

連載

エデルマンの勇者たち (5) 最先端のスマートグリッド MISO

伊倉 義郎

今回のケースは 2011 年の Edelman 賞で最優秀賞を獲得した米国電力業界での例である。流石に一位に選ばれただけあって、ビジネス上の影響度や OR 手法の観点からも大変充実した内容になっている。

受賞した団体は、米国の中西部 ISO（以下 MISO, Midwest Independent Transmission System Operator, Inc.）という NPO である。この MISO は 1998 年に米国中西部 13 州の電力会社や関係企業によって非営利団体として設立され、以来地域の発電と送電に関する電力卸し業務を行っている（ビデオ [1], 及びプレゼン [2] を参照）。

米国では 1992 年に発電と送電を分離して電力卸しマーケットを自由化することが法令化された。その結果、1996 年には米国連邦エネルギー規制委員会（通称 FERC）が、自由化された送電事業での透明性を確保するために、発電と送電間で広く公平なアクセス権を担保する条例を発令している。これを受けてその後送電網を管理運営する地域送電オペレーター（RTO, Regional Transmission Organizations）という組織が米国各地で発足した。MISO はその RTO の 1 つで、米国中西部とカナダのマニトバ州で事業を展開している（図 1 での中央部分）。尚、RTO は別名 ISO（Independent System Operators）とも呼ばれていて、その性格や役割は地域ごとに異なる。つまり ISO のビジネスモデルも全米で共通のものではなく、自由化の度合いも地域によって異なる。

MISO の事業対象地域には、四千万人以上の一般電力消費者がおり、管轄下にある高圧伝送網は 6 万マイル以上、地域内の発電所は 1,000 を超える。総発電能力は約 1,500 万 KW で、東京電力の正常時能力の約 1/4 程度である。MISO の任務は、発電業者の管理する発電所の運用と送電、配電・小売業者への電力卸し

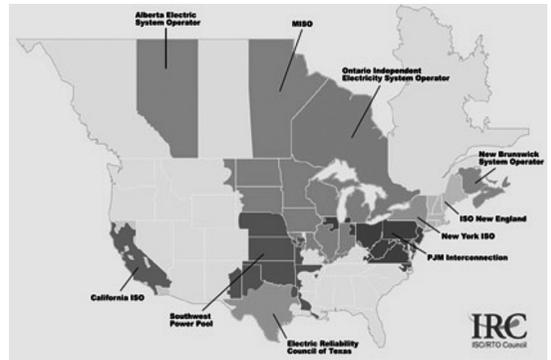


図 1 米国独立システムオペレーター (ISO) と地域送電オペレーター (RTO)

を行うことにある。つまり、実際の発電所や送電施設は、個々の電力会社の資産でありその管理化にあるが、一旦電力会社が MISO 事業に参加すると、日々の発電と送電はすべて MISO の意思決定に従って行われることになる。要は、電力会社は物理的な発電施設の管理・運営は行っても、日々の運用、つまり何時にどれだけの発電を行うか、どのような値段体系で電力の売り買いを行うか等は、すべて NPO である MISO のコントロール下に置かれるわけである。一旦 MISO から卸された電力の配電・小売については、米国中西部それぞれの地域での電力会社が担当している。

自由化された電力卸市場での RTO の役目は大きくって 2 つある。1 つ目は、電力の需要と供給のバランスを図るために、発電業者からの発電供給量と小売り業者からの需要量のマッチングを行うこと。2 つ目は、リアルタイムでの発電・送電業務を監視してスムーズに電力網を運用することである。このような使命を帯びて、MISO では発電業者の売電と需要家からの買電要求を結びつけるブローカー的な役割を果たしていると言える。

では、具体的な MISO のオペレーションを紹介する。まず MISO では、翌日の発電可能量と予想需要量を、

いくら よしろう

(株) サイテック・ジャパン

〒113-0033 東京都文京区本郷 2-19-9 田原ビル 2F

それぞれ発電業者と小売業者から入札として受けとる。次に、種々の規制項目（予備発電能力、緊急対応策）を考慮して入札のマッチングを行い、翌日の発電・送電スケジュールを作成し、売電・買電業者に知らせる。更に前日に作成した発電・送電計画に従って、当日発電施設への発電指示と送電制御を行う。これは刻々と変わる電力需要に合わせた発電供給を行うことによって、電力の周波数（60 サイクル）に乱れが生じるのを防ぐことである。

自由化された市場で売電と買電のマッチングを決める場合に重要なのは、電力価格の決め方である。これには局所的限界価格（以下 LMP, locational marginal price）という概念が使われている。この LMP とは簡単に言えば、ある場所である時刻に 1 MW の追加電力需要がある場合に必要の追加発電・送電費用（実際には限界発電費用を販売価格に転換する必要がある）ということである。さて、そのような費用をどうやってリアルタイムに計算するか不思議に思われるかもしれないが、線形計画法をご存じの読者には、それがシャドウ・プライス（双対変数値）に対応すると言えばお察しいただけるであろう。

1990 年代のカリフォルニアでの失敗例があるように、電力の自由化というのは簡単ではない。いまだに米国でもほとんど自由化が進んでいない地域もある。米国中西部でも紆余曲折があったが、1990 年代後半から 2000 年代前半にかけて当時 27 もあった卸業者の統合を含めた RTO として MISO の設立に漕ぎつけた。ただし MISO が実際に機能し始めたのは 2005 年になってからで、まずはエネルギー市場での取引業務を開始した。その後 2009 年からは、余剰電力の売買取引業務も追加している。

このような MISO の成功には、OR が深くかかわっている。昨年 Edelman 賞の対象となったのも、このような卸し電力売買という業務に数理計画モデルを導入して多大の成功を取めた、ということが認められたからである。

では、どのような数理モデルが使われているかを簡単に見てみよう。発電・送電の最適化には、一言で言えば巨大な電送ネットワーク上で定義されるネットワークフロー問題を解くことに他ならない（図 2 参照）。ネットワーク上のノードは、発電所や送電施設、又は需要地に対応する。またリンクは、送電網の個々のリンクを示す。リンク上のフローは単位時間毎の電力（つまり電力エネルギー）となり、目的関数は総発電コストである。特に発電コストと送電ロス是非線形関数にな

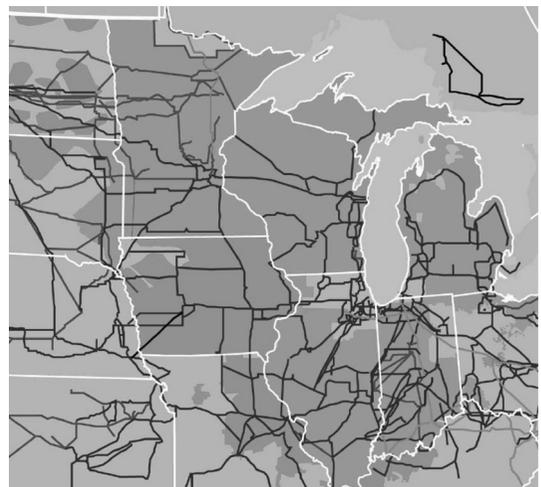


図 2 MISO 管轄内の伝送網ネットワーク

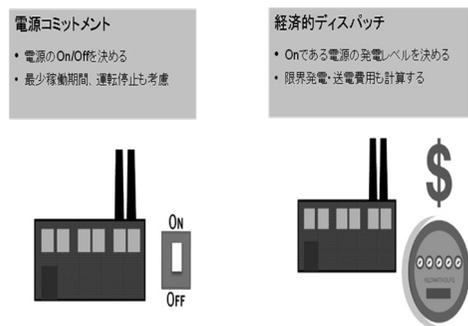


図 3 コミット問題とディスパッチ問題

るので、全体では非線形整数計画問題となる。

このようなネットワークフロー問題は、さらに 2 つの大きな数理モデル、電源コミット問題（unit commitment）と経済的起動停止問題（economic dispatch）とに分けられる（図 3 参照）。両モデルともコンピュータの発明と同時に 1960 年代から知られているモデルである。ただし電力会社の最適化と MISO のような地域全体の問題では規模が格段に違ってくる。ちなみに筆者が 1980 年代に勤めていたカリフォルニア州の電力会社 PG&E でも、発電施設が数十個レベルでこれらの問題は解かれていた。MISO では 1,000 を超える発電所を同時に最適化する必要がある、その解を求めるのは並大抵のことではない。

まず電源コミット問題であるが、翌日から 1 週間分の時間毎需要予測をもとに、どの発電施設をどの時間帯に On/Off とし、On の場合の発電レベルも決める。この際、原発のように一度 On とすれば少なくとも数か月間は稼働させるものや、水力発電やガスタービン

のように数分で起動開始・終了できるものもあるので、それぞれの資源の現稼働状況を考慮する必要がある。また、一旦 On にしたユニットは暫く稼働させ続ける必要もあるので、最小稼働時間等の制約もある。さらに送電線の能力や発電コストを加えると、電源コミット問題は巨大な混合整数計画問題 (MIP) となる。

MISO では、電力会社からの電力供給情報と電力小売業者からの需要予測量に基づいて、翌日の電源コミット問題を毎日数回解いている。典型的な問題のサイズとしては、1,000 個程度の発電所、100 本程度の送電線、5 日間の稼働期間で、連続変数が 3 百万個、0-1 変数が 45 万個、制約式が 4 百万本程度の MIP となる。当然ながら、このような大規模問題をそのまま汎用ソルバーにかけても解はすぐには求まらない。MISO でも効率のよい前処理や制約カットの生成など種々の工夫を重ねて、計算時間の大幅削減に成功しているという (文献 [3] 参照)。

次の経済的起動停止問題は、当日の最適電源 dispatch をリアルタイムに最適化することである。つまり前日に決められた電源コミット解を基に、既に On となっている各電源ユニットでの具体的な発電レベル、各発電施設の On/Off のタイミング、さらに送電線での送電量などをリアルタイムに計算することである。このような経済的起動停止問題を、MISO では電源コミット問題での 0-1 変数が fix された線形計画問題として解いている。具体的には 5 分毎に約 1 分程度の LP 再計算を行っているが、この答えを基にすべての稼働電源に対しての発電レベルを指示しコントロールする仕組みが 2 カ所で稼働しているという。

この経済的起動停止問題を LP として解くことにより、先程の LMP が双対変数値を使って自動的に求められる。つまり、制約式の 1 つに各ノードでの電力需要供給バランス式があるが、その式に対する双対変数の値を見れば、その拠点の各時間帯での限界発電送電費用が分かる。それを基に費用を価格に変えれば、LMP を計算することができる。このやり方であれば、ネットワーク全体での最適な発電・送電方式を前提とした公平な値段の設定が可能になり、参加者も納得がいく

ものと考えられる。

さて、このように数理計画モデルを駆使したネットワークの運営をしている MISO での投資効果はどれほどのものであろうか。既にこれまでの話で、このような数理モデルがなければ、そもそも自由化された卸電力ネットワークの最適運用も難しいと考えられる。とすれば、電源コミット問題や経済的起動停止問題を解くシステムの投資効果そのものも、実はその団体の存在価値そのものとも考えられる。

MISO および参加企業による投資効果の推定分析も行われた。結果として、2007 年から 2010 年にかけての総電力コスト削減効果は、21 億ドルから 30 億ドルに達するとされた。さらに今後 2020 年までの推定投資効果として、61 億ドルから 81 億ドル程度と計算されている。

現在、北欧 [4] や南米では、多国籍間での電力の売買が盛んに行われている。その際の電力価格も、翌日入札によって、LMP を使った限界発電コストによる決済方法が標準化しつつある。今後国際間のグローバル・スタンダードとなるのではないだろうか。さらに革新的送電技術の開発も報告されているので、国際間の電力売買は今後ますます発展していくものと考えられる。一方で昨年の原発事故以来、日本の電力業界の後進性がやたらと目につく。将来のエネルギー確保に多大の不安を感じる我が国であるが、このような事例を参考にして、この分野での研究と実績が増えるのを切に期待したい。

参考文献

- [1] YouTube, "INFORMS Franz Edelman Award Ceremony" 2011 (1 through 8, 8 for MISO).
- [2] <http://www.informs.org/Find-Research-Publications/Multimedia-Books/Edelman-and-Wagner-Videos>.
- [3] B. Carlson, et al., "MISO Unlock Billions in Savings Through the Application of Operations Research for Energy and Ancillary Services Markets," *Interfaces*, **42**, 58-73, January-February 2012.
- [4] Nord Pool Spot, <http://www.nordpoolspot.com>.