

Market Model Considering Bilateral Transactions and Line Congestion in a Deregulated Electric Power System

(規制緩和後の電力系統における相対取引を対象とした混雑管理)

学位論文内容の要旨

本論文では、競争環境下の電力系統において、マッチングによる自由取引市場を解析するためのモデルを開発すると共に、電力系統における混雑を適切に管理するための一手法を提案している。

米国を中心に発達し、世界各国の標準的な電力市場となりつつあるものとして、オークションとは異なる「マッチング」による自由取引がある。すなわち、市場管理者の整理の下、電気の売り手が、いつでも電気の売値と量を市場に向かって提示することができ、買い手も様々な条件で電気の購入希望を出すことができる。そして、売り手の提示した値段と買い手の提示した値段とが突き合わされ(マッチングされ)、条件にあったものが売買成立となる。本論文では、まず、このような逐次的な自由取引によって価格が決定される過程を、株式市場における取引をベースにしてモデル化する手法を開発した。提案手法は、買い手は可能な限り安い売り手から買い、売り手は可能な限り高い買い手に売るように、取引相手を決定していくもので、このプロセスは、取引当事者間で価格を確率的に上下させながら、発電側の容量制約の下ですべての需要家の需要が満たされるまで繰り返される。これによって、複数の発電事業者および複数の大口需要家間での自由取引の価格と取引量が決定され、その結果を記述する相対取引行列 (BTM) が算出される。

ところで、電力系統においては、特定の送電線に非常に多くの潮流が流れる (送電線の混雑) ことがないように系統運用を行うことが必要である。従って、上記の取引市場において、市場管理者は送電混雑が起らないように市場の取引を適切にマネジメントすることが求められる。本論文では、マッチングによる自由取引の結果、混雑が発生するような場合、混雑の大きさ及び混雑への影響の度合いに応じて、当事者に公平に混雑料金を課すことにより、相対取引行列 (BTM) を自律的に修正させる枠組みを提案している。すなわち、BTMの決定の際に、混雑に伴う料金負担の項を組み入れることにより、混雑が起らないようにBTMを構築するような管理方策である。ここで、混雑における各取引の影響の度合いは、当該取引のみが存在する場合の潮流と、当該取引以外のすべての取引が同時に行われた場合の潮流との平均値として算出する方法を開発している。また、混雑料金は、混雑が完全に解消されるまで逐次的に調整される。また、潮流の値を計算するために、本論文では直流法潮流計算と交流法潮流計算の両方を適用している。特に、交流法潮流計算では送電損失も考慮することができるため、同様の考え方で送電損失の増加への影響の度合いに応じて送電損失料金を課す考え方についても検討を行った。

提案手法の有効性を検証するため、IEEE14とIEEE300母線の2つのモデルシステムを用いて様々なシナリオを考慮したシミュレーションを行った。その結果、提案手法によって、混雑がなく、しかも売り手側の利益、買い手側のコストの両方が適度にバランスした取引を計算できることがわかり、実際に行われると予想される取引を、ある程度忠実にシミュレーションできていることが確かめられた。

本論文の各章における具体的な内容は以下の通りである。

まず、第1章では世界各国で採用されているいくつかの電力市場モデルについて紹介している。具体的には、米国、英国、スウェーデン、ノルウェー、オーストラリア、ニュージーランド、韓国、日本、アルゼンチン、チリ、中南米（グアテマラ、エル・サルバドル、ニカラグアとパナマ）、ナイジェリア、インド、の電力市場を取り上げ、そのモデルおよび歴史について説明している。上記の世界各国の電力市場モデルを整理すると、大きく、プールモデルと相対取引モデルの2つに分けられるが、本論文では、このうち相対取引モデルを基本として自由取引の価格と取引量を決定し、その結果を記述する相対取引行列（BTM）を算出することを考えている。本章では相対取引行列の数学的な概念についても記述している。

第2章では相対取引行列（BTM）を計算するための具体的なアルゴリズムを提案している。すなわち、前日の負荷予測に基づき、個々の参加者の初期の入札価格を与え、両者の折り合いがつくまで、価格を上下させるような交渉のプロセスを実行する。次に、ここで得られた当事者間の折り合い価格に基づき、発電事業者は誰にどのくらいの電力を販売すればよいか、供給事業者は、誰からどのくらいの電力を購入すればよいかを決定し、相対取引行列を確率的に決定する。この際、各発電事業者は発電機の出力上下制限の範囲内で発電し、供給事業者は需要と等しい量だけ購入するという制約条件を考慮する。IEEE14とIEEE300母線の2つのモデルシステムを用いて様々なシナリオを考慮したシミュレーションを行った。2つのモデルシステムを用いて、相対取引行列のコストと利益が計算されている。本論文で紹介された相対取引行列（BTM）を計算するアルゴリズムとリニア・プログラミング（LP）手法のコストと利益を比較している。

第3章では、第2章で提案した相対取引行列（BTM）を計算するアルゴリズムを基本として、送電線が混雑することがないように系統運用を行うための管理方策について検討している。直流法と交流法の潮流計算を用いて、相対取引毎の送電線の混雑が一つ一つ計算されている。混雑がある場合、参加者にその責任に応じて混雑料金を課し、送電線の混雑がなくなるように相対取引行列を計算する手法を開発している。IEEE14とIEEE300母線の2つのモデルシステムを用いて様々なシナリオを考慮したシミュレーションを行った結果、その有効性が確認されている。

第4章では、長期間の相対取引を考慮して、相対取引行列（BTM）を計算する方法を説明している。第2章で提案した入札方法とリニア・プログラミング（LP）手法で相対取引行列のコストと利益を計算している。IEEE14とIEEE300母線の2つのモデルシステムを用いて様々なシナリオを考慮したシミュレーションを行った。

第5章は、本論文のまとめである。各章で得られた結果をまとめると共に、第2章の相対取引行列（BTM）を計算するアルゴリズムと相対取引モデル、および第3章の混雑管理方法の実用的な適用方法について説明している。最後に第4章の長期の相対取引契約を基礎とした相対取引行列（BTM）の実用的な適用方法を説明している。

付録IではIEEE14とIEEE300母線の2つのモデルシステムのデータについて記述している。付録IIでは、FORTRAN 90で作成した相対取引行列（BTM）を計算するアルゴリズムのプログラムについて説明している。

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

Market Model Considering Bilateral Transactions and Line Congestion in a Deregulated Electric Power System

(規制緩和後の電力系統における相対取引を対象とした混雑管理)

本論文では、競争環境下の電力系統におけるマッチングによる自由取引市場を解析するためのモデルおよび電力系統における適切な混雑管理手法について新しい手法を提示している。

マッチングによる自由取引は、米国を中心に発達し、世界各国の標準的な電力市場となりつつある。この市場では、市場管理者の整理の下で、電気の売り手がいつでも電気の売値と量を市場に向かって提示することができ、買い手も様々な条件で電気の購入希望を出すことができ、その上で売り手の提示した値段と買い手の提示した値段とが突き合わされ（マッチングされ）、条件にあったものが売買成立となる。本論文では、このような逐次的な自由取引によって価格が決定される過程を、株式市場における取引をベースにしてモデル化し、解析する手法を開発している。

また、電力系統においては、特定の送電線に非常に多くの潮流が流れる（送電線の混雑）ことがないように系統運用を行うことが必要である。したがって、上記の取引市場においても、市場管理者は送電混雑が起らないように市場の取引を適切にマネージメントすることが求められる。本論文では、マッチングによる自由取引の結果により電力系統に混雑が発生するような場合について、混雑の大きさと混雑への影響の度合いに応じて、当事者に公平に混雑料金を課すことで相対取引行列(BTM)を自律的に修正させる枠組みを提案し、その有効性を明らかにしている。

本論文で述べられている新知見および成果は、主として次の3つに集約できる。

第一に、逐次的な自由取引により価格が決定される過程を株式市場における取引をベースにしてモデル化する手法を開発している。すなわち、買い手は可能な限り安い売り手から買い、売り手は可能な限り高い買い手に売るよう取引相手を決定することを基本にして、取引当事者間で価格を確率的に上下させながら、発電側の容量制約の下ですべての需要家の需要が満たされるまで市場での売買が繰り返されるものとしてモデル化している。これによって、複数の発電事業者および複数の大口需要家間での自由取引の価格と取引量が決定され、またその結果を記述する相対取引行列 (BTM) が評価できることになる。

第二に、自由取引環境下での電力系統の混雑解消に対して、混雑料金を課すことで相対取引行列(BTM)を自律的に修正させる枠組みを提案している。これは、BTMの決定の際、混雑に伴う料金負担の項を組み入れることで混雑が起こらないようにBTMを構築するよう誘導する管理方策である。ここで、混雑における各取引の影響の度合いは、当該取引のみが存在する場合の潮流と、当該取引以外のすべての取引が同時に行われた場合の潮流との平均値として算出する方法が開発されている。また、混雑料金は、混雑が完全に解消されるまで逐次的に調整されることとなる。

第三に、提案手法の有効性を検証するため、IEEE14母線およびIEEE300母線の2つのモデル系統を用いて、様々なシナリオを考慮したシミュレーションを実行している。また、その結果から、提案手法により、混雑がなく、しかも売り手側の利益、買い手側のコストの両方が適度にバランスした取引を実現できることを明らかにするとともに、この手法によって実際に行われると予想される取引をある程度忠実に模擬できていることを明らかにしている。

これを要するに、著者は、規制緩和後の競争環境下における電力系統の相対取引を対象とした混雑管理問題に対して、新しい枠組みを提示するとともに、その有効性を明らかにし、また関連する多くの新知見を与えており、電力系統工学に対して貢献するところ極めて大なるものがある。

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。