

早稲田大学大学院 環境・エネルギー研究科

博士論文審査報告書

論 文 題 目

経済性及び環境性を協調した
分散型電源大量導入時の
多目的発電機運用計画に関する研究

**Multi-Objective Optimal Scheduling of Generating
Units on Economic and Environmental Aspects
including Significant Penetration
of Dispersed Sources**

申 請 者

山下 大樹
Yamashita Daiki

環境・エネルギー研究科
環境・電力システム研究室

2013 年 1 月

博士論文審査報告

電力系統は、電気エネルギーの発生（発電）、輸送（送配電）、利用（消費）をつかさどる大規模な一体型システムであり、膨大なエネルギーの発生、輸送に係わることから環境への影響も極めて大きい。とりわけ、発電機運用に伴う二酸化炭素の排出量は大きく、その大半は火力発電所が用いる化石燃料の燃焼により発生している。こうした状況から、我が国では火力発電だけでなく、水力発電や原子力発電といった二酸化炭素排出量の少ない電源の割合を増加させる方向が選択されてきた。しかし、2011年3月11日の震災に伴う原子力発電所の事故によって、原子力発電への反対意識が高まり、現在は国内の原子力発電所のほぼ全てが停止され、今後の存続を含め議論がなされている。将来にわたり、原子力発電設備からの発電量が現状維持もしくは漸次減少していくとすると、設備容量の大きい火力発電設備からの発電量がそれを補うこととなるのは間違いない。

一方、二酸化炭素を全く排出しない太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギー利用電源の普及が現在急速に進められている。2012年7月に施行された再生可能エネルギー固定価格買取制度により、今後ますますこれらの導入は加速されると予想されるが、再生可能エネルギー利用電源は出力制御が困難であるため、高品質な電力供給（周波数や電圧の適正值への維持）のためには導入容量に対応した発電予備力を確保しておく必要がある。こうした電力品質確保においても火力発電が果たす役割は今後ますます大きくなっていくと予想される。

このような背景から、本論文においては火力発電機群の運用に着目し、再生可能エネルギーを利用した発電や電気自動車といった分散型電源が既存の電力系統に大量導入された状況において、経済性（運用コスト）及び環境性（CO₂排出量）から発電機運用を最適化できる解析手法と解法アルゴリズムの開発を行った。また、これらの分散型電源の大量普及が発電機運用に与える影響について、多面的に分析した。

本論文は、6章からなっている。

第一章は、序論であり、わが国の電力需給を取り巻く新たな課題、発電機運用計画策定の重要性、さまざまな運用制約を考慮した多目的最適化手法及びアルゴリズム開発の必要性を明らかにしている。

第二章では、電力系統運用の新たな解析手法と解法アルゴリズムの開発を目的として、発電機運用計画のうち火力発電機の短期需給計画を対象とした環境性と経済性を協調した発電機運用計画最適化手法の提案を行った。ここで提案した手法は、逐次型解列法、動的計画法、二次計画法及び重み係数法から構成されている。この成果としては、発電機運用計画が有する離散整数混合問題という性質から従来解析困難であった大規模な問題を高速で最適化する手法を開

発したこと、経済性や環境性といった単一の目的関数を最適化するのではなく、両者を協調して多目的に発電機運用計画問題を最適化し、さらにはトレードオフ曲線を求める手法を明らかにしたことが挙げられる。また、求められたトレードオフ曲線から発電機運用計画におけるCO₂排出量削減価値(シャドープライス)を算定できることを示した。

第三章では、開発した手法とアルゴリズムを分散型電源が大量導入された電力システムに対して適用可能とするために解析手法と解法アルゴリズムを拡張している。被災地をはじめとする各地域において導入が進められている風力発電が大量に導入された時の発電機運用計画問題の最適化手法を開発し、従来の手法では考慮されていなかった風力発電導入に伴う電力システムの新たな運用コストやCO₂排出量の増加分を算出することが可能であることを示した。風力発電導入は火力発電機による発電量を削減することができるため、運用コスト及びCO₂排出量共に削減できる。しかし、従来、風力発電有の出力変動によって起こる周波数変動抑制に必要となる予備力増加や垂下特性といった制約条件が考慮されていなかった。そこで、風力発電の大量導入に伴う新たな制約を考慮した際の運用コスト及びCO₂排出量の増加を算定する手法を提案した。さらに、開発した手法を2011年3月以降の冬を想定した東北地方モデルに適用した。東北地方における風力発電大量導入に伴う火力発電機運用計画変更を求め、これに伴い変化する運用コスト及びCO₂排出量を算定することで経済性と環境性のトレードオフ関係を明らかにし、提案手法の実電力システム運用における有効性を検証した。

ついで、近年急速に導入が進む電気自動車(EV)の大量普及時を想定した発電機の運用計画問題の最適化手法を開発した。EV大量普及は、それらの充電に伴う電力需要増加をもたらすため、EVによる電力需要パターンの予測を行うことが必要となる。このためには膨大な数のEVの実運用データが必要であるが、EVは未だ普及初期段階であり、実データを収集し多数のEVの運用パターンを特定するのは困難である。そこで本論文では、このEV運用パターンについてガソリン車から特定したパラメータを用いた確率的モデルを開発し、そこからEVの大規模導入により発生する電力需要を算出する手法を提案した。この結果を標準的な発電機モデルに適用することで、EV導入が進むことで経済コスト及びCO₂排出量は線形的に増加していくが、普及台数がある一定台数を越えた段階で一時的に急激な運用コスト及びCO₂排出量の増減(ジャンプ現象)が発生することを示した。そして、その原因は夜間電力需要パターンの変化によるものであるということを明らかにした。また、EV運用パターン(夜間充電パターン)を変えることにより、その経済性及び環境性の悪化を低減できることを示した。提案する手法を、標準的な発電機モデル及び東北地方モデルにおける運用コスト及びCO₂排出量の算定に適用し、その

有効性を検証した。

第5章では、これまで提案した解析手法と解法アルゴリズムを統合して発電機運用計画問題の最適化を行い、ついで、金融工学に基づくアプローチによるEV普及規模の動的予測モデルを提案している。ここでは、EV普及には、需要部門、生産部門及びインフラビジネスセクターの3部門が相互に関係し、また公的助成金投入によってその普及が促進されるという前提に立って、予測モデルを構築している。また、そのモデルに最適制御理論を適用することで、公的助成金はその市場に投入された時の市場発展の最大ポテンシャルを特定した。この手法を東北地方モデルに適用し、東北地方におけるEV普及の発展度合いに応じた発電機運用サイドから見た経済性及び環境性に対する影響を評価した。これによりEV普及のための公的助成予算投入による経済性及び環境性における効用をEVの普及だけでなく発電機運用面からも総合的に分析し、東北地方において、公的助成予算がEV業界全体に対して投入された場合、大幅な二酸化炭素排出量削減効果が得られることを明らかにした。また、EVを発電機運用における発電機予備力として用いることの効用も定量的に評価可能となった。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果と知見をまとめ今後の解決課題を明らかにした。

本論文では、風力発電や電気自動車(EV)といった分散型電源の電力システムへの大量導入時の発電機運用における多目的最適化計画手法と解法アルゴリズムを開発し、また、金融工学的アプローチによるEV普及の動的予測モデルを提案した。これらを組み合わせることで、発電機運用におけるEV導入によるCO₂削減効果を包括的に評価できる解析手法を開発し、この提案手法を実規模電力システムモデルに適用することにより、その有効性を検証した。

このように本論文は、電力システム工学、環境エネルギー工学、数理工学および金融工学分野の進歩に寄与するところが大きく、博士論文審査委員が慎重に協議した結果、「合格」と判定した。

2012年12月

主査)	早稲田大学教授	工学博士(早稲田大学)	横山 隆一
委員)	早稲田大学教授	工学博士(早稲田大学)	勝田 正文
	早稲田大学教授	(早稲田大学)	友成 真一