

学 位 論 文 題 名

A Study on the Application of Evolutionary  
Programming to Fuel Scheduling  
and Power System Operation Problems

(燃料使用量制約を考慮した電力系統運用計画問題に対する  
進化型アルゴリズムの適用に関する研究)

学位論文内容の要旨

本論文は、燃料使用量制約を考慮した電力系統運用計画問題に対する進化型アルゴリズムの適用に関する研究について取りまとめたものである。発電計画は、系統運用における主要な経済性-セキュリティ維持機能の中でも上位に位置する重要な問題である。大抵の電力系統は、電源としていくつかの選択肢、例えば、従来型の蒸気タービン式火力発電所、ガスタービン式火力発電所、水力発電所、原子力発電所、そして系統連系による融通電力などを有している。さらに、燃料電池、地熱発電所、太陽電池、風力発電所なども考えられる。

発電計画問題の目的は、系統負荷へ供給可能な多くの電源が所与のものとして、発電コストが最小となるような電源の組み合わせと各電源への負荷の割り当てを求めることである。電力系統において、発電機の経済的な選択が可能であるような多くの電源を有する状況下では、通常、並列発電機の組み合わせは起動停止計画によって決定される。これらの起動停止や発電における主要な経済的要因の中に、発電設備への負荷分担が含まれる。特に、火力発電所では、ユニットの効率や燃料の使用量に影響を与える重要な要因となる。燃料の種類に基づくこれらの発電所の選択は、一般に各発電所に供給される燃料の量や価格に依存する。

電力系統運用計画における経済性では、固定費と可変費の2種類のコストが考慮される。固定費には、人件費、保守管理費、利息、および系統負荷に直接依存しないその他の経費が含まれる。一方、可変費は、主に燃料費、電力の売買、およびユニットの負荷状態に依存するその他のコストである。可変費は、制御でき、最小化が可能である。しかしながら、多くの電源が接続されている系統では、最適化は非常に難しくなる。このような系統では、計算数学の知識を用いて、より複雑な最適化問題として定式化される。

本論文で提案している進化型プログラミングに基づく計算手法を3種類のテスト用モデルに適用し検討を行った。最初の検討は、古典的な起動停止計画問題に関するもので、各発電機の最適起動停止計画を決定するための新しいコード化システムを提案している。2番目の検討は、燃料供給量に制約がある場合の経済負荷配分問題に関するものである。このモデルのコスト関数には、バルブポイントローディング（バルブ段数の変更に伴う不連続な燃料費特性）の影響も考慮されている。3番目の検討は、前二者を組み合わせたもので、燃料供給量に制約がある場合の起動停止計画決定問題に関してである。提案手法により求められた解

が、従来の解法により求められたものと比較検討されている。

本論文は、5章で構成されており、以下にその要約を述べる。

第1章では、電力系統運用計画問題の記述に必要な背景について述べている。まず、基本的な発電方式について1節で紹介している。一般に電力の消費地は、発電所や系統連系地点から離れており、したがってその間の電力輸送が必要で、2節で送電および配電システムの概要について説明している。経済性および安全性に関する要求もまた重要なテーマであり、経済性-セキュリティ維持機能および運用解を求めるための従来手法のいくつかについて3節で論じている。4節では、本研究の目的を明らかにしている。5節に、この章の要約と参考文献リストを載せているが、これはすべての章に共通する。

第2章では、電力系統における最適運用計画問題の数学的な定式化とその解法を示している。代表的なものとして、発電機の起動停止計画や経済負荷配分があるが、この2つの問題は、それぞれの問題に含まれる複雑さゆえに、さらには、相補的ではあるが明確に異なるそれぞれの役割を区別する際に生じる混乱を避けるために、通常は別々に定式化される。はじめの2節では、古典的な起動停止-負荷配分問題を取り扱い、3節でより複雑な問題、すなわち系統運用において燃料供給に制約がある場合を取り上げている。

第3章では、進化的計算法から派生した主な分野を紹介している。進化的計算手法は、名称が示すように、自然界の進化をコンピュータシステムで応用するために、生物学に触発されて開発された手法である。したがって、この章の前半では、これらの計算手法が導かれたダーウィンのパラダイムに重点を置きながら、自然界の進化の主要な概念について述べている。後半では、各進化的手法の類似性や相違点を明らかにしつつ、新ダーウィン進化論を模擬した手法を紹介している。その中から、3つのアルゴリズム-遺伝アルゴリズム (GA)、進化的戦略 (ES)、進化的プログラミング (EP) について詳述している。

第4章では、進化的プログラミング手法のいくつかの実践的な適用を示している。最初の節では、計算モデルを作成するために必要な数学ツールに関する準備的説明を行っている。2節では、いくつかの例題を取り上げている。まず、古典的な発電機起動停止計画問題に、最適な計画案を探索するための新しいコード化システムを導入した手法を提案している。次に、燃料供給量に制約がある場合の経済負荷配分問題に対する新しい解法を示す。さらに、バルブポイントローディングの影響を考慮している。最後に、燃料供給量制約を考慮した発電機起動停止計画問題への適用を行っている。提案アルゴリズムによって得られた結果が、従来手法の中のいくつかから得られた解と比較検討されている。

第5章では、各章の要約を述べている。一方、電力系統運用条件の持続的な変化は、提案手法の定期的な再評価を必要とするであろう。したがって、この章の結びとして、進化的計算手法の系統最適化分野への適用に関する将来展望について論じている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 長谷川 淳  
副 査 教 授 大 西 利 只  
副 査 教 授 本 間 利 久  
副 査 助 教 授 北 裕 幸

学 位 論 文 題 名

## A Study on the Application of Evolutionary Programming to Fuel Scheduling and Power System Operation Problems

(燃料使用量制約を考慮した電力系統運用計画問題に対する  
進化型アルゴリズムの適用に関する研究)

電力系統における発電計画は、時々刻々変化する負荷に対して、どの発電機をいつ起動あるいは停止させ、また、運転している個々の発電機にどれだけの出力を分担させるのが最も経済的であるのかを、種々の制約の下で決定するものであり、系統運用における主要な業務の一つとなっている。この問題は、数理計画的には、発電機の起動停止パターン(0-1変数)と発電機出力(連続変数)を同時に決定するいわゆる混合整数計画問題として定式化することができ、系統規模および考察期間が増大するに従って組み合わせの数が膨大となり、最適解を得ることが困難になるという特徴を持っている。このため、最適解は得られないとしても、問題構造を簡略化することで最適解にかなり近い準最適解を得ようとする研究が世界各国で行われてきている。しかしながら、いまだに十分な精度を持った手法は開発されておらず、電力システムにおける国際会議などでも中心的な話題の一つとして常に取り上げられている。しかも最近では、電気事業の枠組みが規制緩和・自由化の方向に進んでおり、これまで以上に徹底的な効率化・低コスト化が求められている。従って、発電計画においてもより厳密なモデル化のもとで、可能な限り最適解に近い解を得るための努力が必然的に重要となってきている。また、将来的には、従来型の蒸気タービン式火力発電所、ガスタービン式火力発電所、水力発電所、原子力発電所などに加え、燃料電池、太陽電池、風力発電所などの新しい分散電源も考慮しなければならず、発電計画はこれまで以上に複雑な問題となることは間違いないところである。

本論文では、上記のような発電計画問題に、システム工学の分野で研究開発されてきている進化的プログラミング手法(Evolutionary Programming; 以下EP法と呼ぶ)を適用し、実用的な時間内でより精度の良い解を得るための計算アルゴリズムの開発並びにその有効性を詳細に検証したものであり、得られた成果は学術的に極めて価値あるものと言える。

特に本論文では、次の3つの観点からEP法の発電計画問題への適用法が論じられており、何れも、従来にはない全く新しいアプローチとなっている。(1)古典的な発電機の起動停止計画問題への適用法、(2)燃料供給量に制約がある場合の経済負荷配分問題への適用法、(3)燃料供給量に制約がある場合の発電機起動停止計画問題への適用法。特に、(2)の開発によって、これまで求解が難しいとされていた、バルブポイントローディング(バルブ段数の変更に伴う不連続な燃料費特性)のような極めて非線形性の強い燃料使用量特性を持つ発電機に対しても容易に出力配分を適用することが可能となった。また、(3)は、(1)と(2)を組み合わせた問題であるが、その複雑さのためこれまでこの問題に正面から取り組んだ例はなく、本論文によって世界で初めてその計算法が確立されたと言ってよい。

本論文は、5章で構成されており、以下のような内容が述べられている。

第1章では、電力系統運用計画問題の基本的な背景について述べるとともに、基本的な発電方式や、送電および配電システムの概要について整理している。また、電力系統の経済運用に対する従来手法について述べ、本研究の位置づけ、目的などを明らかにしている。

第2章では、電力系統における発電計画問題の数学的な定式化とその一般的な解法を示している。特に、本論文の主題である燃料供給に制約がある場合には、問題が極めて複雑になることを詳細に論じている。

第3章では、進化的計算法から派生した主な分野について紹介している。進化的計算法は、名称が示すように、自然界の進化をコンピュータシステムで応用するために、生物学に触発されて開発された手法である。したがって、この章の前半では、これらの計算法が導かれたダーウィンのパラダイムに重点を置きながら、自然界の進化の主要な概念について述べている。後半では、各進化的手法の類似性や相違点を明らかにしつつ、新ダーウィン進化論を模倣した手法を紹介している。その中から、3つのアルゴリズム-遺伝アルゴリズム(GA)、進化的戦略(ES)、進化的プログラミング(EP)について詳述している。

第4章では、発電計画問題へのEP法の適用法について述べている。まず、計算モデルを作成するために必要な数学ツールに関する準備的説明を行い、古典的な発電機起動停止計画問題に、最適な計画案を探索するための新しいコード化システムを導入した手法を提案している。次に、燃料供給量に制約がある場合の経済負荷配分問題に対する新しい解法を提案している。このとき、バルブポイントローディングの影響について詳細に考慮している。最後に、燃料供給量制約を考慮した発電機起動停止計画問題への適用を行っている。提案アルゴリズムによって得られた結果は、従来手法の中のいくつかから得られた解と比較検討されている。

第5章では、各章の要約を述べると共に、進化的計算法の系統最適化分野への適用に関する将来展望についても論じている。

これを要するに、著者は、電力系統における運用計画問題に対する進化型アルゴリズム(EP法)の適用法を開発し、従来解くことが困難とされていた大規模・複雑な問題に対しても実用的な時間内で精度良く解を得ることを可能としたものであり、電力系統工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。