

# 高効率運用を旨とする新しい電力システム制御技術

Advanced Technology for Power System Operation and High-Efficiency Supervisory Control System

荒井 純一  
J. Arai

田中 立二  
T. Tanaka

加藤 政一  
M. Kato

電力システムは発電所から負荷までを含む大規模で複雑なシステムであり、電力需要の増大につれて成長し続けている。その運用と監視制御は、電力供給の安定化と効率化のために重要な役割を担っている。これまで人間に頼っていた部分の自動化、システム全体のさらなる効率化のために、人間の知的活動や生命体の模擬をする新しい手法の適用が検討されている。

電力システム運用コストの低減を旨とし、遺伝的アルゴリズムを適用した火力発電機の起動停止計画の作成や、オブジェクト指向技術を適用した将来の系統監視制御システムなど最新の技術を用いた自由度の高いシステムを構築した。

The scale and complexity of electric power systems are expanding as load demand increases. Power system operation and supervisory control are critical factors in ensuring a stable and efficient power supply. Advanced technologies that simulate the intelligent processes of humans or organic evolution are being researched, and their application to power systems is being investigated to improve flexibility and efficiency.

This paper presents a practical method for solving the unit commitment problem using a genetic algorithm, and a future supervisory control system using object-oriented technology.

## 1 まえがき

電力システムは多くの発電所、送電線、変電所、負荷がつながった大規模で複雑なシステムであり、電力需要の増加とともにますます拡大している。電力システムでは、設備をより有効的に、かつ安定に運用するために各種の監視や制御が働いている。その電力システム制御技術の果たすべき役割は大きく、それを支える技術開発はきわめて重要である。

電力システムの運用・監視制御システムでは、これまで線形システム理論や数理計画法などの数理的手法が使われてきた。しかし、数理的手法だけでは大規模、複雑化した問題に対する限界が出てきている。一方、複雑なシステムに対する解決手法として、人間の知的活動を模擬するエキスパートシステム、ファジロジック、ニューラルネットワーク、オブジェクト指向技術やさらに生命体の模擬である免疫アルゴリズム、遺伝的アルゴリズムなどの新しい手法が提案されている。電力システムシステムへもこれら新しい手法の適用が研究されてきている。

ここでは、系統運用業務の効率化を旨とし、運用コストの低減と自動化を目的とした遺伝的アルゴリズムを適用した火力発電機の起動停止計画(中部電力㈱共同研究)<sup>(1),(2)</sup>と、オブジェクト指向技術を適用したこれまでにない自由度の高い電力システム監視システムについて述べる。

## 2 遺伝的アルゴリズムを適用した火力機起動停止計画

### 2.1 火力機起動停止計画

運用計画の一つである火力機の起動停止計画では、需給バランスや発電機ユニットの出力上下限といった制約だけでなく、同一発電所内で複数のユニットを同時に起動停止させないという BTG (ボイラ、タービン、ジェネレータ) 制約や、系統内のアンバランスなユニット運用による系統の不安定化を避けるための送電線の潮流制約など多くの制約

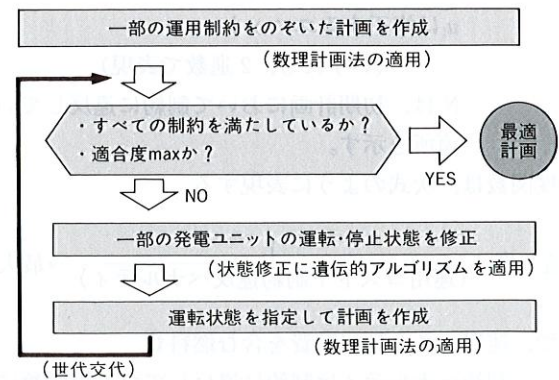


図1. 火力機起動停止計画のフロー 遺伝的アルゴリズムと数理計画法を組み合わせる最適運用計画を作成する。

Algorithm flow of proposed method



を考慮する必要がある。数理計画法では、これらすべての制約を考慮することは困難であり、運用者がみずからの経験を基に計画を作成している。

最近、多くの問題に適用され始めている遺伝的アルゴリズムは生物の進化過程を模擬した最適化手法で、複雑な制約をもつ問題に対しても、ランダムに解を作成しながら最適解を探索することが可能である。そこで、数理計画法(ラグランジュ緩和法)と遺伝的アルゴリズムの特長を組み合わせた手法を開発した。すなわち、数理計画法では取り込みやすい一部の制約を考慮して運用コストの最適化を図りつつ、遺伝的アルゴリズムにより複雑な制約を織り込みながら運用計画を修正して、効率よくすべての制約を満たすもつとも経済的な運用計画を作成するものである。

## 2.2 開発手法

図1に、開発した手法の処理フローを示す。まず、需給バランスや各ユニットの出力上下限などの制約だけを考慮して、数理計画法により運用コストが最小となる初期運用計画を作成する。この計画は、BTG制約や潮流制約といった制約を考慮していないので、これら制約に違反している可能性がある。違反がある場合、初期運用計画に対して、一部発電ユニットの運転状態を修正することを考える。具体的には、ある時間帯のあるユニットの運転状態を修正したうえで、それを指定条件として再度数理計画法を適用して、運用計画を修正している。これにより、すべての制約を満たし、運用コストが最小となる計画を作成することが可能となる。問題は、どの時間帯、どのユニットの運転状態を修正するかということであるが、このために遺伝的アルゴリズムを用いて、効率よく探索を行っている。適合度関数最大すなわち運用コスト最小となる計画が最適計画である。

遺伝的アルゴリズムでは、修正する時間帯とユニットを組み合わせたものを遺伝子として表現する。

遺伝子： $(t_1, u_1, t_2, u_2, \dots, t_N, u_N)$

ここで、 $t_i$ は修正する時間帯

$u_i$ は修正するユニット

(いずれも、2進数で表現)

$N$ は、初期計画において制約に違反している箇所を示す。

適合度関数は、次式のように表現する。

$$\text{適合度} = \frac{1}{(\text{運用コスト} + \text{制約違反ペナルティ})} \rightarrow \text{最大化}$$

ここで、運用コストは起動費を含む燃料費

制約ペナルティは制約に違反している箇所数に一定の重み係数を掛けたもの

進化の過程において、親の遺伝子がそのまま子に伝えら

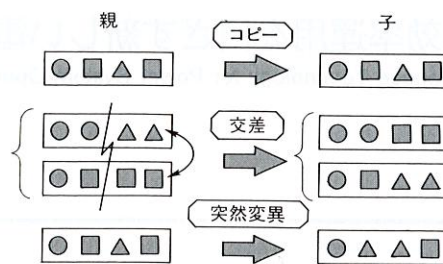


図2. 遺伝子の組替え 交配, 増殖をして次の世代を作るために乱数を用いて遺伝子のコピー, 交差, 突然変異を発生させ, 世代を交代させる。

Genetic operation

れるコピー以外に、図2に示す交差, 突然変異を確率的に発生させて, 世代を交代させる。また, 各世代の個体数(遺伝子の数)が一定となるように, 適合度に応じて確率的に淘汰(とうた)を行う。このようにして, 遺伝的アルゴリズムを用いて, よりよい遺伝子を順次作りながら, 最適な運用計画を作成する。

## 2.3 シミュレーション結果

今回開発した手法を5発電所10ユニットからなるモデルシステムに適用した結果について述べる。ここでは、需給バランスやユニットの出力上下限, 最小起動・停止時間制約以外にBTG制約および潮流制約を考慮している。

図3にすべての運用制約を満たし運用コストが最小となる最適運用計画を, 一部制約を除いて作成した初期計画とあわせて示している。初期計画では, A発電所におけるBTG制約違反, 時間帯18, 19, 20における潮流制約違反が発生

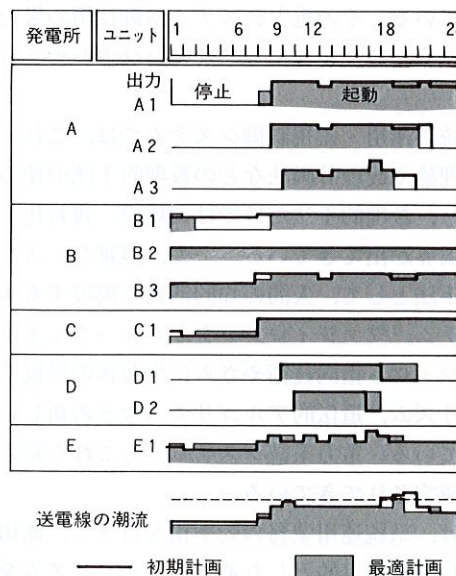


図3. 最適起動停止計画 初期計画から起動停止時刻と出力の調整をしてBTG制約違反と潮流制約違反を解消した最適計画を得た。

Optimum schedule for test system



していたが、起動停止時刻の変更、出力の調整によりこれら制約違反を解消している。この手法は制約違反をしている箇所を中心とした一部のユニットの運転修正により全時間帯、全ユニットにわたる運転修正ができ、結果として、最適計画が得られたことがわかる。

このように、この手法は修正すべき一部のユニットの運転状態だけを遺伝子で表現しているの、遺伝子の長さが長くならず、このために実規模の計画も効率よく作成できるという特長がある。今後、実際の計画で考慮すべき制約を明確にし、実規模モデルを対象にしたプロトタイプシステムを開発する予定である。

### 3 オブジェクト指向技術に基づく将来の系統監視制御システム

#### 3.1 仮想系統運用センタ

電力系統監視制御システムは、発電所、変電所、それらを統括する制御所から構成される階層的なシステムであり、系統の成長とともに機能の向上が図られてきた。今後も系統設備の拡張、監視制御機能の高度化などの発展が予想され、自由度の高い系統監視制御システムが要求されている。

一方、計算機技術の進歩は著しく、大規模システムを効率的に開発・保守するためのオブジェクト指向技術、計算機ネットワークを効率的に運用するための分散処理技術<sup>(3)</sup>、大量かつ複雑なデータの高速度検索・管理を行うデータベース技術<sup>(4)</sup>などが実用化されてきている。

これらの技術をベースに、系統監視制御システムの本来あるべき姿を考えた場合、次に示す機能をもつ仮想系統運用センタが理想的な姿として考えられる。

- (1) 他の制御所の監視、制御などの業務が自由に行える
  - (2) 制御所間で相互に業務の代行ができる
  - (3) 設備の変更などに対して容易に対応ができる
- 以下にこれを実現するための手段を説明する。

#### 3.2 オブジェクト指向の広域ネットワークへの適用

オブジェクト指向は、従来の計算機の応答速度を優先した作りかたとは異なり、機能を中心に考えたソフトウェアの作りかたを可能にする手段である。オブジェクト指向では、一般的に、対象の特性や挙動を抽象化したクラス、クラス間の抽象化の関係を体系づける継承などが機能として挙げられる。これらに共通する基本的な考えかたは次の3点である。

- (1) 対象システムの構造を反映したオブジェクト構成とする。
- (2) オブジェクトの機能を他から利用する場合の指示・操作方法により決め、そのデータと処理を一体化する。
- (3) 複数のオブジェクトでメッセージを交換し、協調して与えられた業務を実現する。

ここで述べる仮想系統運用センタは高速通信回線で接続された広域ネットワーク環境を想定している。そして広域ネットワーク上にオブジェクトを分散配置し、これらのオブジェクト間でメッセージを交換しながら協調して必要な業務を遂行するシステムである。

系統監視制御システムの構成要素である制御所あるいは変電所の監視・操作業務にオブジェクト指向を適用した場合のソフトウェア構成を図4に示す。従来はそれぞれの業務ごとに重複してもっていた部分を図4に示すように、監視・操作などシステム本来の業務に対応するものと、これらの業務に共通な機能の一つにまとめたものをそれぞれオブジェクトとする。共通オブジェクトとしては表示入出力、データ管理、通信管理などがある。オブジェクトは単に情報だけでなく情報に関連する処理・機能を一体化したオブジェクトとし、自律的な働きをもたせることができる。

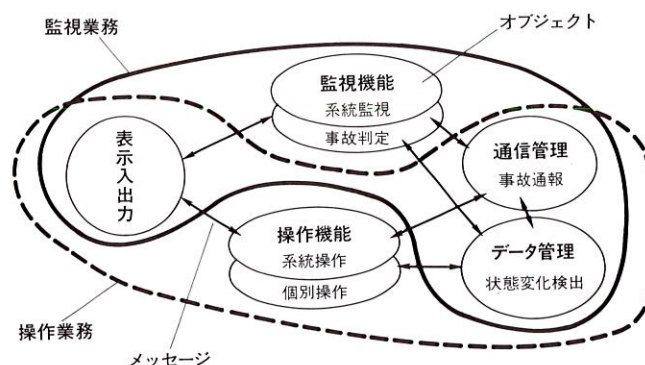


図4. オブジェクト指向によるソフトウェア構成 各機能単位をオブジェクト化して、その間をメッセージ伝送で業務を処理する。  
Software configuration based on object-oriented design

#### 3.3 仮想系統運用センタの機能

仮想系統運用センタの代表的な機能である他事業所監視、事業所業務の代行、設備追加の3点について述べる。

制御所 A から他事業所である変電所 1 の監視をする例を図5に示す。このシステムでは、システム内のオブジェクトをどの制御所あるいは変電所からも自由に利用することができる。これは図5に示すような指示・応答のメッセージ経路が通信管理オブジェクトにより実行時に決められ、メッセージを介して監視指示、監視結果が転送され、制御所 A と変電所 1 の監視、データ管理、通信管理、表示オブジェクトが協調して監視業務を行うためである。従来、同じことをする場合に制御所 A に変電所 1 のプログラムを追加しなければならなかったが、このシステムではそのような追加はせずに他事業所の監視ができる。

個々のオブジェクトはどの事業所に移動させてもメッセージを介して実行することができる。この機能を利用して



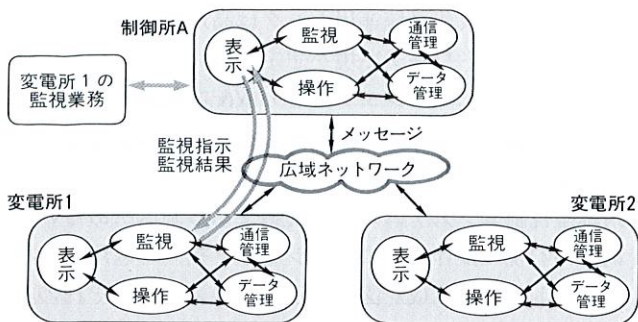


図5. オブジェクト指向による他事業所監視 オブジェクトの追加修正をしなくても制御所Aから変電所1を監視できる。

Supervisory control of substation 1 from other stations

事業所業務の他事業所による代行が可能となる。例えば図5の場合には、制御所Aの全オブジェクトを変電所2に移動すれば、制御所Aで行っていた業務は変電所2で行うことができるようになる。さらにこの機能を利用すると、ハードウェアやソフトウェアを変更しなくても事業所相互でのバックアップが可能となり、広域災害などへの対応も可能となる。

図6に設備追加の例を示す。変電所2で変圧器や遮断器などの設備を追加した場合には、変電所2でそれに対応する設備データを追加し、さらに関連する事業所、この例では制御所Aで関連データの変更が必要である。系統設備構成・状態情報を管理するデータ管理オブジェクトは単に自変電所のデータ追加・変更を管理するだけでなく、それに伴う関連事業所の修正設備データの作成と関連事業所への送信を行う機能をもっている。したがって自所の設備データの変更を行うと同時に、自動的に関連する他事業所のデータも追加でき、そのためのプログラムの変更は必要なく、

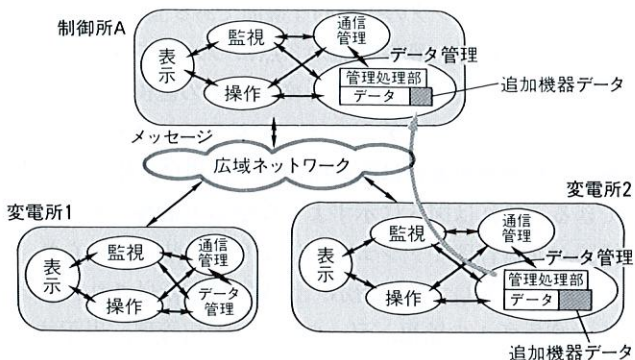


図6. オブジェクト指向での設備追加時の処理 変電所2での設備追加時にはプログラムの修正をせずに対応でき、関連する制御所Aのデータも自動的に追加修正される。

Automatic equipment data modification by object-oriented software

容易に設備データの追加処理が可能となる。

仮想システム運用センタは、オブジェクト指向の考えかたを広域ネットワークに適用した新しい概念に基づくシステム監視制御システムであり、将来のシステムの基本になるものと考えている。

#### 4 あとがき

電力システムの運用・監視制御システムに新しい技術を用いることにより、これまでに比べて自由度の高いシステムを構築でき、運用コストの低減が期待できる。

ここに示したシステムは、計算機あるいは通信分野の発達もさることながら、概念の適用についてもさらなる掘下げを必要としている。今後も電力システム制御の効率化に向けて技術開発を進めていく所存である。

#### 謝 辞

遺伝的アルゴリズムを適用した火力機起動停止計画作成手法の開発にあたり、絶大なるご協力をいただいた中部電力(株)に対し厚くお礼申し上げる所である。

#### 文 献

- (1) 太田忠昭, 他: 遺伝的アルゴリズムと数理計画手法を融合した起動停止計画問題の解法, 平成7年電気学会 電力技術研究会, PE-95-154 (1995)
- (2) T. Ohta, et al: Practical Approach to Unit Commitment Problem using Genetic Algorithm and Lagrangian Relaxation Method, ISAP'96, pp.434 (1996)
- (3) 関 俊文, 他: 知的分散システムのアーキテクチャ, 平成6年電気学会 全国大会 S.18-5 (1994)
- (4) T. Kawamura, et al: Evaluation of Object Oriented Data Base for Distribution Network Monitoring System, ISAP'96, pp.156 (1996)



荒井 純一 Jun'ichi Arai, D.Eng.

重電技術研究所システム技術部部长, 工博。  
電力システム制御の研究に従事。電気学会, IEEE 会員。  
Heavy Apparatus Engineering Lab.



田中 立二 Tatsuji Tanaka

重電技術研究所システム技術部主幹。  
情報処理応用技術の研究に従事。情報処理学会, 人工知能学会会員。  
Heavy Apparatus Engineering Lab.



加藤 政一 Masakazu Kato, D.Eng.

重電技術研究所システム技術部グループ長, 工博。  
電力システム運用の研究に従事。電気学会, IEEE 会員。  
Heavy Apparatus Engineering Lab.