(13)の手法により求めたため、解は一意に決定される。
*3: 提案法を1とした時の各手法の値を示す。

次に、図3に提案法における境界の発電機数と評価関数の関係を示す。同図が示すように、提案法は境界の発電機数に比例して解候補の評価個数が増加するため、それに伴い計算時間も線形に増大する。一方、評価関数は境界の発電機数に影響を受けなかった。これは、問題が比較的小規模なため、境界の発電機1台の状態のみの探索で十分良質な解が得られるためである。しかし、より大規模系統においては問題の非線形性が増加するため、境界の発電機数は計算量と評価関数のトレードオフを考慮して定める必要がある。

最後に、表3に各手法の結果を示す。まず、提案法とTSの比較について検討する。評価関数において、提案法とTSは同一の解を得た。さらに、計算時間において、提案法はTSの計算時間を1.96倍高速化した。よって、提案法はTSに比べて、優先リストを用いた改良により、良質な解を短時間で得る能力を示した。次に、提案法と従来の最適化手法間の性能比較を行うため、提案法とSA、GA、優先リスト法の比較を検討した。評価関数において、提案法はSA、GAの平均値及び優先リスト法に対し、それぞれ0.53%、1.10%、8.11%優れた解を得た。これは、提案法の良質な解を発見する能力を示す。また、計算時間において、提案法に対し、SA、GA、優先リスト法の計算時間比は、それぞれ29.49、21.86、0.04であった。よって、提案法は優先リスト法を除く各手法に対して、計算効率の点でも優れている特徴が示された。

以上より、10機系統において、提案法がTS、SA、GA、優先リスト法に対し、解の質、計算時間の点で有効であることを確認した。

IEEE 118母線54機系統

まず、近傍を制限しない従来のTSと、境界の発電機数を27と設定した提案法の収束特性を図4に示す。前述の10機系統における結果とは異なり、54機系統においては、境界の発電機数が比較的大い27にも関わらず、従来のTSと異なる収束特性を示した。これは、非線形性が強い大規模問題においては、優先リストに基づき制限された部分近傍の最小値が、TSの近傍の最小値と必ずしも一致しないためである。しかし、提案法は遷移型

図4 54機系統における提案法とTSの解遷移

Fig. 4. Convergence Characteristics of Proposed Method and TS in 54-Unit System

図5 54機系統における境界の発電機数の影響
Fig. 5. Influence of No. of Boundary Units on Cost Function in 54-Unit System

表4 54機系統におけるシミュレーション結果
Table 4. Simulation Results in 54-Unit System

手法	評価関数		計算時間		解候補の評価個数
	値	比*3	時間(s)	比*3	
提案法	131437	1	3007	1	1296000
TS	132175	1.006	6347	2.11	2592000
SA*1	165964 (153272)	1.263 (1.17)	45727	15.21	9330983
GA*1	165508 (137104)	1.259 (1.043)	5740	1.91	2000000
優先リスト	152770	1.162	7	0.002	*2

註) *1: SA, GAの値は50通りの初期値に対する平均値、括弧内の値は最良値をそれぞれ示す。
*2: 文献(13)の手法により求めたため、解は一意に決定される。
*3: 提案法を1とした時の各手法の値を示す。

のアルゴリズムであるため、長期的な探索過程においては、制限された部分近傍内の最適化のみで、TSと同程度の質の解を発見する。実際、従来のTSと境界の発電機数27の提案法が2000回の反復で発見した最良評価関数は、それぞれ132175、131437であり、提案法の方が0.56%優れた値を発見した。

次に、図5に提案法における境界の発電機数と評価関数の関係を示す。同図において、提案法は境界の発電機数に比例して解候補の評価個数が増加するため、それに伴い計算量もほぼ線形に増大する。評価関数は、境界の発電機数1台から7台までは、他と比較して顕著な悪化が確認された。これは、この領域の解が複数の期間にわたる最小運転・停止期間制約を考慮できず、ペナルティを含むためである。しかし、境界の発電機数8台以降では、期間をまたぐ制約は全て改善された。負荷曲線は隣接する期間で大きく変化しないため、提案法は境界の幅をある程度とれば、複数の期間にわたる制約も考慮

できる。また、境界の発電機数8台から54台の範囲の評価関数は、最悪が8台の時137267、最良が27台の時131437であり、差は4.25%であった。境界が広い方が評価関数は若干良い傾向にあるが、顕著な相違は確認されない。これは、提案法が遷移型のアルゴリズムのため、境界の幅が解の質に単純に影響しないことによる。

最後に、表4に54機系統における各手法の結果を示す。まず、提案法とTSの比較について検討する。評価関数において、提案法はTSに対し0.56%優れた解を得た。さらに、計算時間において、提案法はTSの計算時間を2.11倍高速化した。よって、提案法はTSに比べて、優先リストを用いた改良により、良質の解を短時間で得る能力を示した。次に、提案法と従来の最適化手法間の性能比較を行うため、提案法とSA、GA、優先リスト法の比較を検討した。提案法はSA、GA、優先リスト法に対し、それぞれ26.26%、25.92%、16.23%優れた解を得た。これは、提案法の他の手法に対し良質の解を得る能力を示す。他方、SA、GAは確率的解法であるため、平均的に良質の解を得ることができなかった。計算時間において、提案法に対するSA、GA、優先リスト法の計算時間比は、それぞれ15.21、1.91、0.002であった。これより、提案法は確率を用いない確定的探索により、確率的手法であるSA、GAより高速に良質の解を得る性能を持つことを確認した。また、SAと提案法の比較では、前者の方が解候補の評価個数に対してより多くの計算時間を要する。これは、SAのアルゴリズムが提案法と比較して、乱数を用いた付加的な計算を多数含むためである。

以上より、54機系統において、提案法がTS、SA、GA、優先リスト法に対し、解の質、計算時間の点で有効であることを確認した。

6. まとめ

本稿では発電機起動停止問題に対し、発電機の優先リストを組み込んだTSによる解法を提案した。提案法及び比較手法としてTS、SA、GA、優先リスト法を54機系統に適用し、以下の結果が得られた。

(i) 従来のTSを用いた解法は、問題規模の拡大に伴い、近傍が増大した結果、TSの計算時間を膨大に要する難点がある。これに対し提案法は、優先リストを用いた近傍制限により、従来のTSの計算時間を削減し、より大規模問題への適用を容易とする。

(ii) 提案法は近傍制限により、従来のTSと異なる収束特性を示すが、長期的な反復過程において従来のTSを用いた解法と同程度の質の解を発見した。

(iii) 提案法と従来のTS、SA、GA、優先リスト法の比較では、提案法は得られる評価関数において全手法中最

も優れた解を発見した。また、54機系統における計算時間の点で、提案法は従来のTSに対し、解の質を落とすことなく、2倍の高速化を達成した。

以上より、提案法が発電機起動停止問題の実規模系統に対し有効な解法であることを示唆した。

謝辞

本研究の一部が明治大学ハイテクリサーチセンターの助成を受けて行われたことに感謝する。

(平成12年3月2日受付、平成12年10月3日再受付)

文 献

- (1) C. J. Baldwin, K. M. Dale and R. F. Dittich, "A Study of the Economic Shutdown of Generating Units in Daily Dispatch," AIEE Trans. on Power Apparatus and Systems, **78**, pp. 1272-1284 (1959-12)
- (2) H. H. Happ, R. C. Johnson and W. J. Wright, "Large Schale Hydro-Thermal Unit Commitment-Method and Results," IEEE Trans. on Power App. and Syst., **90**, 3, pp. 1373-1384 (1971-5/6)
- (3) C. K. Pang, G. B. Sheble and F. Albuyeh, "Evaluation of Dynamic Programming Based Methods and Multiple Area Representation for Thermal Unit Commitments," IEEE Trans. on Power App. and Syst., **100**, 3, pp. 1212-1218 (1981-5)
- (4) A. Merlin and P. Sandrin, "A New Method for Unit Commitment at Electricite de France," IEEE Trans. on Power App. and Syst., **102**, 5, pp. 1218-1225 (1983-5)
- (5) F. Zhuang and F. D. Galiana, "Unit Commitment by Simulated Annealing," IEEE Trans. on Power Systems, **5**, 1, pp. 311-317 (1990-2)
- (6) 森・堀口:「遺伝的アルゴリズムによる発電機起動停止問題の解法」, 平5電気学会研究会資料, PE-93-101 (平5-11)
- (7) 森・宇佐美:「タブサーチを用いた火力発電機起動停止問題」, 平6電気学会研究会資料, PE-94-80 (平6-10)
- (8) 森・松崎:「並列タブサーチを用いた発電機起動停止法」平成11年電気学会B部門大会, 論文I, 論文番号12 (平11-8)
- (9) S. Kirkpatrick C. D. Gelatt, Jr. and M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," Science, **220**, 4598, pp. 671-680 (1983-5)
- (10) D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning," Addison-Wesley, Massachusetts, USA (1989)
- (11) F. Glover, "Tabu Search, Part I," ORSA Journal on Computing, **1**, 3, pp. 190-206 (1989-Summer)
- (12) 森:「システム最適化の新手法タブサーチ-電力システムへの応用」, システム制御情報学会誌, **42**, 7, pp. 377-383 (1998)
- (13) H. Mori and T. Hayashi, "New Parallel Tabu Search for Voltage and Reactive Power Control in Power Systems," Proc. of IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'98), **3**, pp. 431-434, Monterey, CA, USA (1998-5)
- (14) H. Mori and Y. Sone, "Tabu Search Based Meter Placement for Topological Observability in Power System State Estimation," Proc. of 2000 IEEE Transmission and Distribution Conf., **1**, pp. 172-177, New Orleans, USA (1999-4)
- (15) H. Mori and Y. Ogita, "A Parallel Tabu Search Based Method for Reconfigurations of Distribution Systems," Proc. of 2000 IEEE PES Summer Meeting (CD-ROM), Seattle, WA, USA (2000-7)
- (16) H. Mori and O. Matsuzaki, "A Rule-Based Tabu Search Technique for Power System Decomposition," Proc. of 2000 IEEE PES Summer Meeting (CD-ROM), Seattle, WA, USA (2000-7)
- (17) 森、荻田,「配電システム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」, 電気学会論文誌B, **120-B**, 8/9, pp. 1194-1201 (2000-8/9)
- (18) M. A. Pai, "Energy Function Analysis for Power System Stability," Kluwer Academic Publishers, Boston, USA (1989)
- (19) A. J. Wood and B. F. Woolenberg, "Power Generation Operation & Control," John Wiley & Sons, New York, USA (1984)

森 啓之(正員) 昭和29年11月10日生。昭和60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、平成7年10月同教授、現在に至る。平成6年3月より、平成7年4月まで米国コーネル大学電気工学科客員準教授。電力システムの系統解析、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。

松崎 理(学生員) 昭和52年2月26日生。平成11年3月明治大学理工学部電気工学科卒業。同年4月より同大学大学院博士前期課程進学。現在に至る。主として電力システムの組合せ最適化問題、メタヒューリスティック手法の研究に従事。電気学会会員。