電力自由市場で用いられるモデリング技術

正員 諸住 哲 (三菱総合研究所)

Modeling methods applied to deregulated power market

Satoshi Morozumi (Mitsubishi Research Institute, Inc.)

Due to deregulation in power sector, several planning and analytical models are being developed based on previous models, which used to be applied power system before deregulation. However, basic structures of the most of model are not changed so drastically. For example, understanding market structure such as old system in California or PJM, it is the best way of understanding several power production models. These market systems are well designed based on dispersed method for determining dispatch of power stations. Also, these modeling are now including Risk Management methods to evaluate position in trading and strategies of those companies.

キーワード：需要予測、需給計算、規制緩和、リスクマネジメント、潮流計算

keywords: Load forecast, Load dispatching, Deregulation, Risk Management, Load Flow calculation

1. はじめに

欧米で先行している電力自由化において、参入事業者側での市場の予測や取引戦略の策定や、市場監視側での市場構造分析などで、旧来からの電力系統用のさまざまなモデリング手法が、形を変えて用いられてきている。特に、旧カリフォルニア市場で用いられた送電線混雑にかかわるゾーンプライシングや、PJMで用いられるノーダルプライスを理解する上では、それまで規制電力会社が用いていた一種の需給計算モデル（米国では Production Model と呼んでいる）の構造を知っていれば非常に楽に理解できる。

また、電力取引事業者が用いている各種の予測手法や市場分析モデルについても、従来から電力分野で用いていた需要想定手法の発展形であることも理解できる。

以下に、自由化の進む欧米の電気事業で用いられている、様々なモデリング技法について、その概要と歴史について解説する。

2. 電気事業規制変化とモデリングの関係

まず、電力の規制の歴史とモデリング技法について、簡単に解説を加える。米国の需要想定専門家の解説によると、電力事業の中でいわゆる計画のために、計量経済学やオペレーションズ・リサーチのような手法が本格的に導入され始めたのが、1960年代から1970年代にかけてであるということである。その理由としては、

・一般家庭や業務施設にエアコンが普及して、需要に温度

感応という概念が入り始めたこと。

- ・オイルショック以降、エネルギー利用の多様化が始まり、単純に GDP のような経済指標にのみ、電力需要が相関を持たなくなったこと。
- ・米国の場合、特に、1978年に成立した PURPA (Public Utility Regulatory Policy Act) 法により州の料金規制が明確化され、電力会社はモデルでそのコスト構造を示す必要性が高まったこと。

が挙げられる。

それに続く 1980年代は、PURPA 法により州政府の発電設備および電気料金に関する許認可権が最も強かった時代である。PURPA 法では、例えばコジェネ化した QF (Qualified Facility) と呼ばれる非電気事業者の認定発電設備からの電力購入を始めて認めている。この際に、電力会社の回避コストでの購入を義務付けたことから、回避コストを計算する機能を需給計画ソフトの中で拡充する必要性が迫られた。

1990 年前後には、デマンドサイド・マネージメント (DSM) が電気事業に導入され、エンドユーザ型（個々の最終需要を積み上げて行うタイプ）需要想定手法と、統合型資源計画 (IRP) と呼ばれる供給計画と需要側の計画を統合して設備計画と需給計画を計算する方法が発達した。

1996年に有名な FERC(Federal Energy Regulatory Commission)が、Order 888,889 と呼ばれる送電線への非差別的なアクセスを容認する命令が出るが、これに相前後して、需給計算ソフトに送電線制約を取り込めるように、

直流法の最適潮流計算機能を取り込み始めたほか、従来の電気事業用の各種の手法が、活発化し始める卸売市場に対応するため、お色直しを始める。このような手法の中には、潮流計算に関係するものや、需要想定関係のソフトウェアも含まれる。特に、このころから電力会社にトレーディンググループが登場し、金融工学的なノウハウが流入し、リスクヘッジやポートフォリオという概念が取り込まれるようになって現在に至っている。

海外、特に米国で特に過去 20 年間に電力の予測・解析・計画手法が、電力の規制環境・事業環境の変化をきっかけに進歩を遂げ、ノウハウとしては日本を 10 年以上引き離れたというのが電力の現場の率直な感想である。なぜ、このように米国のモデリング技法やソフトウェアの変化が早いかというと、電気事業周りの雇用がかなり流動性を持っているためと考えられる。オイルショック以降に電力会社が経済学部出身者の採用をしたり、計画手法の競争となった 1980 年代にはコンサルティング企業に軍関係のオペレーション・リサーチの専門化が転職して来たり、あるいは最近の電力取引の活発化に伴ってガス事業で金融とエネルギー取引の融合を経験したトレーダーが流れ込んで来たりして、常に新しい血を電気事業が受け入れてきたことが大きいと思われる。

3. 自由化と各種モデルの変化

以下に、各種の電力関係のモデリング手法と、自由化の関係を個別に見ていく。

<3・1> 需要想定 需要想定の手法は大きく分けると、図 1 にあるように、次の 2 種類に分類される。

- ・ 計量経済モデル 重回帰分析などにより過去の様々な変数に基づき、目的変数（予想する対象の変数）を外挿で求める手法。目的変数を価格に変えると価格予測となる。短期の予想精度は次のファンダメンタルモデルよりも一般に高い。
- ・ ファンダメンタル（構造）モデル 市場構造をモデル化して需要予測をする手法。需要想定ではエンドユーザ型需要想定がこれにあたる。市場構造の変化は計量経済モデルでは説明できないので、新たな需要機器の普及など構造変化が起こる際には、このモデルを用いる必要がある。価格予測は、需要想定のみではできず、次に説明するプロダクションコストモデルを持ち込む必要がある。

自由化、特に卸売取引の活発化で起こった最大の変化は、長期（数年以上）の需要予測よりも、中短期（数日～半年）の需要予測が重視されはじめたことにある。特に先物取引

では、価格を左右する需要を決定付ける気象情報が週間予報から精度が上がってくるので、トレーディングの最前線であるフロントオフィスや、トレーダーに売買の基本戦略

を伝えるアナリストのいるミドルオフィスでは、週間予測が最も重要とされている。

図 1 需要想定の実現

Fig.1 Improvement of Load forecast methods

ただし、発電資産の売買やベースとなる長期の先物取引の戦略にかかわるバックオフィスにおいてはファンダメンタルモデルも重要である。需要想定ファンダメンタルモデルは、1970 年代にルーツを持ちエネルギー省が国家エネルギー戦略策定に用いている NEM(National Energy Model)と分かれて発展した、EPRI の支援で開発されたエンドユーザモデル (REEPS, COMMEND など) の発展形が使われている模様である。

<3・2> 需給計算 需給計算モデルは、米国では 1980 年代を通じて発展した歴史があるが、その最大の特徴は火力発電ユニットの経済負荷配分に関して燃料費最小となる等入側を解析的には解かないことにある。代わりに、発電設備の出力をいくつかのセグメントに分けて、セグメントの平均増分燃料費を見て離散的に需要に見合うまで積み上げていく方法を採用している（図 2）。

この理由は、発電機の出力をセグメント分けして離散的に扱うほうが、エリア間の融通の容量制約や、環境規制、燃料のテイクアウト制約、および発電機の故障確率を需給計算の中で簡単に織り込めるからである。

図2 セグメント化された需給計算
Fig. 2 Dispatching Method by Segmentation

発電機出力を離散的なセグメントに分けて考える方法は、実は自由化後の前日取引を決める California Power Exchange (既に廃止) や PJM プールで実施されている前日スポット市場のモデル化には好都合で、コストベースで計算されていたセグメントの増分燃料費を、セグメントごとの入札価格に置き換えるだけでそのままモデルが適用できる。

需要想定の方で記述したように、市場の構造変化はファンダメンタルモデル上での分析でしか実現が難しいが、1996、97 年ごろに既に需給モデルでコンサルテーションをしていた複数のコンサルタントがプライス・スパイクの発生を予言していたことにある。米国の需給モデルで得られる時間帯別の LOLP(供給支障電力量)の推移を見たことがある人間ならば、電力市場で必ずしもピーク以外に補修や計画外停止の影響で LOLP が大きくなり、年間数時間しか稼動しない電源が投入される可能性があることを理解していた。これらプライス・スパイクを予言したコンサルタントたちは、一概に長期契約によるヘッジの必要性を理解していた。このようなコンサルタントの中から、世界の代表的な私設電力取引会社である Automated Power Exchange 社が登場している。この会社では、早くから先物・先渡しによるリスクヘッジ手段を提供してきたことが成功につながっている。

また、需給計算型ソフトは、90 年代を通じて確率計算の発達と、送電線要因の取り込みを行っている。確率計算の発達とは、モンテカルロ手法の活用である。これは、欧米通じての共通した変化で、パソコン性能の向上による実行時間のリアリティが出てきたことに起因する。平行して、

需給計算において送電線の容量制約などを細かく考慮するようになってきた。いずれも、計算機による系統運用計画でモデル上 N-1 基準を評価するために発展してきた機能である。この機能は自由取引参加者にとって都合のよい機能で、競争者の行動をモデル化するためにも使われている。

送電線モデルを組み込んだ需給モデルとは、先に記したセグメントごとの積み上げを実施する際に、潮流を計算して送電線制約をチェックする機能で、送電線制約を犯す発電機のセグメントを積み上げる代わりに、送電線制約を犯さない最も低価格のセグメントを選択して積み上げる方法である。この場合、例えば、発電機のロケーションが決めているので、各母線での積み上げ最終セグメントの価格がマージナルプライスになる。

モンテカルロシミュレーションは、発電機ないし送電線に関する故障停止を模擬するために実施される。さすがにモンテカルロシミュレーションはオンラインの系統運用者の運用計画に用いるには計算負荷が大きすぎるので、現状では計画ベースのオフライン計算向けの手法となっている。この機能は、コンティンジェンシーを考慮した送電線の利用可能容量を決める際などに使うのが当初の目的であるが、新規参加者にとっては、参加先市場の一種のリスク分析としてこの機能を使うようである。

モンテカルロシミュレーションの利用に関しては、欧州と米国で文化の違いがあり、欧州では EDF(フランス)が使っている MEXICO というソフトのように発電機および送電線ともにモンテカルロを適用する傾向があるが、米国は民間ソフトである PROMOD(New Energy Associates)では、発電機のみをモンテカルロの対象とし、送電線は重大故障のみをシナリオで設定する考え方を採っている。

<3・3>リスクマネージメント 自由化された電力取引の中で、需要予測と市場分析を束ねながら取引のポジションを決めたり、企業としてのポートフォリオを決定したりする手段をリスクマネージメントと呼ぶ。

図3 リスクマネージメントの流れ
Fig.3 A Flow of Risk Management

リスクマネジメントは、基本的にはいろいろな取引を実施した場合のリスクとゲインを分析し、企業として取り得るリスクとそれにより得る可能性のある利益を評価し、企業として最善の取引のミックスを決める手順である。ここで言う取引には、スポット、先物を含む単純な電力取引から、発電所の建設・売買にいたる資産の取引や、事業参入・撤退まで含まれる。リスクマネジメントの重要な予測要素は、図3にあるように需要予測、価格予測、価格変動幅予測がある。いずれもトレーダーがいる最前線では、様々な計量経済的な予測手法が用いられているようである。その中で使われているツールは、図4に示すように、フロントオフィスでは計量経済型、バックオフィスではファンダメンタル型の手法が駆使される傾向がある。

図4 トレーディング会社で用いられる手法
Fig.4 Methods Applied by Trading Company

図5 ポートフォリオ分析
Fig.5 Portfolio Analysis

図3の最終段階のポートフォリオの最適化では、様々な想定取引に対して、例えば図5に示すようなポートフォリオ平面上でこれまで採用してきたポジションよりも低リスクで高収益が期待できるポジション案を選択する。

また、各取引案の中で、天候デリバティブやコールといったリスクヘッジ手段や、相関のない取引を混ぜるようなリスク分散を実施する案を盛り込む。また、肝心のリスクの想定であるが、一般的にはシステムのリスクを推定する際に使われるFMEA(故障モード影響解析)とほぼ類似の方法でリスクを洗い出し、影響を評価する方法が採られる。

<3・4> その他のモデル ISOのような系統運用者は、従来よりも厳密な系統解析を要する傾向にある。これは、それぞれの取引の系統制約への影響や、送電ロスへの寄与を公平に評価するために、最適潮流計算の出番が増えたり、系統モデルを厳密に細かく設定したりするニーズが高まっている。米国の西海岸の潮流計算では約1万ノード近い系統モデル規模になり、また、東部系統を完全に模擬するためには10万ノード近い計算能力が必要となる。米国の潮流計算プログラムでは、この計算規模を実現しつつあるが、なぜ、このような規模の計算が簡単に収束するのかは開示していない。

4. まとめ

以上のような自由化に伴う、各種の系統計画・解析技術の変化に関する記述は、各ソフトウェアのユーザーに情報開示している入門編資料の最初の2、3枚に記されているレベルの情報であり、実際にはさらにその奥がある。一方で、この分野では、学術論文で参照可能な文献が極めて少ない。この分野は、既に商用パッケージの領域であり、決して学術文献に登場することのない情報である。

また、プライス・スパイクが需要の大小よりも、発電設備や流通設備の停止に強く影響されることを指摘したが、故に計画停止情報を広く得ることができる系統運用者が発電会社の株を持つとインサイダー取引も理論上可能である。したがって、系統運用者を発電事業者などから分離する理由は、会計の問題よりもこのような投資の公平性の問題に起因していると考えられる。米国の系統運用者の役員・職員はこれら当事者との関係を厳しくチェックされている。

(平成13年11月5日受付)

諸住 哲(正員) 1958年2月26日生まれ 1985年3月 北海道大学大学院工学専攻 博士課程終了。1986年4月 株式会社三菱総合研究所 入社。主として、電力技術政策の調査、規制緩和などの海外動向調査、電力向け各種計画・解析ソフトウェアの開発など仕事に従事。現在、エネルギー研究本部に所属、電力技術研究チームリーダー。工博。