電力自由市場下での需給マネジメントのモデル化

解説

キーワード

電力市場、電気料金、余剰電力買取制度、電力融通、電力託送、ゲーム理論

正員 浅野 浩 志

東京大学

1. 電力市場自由化の潮流

今日、電力市場の自由化は、国際的な潮流であり、電力供給システムのあり方に根本的な変革をもたらす可能性がある。このような大幅な環境の変化に対応する、新しい電力需給方策の考え方を確立する必要がある。そこで本解説では、自由化された電力市場における需給運用および設備形成のあり方についての検討事例を示す。

電力市場の自由化には発電部門のみへの競争導入から、ついで託送の導入、さらに垂直統合を分離し、送電網へのアクセスを開放するなど幾つかの段階がある⁽¹⁾。どの程度の自由化が望ましいかは、各国固有の技術的・制度的・政治的背景によりさまざまであり、一定の評価を得るまでには、模索期間が必要である。電気事業審議会によれば、我が国では当面卸売市場の自由化を中心に規制緩和を進める方向である⁽²⁾。我が国にふさわしい電力市場の自由化の方向を探ることは極めて重要な課題である。

なお、誌面の制約から若干の専門用語を使用せざるを得なかったが、さらに専門的な内容に関心をもたれた読者は、文献を参照されたい。

2. 将来電力システムのモデリング

現段階では、我が国の電気事業者は、垂直統合の経済性を享受する範囲内で操業している⁽³⁾。従って、我が国の実情を鑑みて、ここでは、垂直統合は維持されているものの、発電部門への参入や託送を認めた形態の電力市場を想定する(図1)。参加者として規制当局、電力会社、独立系発電業者(IPP)、大口需要家、一般需要家から構成される電力市場を考えた。ここで、規制当局は、参入・退出規制は行わないものの、一般需要家への料金や環境規制は継続する。電力会社は、一般需要家への供給義務を負うが、大口需要家に対しては、契約に基づき、電力供給あるいは送電サービスを提供する。電力会社間では、電力融通・託送が行われる。IPPは規制を受けない競争的な料金で電気事業者に卸売電するか、あるいは、電力会社の送配電網を使用して大口需要家に直接売電する。大口需要家は、自家発などにより余剰電力を電力会社に売電できる。すべての料金は交渉により自由に決められるが、電力会社に供給義務は要求できない。最後に、一般需要家は地元の電力会社からのみ電力供給を受ける。

上述の全体モデルに含まれる全要素を同時に扱うのは、

図1 電力市場自由下での需給戦略

Analysis of Planning and Operation in Deregulated Power Markets
By Hiroshi Asano, Member (University of Tokyo)

困難であるため、また、すべての変化が同時に起きるわけではないため、ある側面に注目してモデル化を試みた。多くの場合、市場参加者の意思決定問題に帰着されるため、モデル化にはゲーム理論を応用した。第一に重要な問題は、従来画一的であった料金設定を、市場の競争条件に応じてより柔軟に設定することの是非を問うことである。第二に、これまで電源計画や運用上、明示的に考慮されることのなかった需要家保有の分散型電源の運転形式が一般需要家、自家発需要家、電力会社の利得にどう影響を与えるか分析する。この二つの分析では、自家発からの逆潮流がない場合を想定している。三番目の課題としては、自家発から発生する余剰電力の販売システムの選択や買取料金などを検討することである。以上は、一地域を対象としているが、今後は、電力の卸売り市場が整備されるにしたがって、多地域間の電力融通・託送の問題、とりわけ融通・託送の価格付けが重要になる。

今回は主に需給運用面に焦点を当てたが、これを計画画面にまで拡張し、いわゆる統合資源計画（IRP）モデルへと発展させていくことも重要と考える。

3. 競争的電気料金制

産業用や業務用需要家は、買電からコージェネレーションなどの自家発へシフト（系統バイパス）しうる。このようなクリーム・スキミング現象によりベース需要が失われると、残された小規模のとりこ需要家に大きな固定費負担が課される。これによる単位需要当たりの料金上昇はさらに自家発シフトを招き、需要家の系統離脱を促進する。

この現象に対応する一つの方法は、系統バイパスを起こす恐れのある需要家に反バイパス・インセンティブ料金を適用することである。実際、アメリカの一部の電気事業者は共通費配分ルールを変更し、競争的な大口需要分野への負担を相対的に軽減する料金設定を実施しつつある。しかし、このような一種の差別料金は常に需要家間の公平性を脅かす危険を孕んでいる。そこで、需要家間の公平性を確保しながら、自家発需要家の系統離脱を引止め、かつ既存自家発の有効利用を図るため、自家発需要家向けの料金設定問題をゲーム問題として定式化し、経済厚生上望ましい料金設定を導出した⁽⁴⁾。

電気事業者と自家発保有需要家とが協調して社会厚生を最大化する場合と、両者が競合する場合とを分析した。さらに競合する場合は決定権に順位のないナッシュ・ゲームと、順位のあるスタッケルベルグ・ゲームを適用した。その結果、自家発の限界費用が電気事業の限界費用に近接する場合など、両者が競合関係にあるときは、自家発需要家にとっての最適価格は一般需要家にとっての最適価格よりも低く設定される。これは競合関係にある場合、電気事業が自家発需要家に引き料金に適用することは社会的にも（自家発を保有しない需要家にとっても）望ましいことを意味する。電力市場に本格的な競争が導入される場合には、競合相手の電力供給コストを陽表的に意識した料金設

定が必要になることを示すものといえる。このようなゲーム論的分析では、状況設定により均衡解は複数存在するが、そのどれが現実的であるか考えるのが応用上重要である。

4. 分散型電源と時間帯別料金制を導入した電源計画

将来分散型電源が大量に導入された状況では、分散型電源の所有者が自由に意志決定できるため、電力系統あるいは一般需要家サイドに思わぬ弊害が生ずることも考えられる。たとえ社会全体の効率化が行われたとしても、一般需要が損害を被るようでは適切なシステムとはいえない。社会全体としての効率の改善のみでなく、一般需要家に与える影響も十分考慮する必要がある。そこで、電力システムの一地域に着目し、分散型電源・新料金制をその地域に導入した場合、それぞれのプレーヤーおよび社会全体にどのような影響を与えるか、年間モデルを用いて検討した⁽⁵⁾。

分散型電源により発電される電力は、それを持つ自家発需要家（全需要量に対して一定比率存在するものとする）が自己消費するものと仮定する（逆潮流なし）。ここでは、簡単化のため、以下の3種類の分散型電源の運転形式を考えることとした。

- ・ ベースロード運転：需要家の日負荷曲線におけるベース需要に相当する部分を自己が保有する分散型電源によって、発電する。
- ・ 負荷追従運転：需要家の日負荷曲線のうちの一定比率を、自己が保有する分散型電源によって発電するというものである。
- ・ 変動分補償運転：需要の変動に応じて運転量を変化させ、変動分のうちの一定比率を自己が保有する分散型電源によって、発電する。

電力消費については、分散型電源が導入された場合、平均電力単価が変化し、それを反映する電気料金の変化が、需要家の需要量を変化させる。電気事業者の保有する電源の種別は、ベースに原子力、ミドルに石炭火力、ピークに石油・LNG火力とし、電源の構成比率は、スクリーニング法のベストミックスにより定めた。

一定料金制・時間帯別料金制を、電気事業者が利潤追求してはいけないという（すなわち原価主義）制約がある場合（case 1, 2）と、制約がない場合（case 3, 4）に適用して検討を行った。その際、自家発需要家の割合は10%の場合と20%の場合を検討した。それぞれ、地域総余剰の最大化問題として得られた解から以下のことがわかった。

電気事業者の制約をなくした場合の最適解は、電気事業者あるいは自家発需要家が一方的にその余剰を増加させた場合であり、社会全体としては必ずしも最適であるとは言えない。従って、電気事業者に収支制約がある場合の時間帯別料金制が最適といえる。しかも、自家発需要家の割合が20%で負荷追従運転を行っている場合である。これは、分散型電源の運転形式をベースロード運転から負荷追従運

図2 分散型電源の運転量も含んだ負荷持続曲線

転へ誘導することの効果が大きいことを示す。

上述の最適解における分散型電源の運転量も含んだ負荷持続曲線を図2に示す。時間帯別料金制の導入が、ピーク需要を引き下げベース需要を持ち上げる効果を与えていることがわかる。負荷率は、ベースケースの56.4%から59.9%に約3.5ポイント改善されている。また、分散型電源の負荷追従運転による効果と相乗し、負荷率が改善されたことが理解できる。よって、トータルエネルギーコストの引き下げが可能となり、一般需要家にとっても健全な電力システムを構築できるものと考えられる。

5. 分散型電源参入問題

コージェネレーション・システムを対象に、電力システムへの逆潮流が認められる場合に、どのような電力販売システムが社会的に望ましいかを、交渉過程の分析に有効であるゲーム理論を応用して検討した⁽⁶⁾。

規制当局が選択する販売方式は電力会社がコージェネレーターの余剰電力を買い取り、消費者に独占販売する買取システムとコージェネレーターがシステムを利用し、消費者に直接販売する使用料システムの2つとした。これら2つの販売方式と電力会社の独占生産/販売の方式を比較し、規制当局、電力会社、コージェネレーターの3者の選択行動を分析した。その結果、1) 買取システムと使用料システムの2つは社会厚生向上となり、電力の独占生産/販売の状況に比べて社会厚生は増大する、2) コージェネレーターは、そのシステム特性上自家消費分に比例して発電しようとするため、買取が許される状況においても独占時の時間帯別発電パターンを保存することが導かれた。

実際には、新規参入した卸発電業者から電力を購入する際、電気事業者の回避可能原価を上限とし、入札により価格を決める予定である。もしも交渉により買取価格が決まるとすればどうなるか、簡単な数値例を紹介する。交渉ゲームの結果、買取価格は、電力および熱需要関数のパラメータ、発電コスト、送配電コストに依存して決まる。コージェネレーションの運転費用は石油燃料、ガスの特約料金を参考に5円/kWhとする。図3に示すように、LP的解は、電力会社の限界費用に等しい。このとき、電力会

図3 買取価格の交渉解

図4 電力融通モデルフロー

社は自らの発電コストに等しいコストでコージェネレーターの余剰電力を買い取るわけであるから、買取による社会的な利得の増分は全てコージェネレーター側に配分される。一方、ナッシュ解は、増分利得を両企業で分け合う形になるため、両者の限界費用の間に決められる。このため、LP的解よりは電力会社側には受け入れやすい。電力会社の限界費用が高くなるほど、コージェネレーターのメリットは大きくなる。これは、限界費用が上昇し、買取への要求が高まるほど売り手側のインセンティブが大きくなるという意味で合理的な解といえる。

6. 電力融通・託送問題

最後に、スポット料金制による需要調整と電力会社間の電力融通・託送の関係に着目し、時々刻々変化する需給に対して経済負荷配分の動的モデルを構築し、スポット料金制と融通電力量の変動について検討した⁽⁷⁾。

図4にモデルフローを示す。経済負荷配分制御で用いられる等増分燃料費法により、各系統毎に基準負荷配分を決

図5 モデル系統構成

図6 各系統の需要と最大出力

める(地域内)。さらに、需給不均衡が発生した系統は、自地域内の電力料金の引き上げによる需要抑制、他系統から融通・託送電力購入などの需給対策を組み合わせ、需給バランスを保つ(地域間)。なお、託送料金は最も簡単な郵便切手型とする。融通・託送電力量は、連系線の送電容量制約を満足し、受電系統側から要求される送電量に送電損失分を含んだ値である。時間帯の長さを1時間とし、シミュレーションでは10時間帯を考察期間とする。

ここでは、一例として3地域系統モデル(図5)を対象としたシミュレーション結果を示す。図6に示すように各系統の需要と最大発電出力を与えた。図7は、受電系統におけるスポット料金と系統1・2からの融通の平均単価を示している。供給不足が大きい時間帯ほど料金を大幅に値上げし、需要を大きく抑えている。電力融通の平均単価は、系統3の料金よりかなり低く、各時間帯で融通単価のより低い系統から受電している。融通電力量が少ないにもかかわらず、第5期の融通単価が高いのは、送電側(系統2)の負荷レベルが高く、発電コストが高いためである。また、スポット料金制と電力融通を組み合わせることにより、大幅な料金の上昇を緩和できることも示している。

7. おわりに

昨今、電力供給システムの抜本的効率化につながるような電力市場自由化の提言が活発になされているが、理論やモデル解析に基づいた明確な論拠が提示されず、抽象的、

図7 スポット料金と平均融通単価

記述的な議論にとどまっている感を否めない。諸外国の例からわかるように、現実の送電線使用料や卸売電力の購入単価は、短期的にはある程度政策的に決められる要素も否定できない。しかし、中長期的には、理論とデータに基づいた新制度の設計が望まれる。従来、この分野は、産業組織論や公益事業論の観点から論ぜられることが多かったが、電力技術やシステム工学の観点からも将来の電力システム効率化の研究がより多く発表されるように、本解説がこの方面の理論研究・実証研究の嚆矢となれば幸である。

なお、本論文は、「電力システム将来問題研究会」(略称 AESOP/GRIMM, 主査: 関根泰次東京理科大学教授)における研究の一部に負っている。とりわけ、「GRIMM-M: 将来電力系統のモデル化」(栗原郁夫主査, 電力中央研究所)の研究会に参加された関係各位から貴重な助言を得たことを記して、謝意を表す。

(平成6年12月15日受付)

文 献

- (1) 浅野:「欧米電気事業における規制と競争—電力託送を中心に—」, 電学誌, Vol. 111, No. 9, pp. 755-762 (平3-9)
- (2) 諸岡:「我が国電気事業における規制緩和の動向」, 電学論 B, 114, 1087 (平6-11)
- (3) 渡辺・北村:「わが国電気事業の垂直統合の経済性」, 電中研究報告 Y 93016 (平6-6)
- (4) 浅野:「自家発電保有需要家向け料金のゲーム論的分析」, 電中研究報告 Y 91004 (平3-10)
- (5) 大山・前出:「分散型電源・時間別料金制の導入が電力システムに与える影響」, 電学論 B, 114 (平6-12)
- (6) 浅野・桑畑:「コージェネレーターを含む電力供給システムのゲーム論的分析」, 電学論 B, 113 (平5-7)
- (7) H. Asano: "Demand Management by Spot Pricing in a Multi-Utility Power System", The 2nd National Demand Management & Energy Efficiency Conference, 11-13 July 1994, Canberra, Australia, pp. 81-86 (1994)

浅野 浩志 (正員) 1960年3月6日生。1984年3月東京大学大学院工学系研究科修了(電気工学)。同年4月(財)電力中央研究所入所。1988年9月から1年間アメリカ・スタンフォード大学客員研究員。1993年4月より東京大学工学部助教授。工学博士。主としてエネルギーシステムの分析と評価に関する研究に従事。計測自動制御学会, エネルギー・資源学会, IEEE, IAAE 各会員。