

電気事業の自由化における電力系統制御と電力市場

学位論文内容の要旨

電力自由化は、電力供給の効率化と電気料金の低廉化の観点から、わが国を含め世界各国で注目されている。一方、先行諸外国においては、この電力自由化による問題点が顕在化しつつある。例えば、米国カリフォルニア州においては、相次ぐ大規模停電や、電力取引価格の暴騰、電力小売事業者の倒産などにより電力供給が混乱した。英国では強制プール型の電力市場を設計・運営していたが、寡占企業の価格操作と見られる価格変動が問題となり、新たに電力市場を構築しなおすこととなった。

本論文では、こうした電力自由化問題を二つの側面から捉えている。一つは電力系統の運用・制御の側面である。電力自由化により系統設備の増強が困難になる恐れがあることから、電力供給の信頼度維持のための運用段階における制御の重要性が増大し、特に電力系統予防制御がこれまで以上に注目されると思われる。このとき、系統運用者が発電事業新規参入者を制御することとなるが、この新規参入者の予防制御への協力に対しては、正当で理解しやすい対価を公正に設定・公開する必要がある。もう一つの側面は、電力市場で決定される電力価格についてである。電力価格変動や高騰に対してその仕組みを明らかにする必要がある。ただし、電力市場は新しい制度であることや、国や地域によって状況が異なること、さらに、電力という財が大量に貯蔵することが困難であると共に、生活必需品としての性格を持っていることから、他の一般的な財から得られる知見の電力への適用については、検討の余地が残されており、一般的な見解が極めて少ない。ゆえに過去の電力市場、海外の電力市場ならびに他産業の市場のデータを利用することは、適切であるとは言い難く、それらのデータを必要としないアプローチを試みる必要がある。

本論文は、こうした電力自由化に伴い生じる電力系統制御、ならびに電力市場における電力価格について筆者が遂行した研究成果をまとめたものである。

本論文は全6章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

序論では、1990年代を中心に世界に広がった規制緩和を概観し、電気事業規制緩和の社会的意義について述べている。さらに、電力系統運用制御並びに電力の価格に与える影響について、筆者の着目点を述べると共に、本論文の位置づけを行う。

第2章では、電気事業の自由化の問題点を整理し、本論文における筆者の観点を明確にしている。この目的のために、国内外の電力自由化の現状について文献調査を行っている。海外の事例としては、北欧、米国、英国における電力自由化の現状をとり上げている。さらに詳細な海外事例として、米国ニューヨーク州の電力市場ならびに系統運用について、実際に使用されている運用マニュアル等について内容をまとめている。また、わが国における電気事業の規制緩和についても整理を行っている。

第3章では、競争環境における電力系統の新しい制御のあり方のひとつとして、誘導価格による予防制御手法を提案している。提案する予防制御手法は、従来の予防制御の枠組を維持しつつ拡張するものである。ゆえに本論文における予防制御は、平常状態にある電力系統が予想される事故に対しても供給支障を起こさぬよう、かつ新規参入者の入札段階で定められた卸電力供給量を考慮しつつ、発電機の負荷配分を行うためのものとしている。ところで新規参入者にとって、実際に発生していない事故に対しての予防制御のために、

自らの出力を変更することは経済性を犠牲にする恐れがある。従って、系統運用者が新規参入者に対して予防制御のための出力変更指令値を出すことは好ましいとはいえない。そこで本論文では、新規参入者の予防制御のための出力変更分に対し、誘導的な電力買い取り価格を設定することによって、予防制御を行うことを提案している。本論文では、この電力買い取り価格を誘導価格と呼ぶ。ここで系統運用者は、予防制御に必要なコストを計算し、予防制御の効果に応じてこのコストを配分するという、合理的な観点から誘導価格を設定することが求められる。一方で新規参入者は、誘導価格を基に自主的に予防制御に協力する。本論文ではこの誘導価格を、先に述べたような合理的な観点から解析的に導出し、最適潮流計算によりその値を求めている。提案する誘導価格は、その内訳として、市場限界価格と予防制御に関する価格を持つものであり、これらの値は全ての市場参加者に公平かつ理解しやすい値として公開されることが望ましい。しかし、通常の電力潮流計算による解法を用いた場合、誘導価格の内訳はスラック母線の位置によって変化してしまう。そこで本論文では、仮想スラック母線による最適潮流計算手法を開発し、目的の結果を得ることに成功している。

第4章では、新しい電力供給の経済的な側面に対するアプローチとして、電力市場の時系列シミュレーション手法を提案している。構築するモデルは、マルチエージェントシステムとして構築された人工市場であり、個々の経済主体の設定を行い、シミュレーションを実行することで、全体の振る舞いとしての電力価格の変動や、電力取引量を計算・分析することができる。個々の市場参加者については、火力発電所の燃料費特性や、電力需要の価格弾力性など、電力システムの一般的な特徴を考慮したモデル化を行っている。また、電力市場の入札ルールについても、一般的な需要・供給曲線から求める方式と、シングルバイヤー方式についてシミュレーションが実行できるようにしている。こうしたボトムアップ型のアプローチにより、電力市場の海外事例や過去の実績データの入手が困難であっても、電力市場の入札ルールや需給設備容量の違いなどが電力取引に与える影響についても検討を行うことが可能である。

第5章では、提案した電力市場の時系列シミュレーション手法を用いて、以下の5点についての検討を試みている。まず一点目としては、価格弾力性について検討している。二点目として、電力貯蔵装置の影響について検討している。価格弾力性と電力貯蔵装置により、電力価格の変動が抑えられることを確認した。このことは、電気は生活必需品であり、電力の大量貯蔵が困難であることが、電力価格の形成に甚大な影響を与えることを示唆している。三点目としては、シングルバイヤー方式の入札について検討している。シングルバイヤー方式の入札は、一般的な入札方式と比べ需要逼迫に対する電力価格の反応が鋭敏であることを示している。四点目は、価格支配力について検討している。ここでは、寡占発電業者が談合などの不正行為を行わない状態で、価格操作が行われているかのような電力価格の高騰を観測している。最後の五点目は、電気事業者に対する電力市場の影響について検討している。ここでは、電力市場における需給不平衡を電気事業者の負荷に対する条件付確率密度関数として集計し、さらに電気事業者負荷持続曲線に畳み込むというという演算を行うことで、電気事業者の電源構成に対する電力市場の影響を評価している。本検討により、規制緩和が電気事業全体の地球温暖化ガス排出量を増大させるとは一概には言えないとの試算結果を得た。

第6章は、結論であり、本論文により得られた新たな知見を取りまとめると共に、本研究分野における今後の展望について述べている。

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

電気事業の自由化における電力系統制御と電力市場

電力自由化は、電力供給の効率化と電気料金の低廉化の観点から、わが国を含め世界各国で注目されており、今や世界的な潮流となっている。一方、先行諸外国においては、この電力自由化による問題点が顕在化してきている。例えば、米国カリフォルニア州においては、相次ぐ大規模停電や、電力取引価格の暴騰、電力小売事業者の倒産などによって、電力供給が混乱した。英国では、強制プール型の電力市場を設計・運営していたが、寡占企業の価格操作と見られる価格変動が問題となり、新たに電力市場を構築しなおすこととなった。

本論文は、こうした電力自由化問題を二つの側面から捉えている。一つは、電力系統の運用・制御の側面である。電力自由化により系統設備の増強が困難になる恐れがあることから、電力供給の信頼度維持のための運用段階における制御の重要性が増大し、特に電力系統予防制御がこれまで以上に注目されると予想される。このとき、系統運用者が発電事業新規参入者をも制御することとなるが、この新規参入者の予防制御への協力に対しては、正当で理解しやすい対価を公正に設定・公開する必要がある。もう一つの側面は、電力市場で決定される電力価格についてである。電力価格変動や高騰に対して、その仕組みを明らかにする必要がある。ただし、電力市場は新しい制度であることや、国や地域によって状況が異なること、さらに電力という財が大量に貯蔵することが困難であるとともに、生活必需品としての性格を持つことから、他の一般的な財から得られる知見の電力への適用については、検討の余地が残されており、一般的な見解が極めて少ない。そのため、過去の電力市場、海外の電力市場、他産業の市場のデータを利用することは、必ずしも適切であるとは言い難く、それらのデータを必要としないアプローチを開発する必要がある。

本論文は、こうした電力自由化に伴い生じる電力系統制御、および電力市場における電力価格についての研究成果をまとめたものであり、その主要な成果

として、以下の4点に集約できる新しい知見を得ている。

第一に、国内外の電力自由化の現状、先進例である米国ニューヨーク州での電力市場と系統運用の実例の調査から得られた知見に基づき、電気事業の自由化の問題点を明確化している。

第二に、競争環境における電力系統の新しい制御のあり方のひとつとして、誘導価格による予防制御手法を、新しく提案している。この予防制御手法は、平常状態の電力系統で予想される事故に対して供給支障を起こさず、かつ新規参入者の入札段階で定められた卸電力供給量を考慮しながら発電機の負荷配分を行うための手法であり、新規参入者が予防制御のために出力変更を行う場合に対する誘導的な電力買い取り価格（これを誘導価格と呼ぶ）を設定することで、予防制御に新規参入者も寄与しやすくする効果的な方法である。

第三に、新しい電力供給の経済的な側面を明らかにするために、電力市場の時系列シミュレーション手法を開発し、電力市場の入札ルールや需給設備容量の違いなどが電力取引に与える影響についての検討を可能とした。構築されたモデルはマルチエージェントシステムとして構築された人工市場である。個々の市場参加者について、電力システムの一般的な特徴を考慮したモデル化を行うとともに、電力市場の入札ルールについても、一般的な需要・供給曲線から求める方式と、シングルバイヤー方式についてシミュレーションできる。今後の電力市場のルール設計等に対し、強力な分析手段を提供している。

第四に、提案した電力市場の時系列シミュレーション手法を用いた分析により多くの知見を得ている。まず、価格弾力性と電力貯蔵装置によって電力価格の変動が抑えられることを明らかにした。また、シングルバイヤー方式の入札が一般的な入札方式と比べて需要逼迫に対して電力価格の反応が鋭敏であること、電力市場が寡占状況の場合、寡占発電業者が談合などの不正行為を行わない状態でも、価格操作が行われているかのような電力価格の高騰が有り得ること、電気事業者の電源構成に対する電力市場の影響を評価すると、規制緩和が電気事業全体の地球温暖化ガス排出量を増大させるとは一概には言えないことなどを明らかにしている。

これを要するに、著者は、自由化、規制緩和・競争環境化に入った電気事業に対して、予防制御の側面からの電力制御の新しい在り方、電力市場のルールや市場特性、電力市場の振る舞いと各種要因の影響などについて多くの新知見を得たものであり、電力系統工学、電力工学、電力経済学に対して貢献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。