

多时段可中断负荷合同的市场价值评估

王建学¹, 王锡凡¹, 张显², 张钦¹

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 国家电网公司 电力交易中心, 北京 100031)

摘要: 在已有的单时段可中断负荷价值研究的基础上, 进一步考虑了中断持续多个时段和销售侧电价由政府制定的情况, 提出适用于多时段的可中断负荷价值评估方法。并基于计及负荷率影响的电价预测模型, 采用蒙特卡罗方法对其进行评估。新英格兰电力市场的仿真计算表明了所提方法的合理性和可行性, 结果显示, 缩短持续时间、提高中断次数和降低中断门槛都可以提高可中断负荷市场价值, 但同时增加了操作实施的难度。为了有效利用可中断负荷资源, 应该根据市场运行经验对这些关键参数进行合理设置。

关键词: 电力市场; 需求侧管理; 可中断负荷; 市场价值; 电价预测

中图分类号: TM 715; TM 73

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)12-0010-04

0 引言

实施可中断负荷可以显著增加需求侧弹性, 从而有利于改善调峰形势^[1-2], 缓解系统阻塞^[3-5], 提高供电可靠性。可中断负荷管理不仅在电力供不应求形势下具有重要的调节作用, 而且在我国当前电力供需形势缓和、峰谷差不断加大的情况下, 也是一种重要的需求侧管理手段。

可中断负荷通常是通过供电商和大用户签订合同来实现, 这就需要对可中断负荷的市场价值进行评估。从经济学角度看, 在电力市场中, 可中断负荷经济价值体相当于供电商提前买入了一个看涨期权, 并规定了其执行的门槛价格。当市场价格高于该门槛价格时, 可以选择中断负荷而不用继续供电^[6-7]。这直接减少了购电费用, 并大幅度降低了市场风险, 尤其对于那种发电侧展开竞争而用户侧电价受到管制的单边电力市场(如改革初期的美国加州市场和我国电力市场)作用更为明显^[8-10]。在此将对电力市场环境可中断负荷的市场价值进行讨论, 分析评估其市场价值的难点, 给出评估方法, 并通过实际系统的仿真来说明评估方法的正确性和可行性。

1 可中断负荷市场价值评估

在仅考虑可中断负荷合同对实时市场购电费用减少的贡献时, 中断持续时间为 1 h 的单时段可中断负荷每次中断的价值 B_{IL} 可用电价的减少值与中断容量的乘积估计:

$$B_{IL} = C_{IL} \cdot \max[(P_M - P_E), 0] \quad (1)$$

式中 C_{IL} 是合同规定的负荷可以中断的容量; P_M 是实时电价序列; P_E 是可中断合同的执行价格。

式(1)中主要变量实时电价 P_M 可以通过电价预测得到, 如时间序列法、神经网络法等。单时段的可中断负荷价值评估已经在文献[11]中介绍过, 这里不再赘述。

考虑多个时段的可中断负荷价值, 就需要考虑停电持续时间的影响。由于出现尖峰价格的时间往往集中在较短时段内, 在这些时段中断负荷对供电商是非常有利的。但是从文献[12]研究中可知, 合同通常要求如果中断负荷持续一段时间, 如 4 h, 这样可能造成在持续时间里的价格尖峰时段中断供电, 会为供电商节省高额的购买费用, 但在非尖峰价格时段中断供电, 供电商反而可能会丧失一些在市场中盈利的机会。此时式(1)变为

$$B_{IL} = C_{IL} \cdot \max \left[\sum_{k=1}^t (P_M^k - P_E), 0 \right] \quad (2)$$

式中 t 为每次停电的持续时间, 如 4 h 或 8 h; P_M^k 为在停电持续时间内第 k h 对应的实时电价。

在电力市场化改革中, 大多数市场采用先开放发电市场, 逐渐开放零售市场的方法。在开放发电侧的单边电力市场中, 其零售侧电价是由政府部门制定, 不随市场发生实时变化。电力供应商要从电价剧烈波动的发电市场购买容量, 然后按照政府制定的零售价卖给用户, 此时市场中存在着较大风险, 而可中断负荷是减少该风险的有力工具。在单边电力市场中, 设零售价为 P_S , 则多时段可中断负荷价值可用式(3)进行估计:

$$B_{IL} = C_{IL} \cdot \max \left[\sum_{k=1}^t (P_M^k - P_S), 0 \right], \quad \forall P_M^k > P_E \quad (3)$$

2 电价预测

从以上分析可以看出,可中断负荷期权的定价和预测的实时电价密切相关。如果电价波动剧烈,即市场风险很大,规避这些风险的期权价值就相当大,从而期权的价格相应较高;如果很少出现价格尖峰,市场风险小,期权的价格就较低。

研究发现,系统负荷率(实际负荷与系统可用容量之比)与电价有密切关系,当负荷率高于某个值时出现价格飞升的可能性大增,因此复合模型中的跳跃模型将是负荷率的函数^[13-14]。这里的均值回复模型采用 1 阶自回归模型,跳跃模型则假设为正态分布,并以负荷率函数的正切值作为其加权系数。电价模型如下:

$$\rho_t = \bar{\rho}_t + \phi_1 \rho_{t-1} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \tan\{\max[0, \alpha_1(L_t - b_1)]\} N(\mu, \sigma^2) \quad (4)$$

式中 ρ_t 为电价序列,以 1 阶自回归模型描述;等号右侧第 1 项 $\bar{\rho}_t$ 是电价平均值,第 2 项是前一个电价数据的影响,第 3 项是随机波动,第 4 项反映了电价随负荷率的突变量; ε_{t-1} 是均值为 0、方差为 1 的白噪声; ϕ_1 为电价序列的回归系数; θ_1 为电价序列的方差; L_t 为负荷率; α_1 为负荷变化参数; b_1 为设定的负荷率门槛值; $N(\mu, \sigma^2)$ 是均值为 μ 、方差为 σ^2 的正态分布。

与文献[11]中电价模型不同的是,此处负荷率 L_t 也是一个随机变量,需要用时间序列法模拟,这可以有效地改进模拟精度。

电价模型的准确性取决于模型的选择以及模型参数的估计。模型参数估计需要较长时间的电价数据,但现有的电力市场运营时间都较短,且市场结构和市场规则处于不断的变革中,因此模型的准确性受到一定的影响。

3 蒙特卡罗方法

可中断电力合同的合理定价涉及到复合电力期权的估价,但该期权的复杂性为其定价带来了很大困难。因为普通期权均有确定的执行次数,如欧式期权要求在到期日选择执行一次,现有的期权定价的解析公式也是针对这类简单期权以及这些简单期权组合的复合期权^[15-16]。由于电价有复杂的动态特性,而且受很多随机因素的影响,如负荷和可用发电容量等,可中断电力期权的执行日期和执行次数不定,对于这种复杂的新型期权,很难推导出精确的解析定价公式。因此,采用蒙特卡罗法模拟为电力期权定价,这也是复杂期权定价中最重要的数值近似法。

采用蒙特卡罗法对可中断负荷期权的估价公式为

$$B_{IL} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_{IL}(i) \quad (5)$$

式中 N 为模拟次数。

在给定中断价后,采用蒙特卡罗法估算电力市

场中可中断负荷价值的计算步骤如下:

- 采用时间序列法预测电价;
- 按照式(2)或式(3)评估可中断合同有效期内其价值;
- 重复步骤 a、b N 次;
- 最后按式(5)计算期权估价的平均值即为该期权的近似价值。

通常用方差系数 β 表示蒙特卡罗法估价的误差:

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V[B_{IL}(i)]} / B_{IL} \quad (6)$$

式中 V 为方差。

可以看出,方差随着采样次数的增加而减小,当 $N \rightarrow \infty$ 时, $\beta \rightarrow 0$ 。

4 算例分析

月合同是国外电力市场可中断电力合同常见的合同形式。这里研究美国新英格兰电力市场 2002 年 8 月时可中断期权的估价。假设系统负荷率为随机变量,价格上限为 1 000 \$/MW。模拟电价(虚线)和实际电价(实线)比较如图 1 所示,图中 C 为电价。

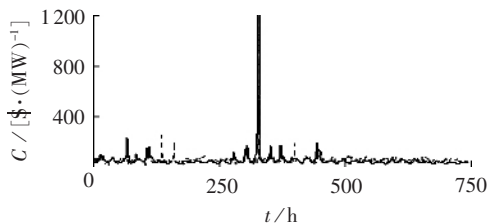


图 1 模拟电价和实际电价比较

Fig.1 Comparison between simulated and actual prices

设定基本情况为一个月中断 4 次,每次中断时间为 4 h,也就是每周停电半天的停电方式。可中断期权执行价格为 250 \$/MW(后同),模拟计算次数定为 2 000 次,则可得到平均中断次数 n 、多时段可中断负荷价值 B_{IL} 、偏差 e 的计算结果如下:

$$n = 3.5823$$

$$B_{IL} = 2328.9 \text{ $/MW}$$

$$e = 869.209 \text{ $/MW}$$

可以看出,给予中断负荷 4 次的机会,而模拟结果中平均中断次数不足 4 次,说明给定的执行价格门槛和中断次数基本能起到充分利用可中断负荷的目的。多时段可中断负荷价值的估计值 2 328.9 \$/MW 与实际值 2 435.35 \$/MW 相差不大,误差为 4.37%,这在波动性较大的电价模拟中,是一个不错的结果。

4.1 计算次数

图 2 给出计算次数 m 对计算结果的影响,以便分析算法的收敛性。

从图 2 中可以看出,可中断负荷价值随计算次数波动不大,很快就能收敛到最后结果附近。为了计算方便,计算中取计算次数 2 000 次。

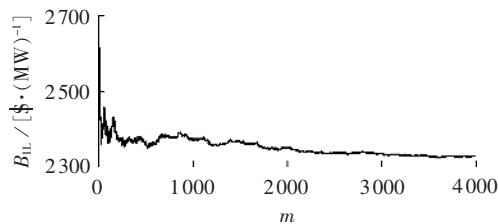


图 2 计算收敛性

Fig.2 Convergence of calculation

4.2 持续时间

为考察持续时间变化的影响,计算了一周停电一天的停电方式下的可中断负荷价值,也就是每月停电 4 次,每次持续停电 8 h。计算结果如下:

$$n = 3.4675$$

$$B_{IL} = 1943.10 \text{ \$/MW}$$

$$e = 832.05 \text{ \$/MW}$$

结果显示,中断时间多了,其可中断负荷的价值反而会下降。这是由于尖峰价格通常持续较短时间,在这些时段中断负荷对电力供应商最有利;而在包含多个时段的持续时间段内通常还有非尖峰价格时段,在这些时段中止供电,会丧失在这些时段获利的机会。长时间中断供电,不仅对用户造成的损失较大,而且对电力供应商而言其价值也有所削弱,所以选择合适的停电持续时间相当重要。

4.3 中断次数

设一周停电 2 次时计算可中断负荷价值,以便考察中断次数变化的影响。具体的停电方式是每月停电 8 次,每次持续停电 4 h。计算结果如下:

$$n = 4.858$$

$$B_{IL} = 2689.6 \text{ \$/MW}$$

$$e = 1175.30 \text{ \$/MW}$$

结果显示,中断次数多了,其可中断负荷价值会有所上升。在本市场中,虽然可以中断 8 次,但计算结果显示,平均的中断次数不到 5 次,也就是说 8 次效果不显著,造成了部分资源的浪费。为方便进一步分析,表 1 计算每月允许中断 4~8 次的结果。

表 1 中断次数对可中断负荷价值的影响

Tab.1 Influence of interruption amount on interruptible load value

允许中断次数	模拟中断次数	$B_{IL}/[\text{\$} \cdot (\text{MW})^{-1}]$
4	3.582 3	2 328.9
5	4.153 3	2 531.3
6	4.496 7	2 615.9
7	4.786 7	2 651.1
8	4.858 0	2 689.6

从表 1 中可以看出,允许中断次数的增多可以增加中断负荷的机会,从而使可中断负荷价值也逐渐增大。但是,当允许次数增大到一定程度后,其作用已经不太明显。针对本算例中的可中断负荷,以每月最多中断 6 次为佳。

4.4 中断门槛价格

图 3 研究了中断门槛价格 C_{th} 对可中断负荷价

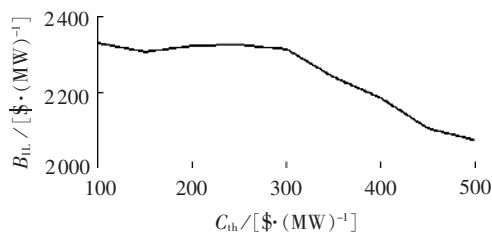


图 3 中断门槛价格对可中断负荷价值影响

Fig.3 Influence of price threshold on interruptible load value

值的影响,这里设置中断门槛从 100 \\$/MW 变化到 500 \\$/MW。

从图 3 中可以看出,中断门槛对可中断负荷价值影响较大。尤其是中断门槛设置较高时,可中断负荷防范市场风险的价值有较大幅度下降。为了合理利用可中断负荷这个资源,应该根据市场运行经验选择合适的门槛。

5 结论

对于多时段可中断负荷的市场价值,文中采用蒙特卡罗方法进行评估,可以得到 3 个结论。

a. 在持续时间里的价格尖峰时段中断供电,会为供电商节省高额的购买费用;但通常持续时间段内还有非尖峰价格时段,在这些时段中止供电,会丧失在这些时段盈利的机会。在本文例子中,每次中断的持续时间以 4 h 为宜。

b. 允许中断次数的增多可以增加中断负荷的机会,从而使可中断负荷价值也逐渐增大。但是,当允许次数增大到一定程度后,其作用已经不太明显。

c. 中断门槛设置较高时,可中断负荷防范市场风险的价值有较大幅度下降,为了合理利用可中断负荷这个资源,应该根据市场运行的经验选择合适的门槛。

参考文献:

- [1] 任震,邝新武,黄雯莹. 电力市场中可中断电价的设计[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2006,34(4):70-74.
REN Zhen, KUANG Xin - wu, HUANG Wen - ying. Design of interruptible price in electricity market[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2006, 34(4):70-74.
- [2] 吴集光,刘俊勇,牛怀平,等. 调峰电价与可中断负荷联动机制研究[J]. 中国电力,2005,38(2):59-63.
WU Ji - guang, LIU Jun - yong, NIU Huai - ping, et al. Study of linking mechanism between peak load price and interruptible load[J]. Electric Power, 2005, 38(2):59-63.
- [3] 杨炳元,吴集光,刘俊勇,等. 计及可中断负荷影响的阻塞管理定价模型研究[J]. 电网技术,2005,29(9):41-45.
YANG Bing - yuan, WU Ji - guang, LIU Jun - yong, et al. Research on pricing model of congestion management considering influence of partitioned interruptible load[J]. Power System Technology, 2005, 29(9):41-45.
- [4] 刘昌,姚建刚,李继传,等. 基于可中断负荷的新型输电阻塞调度研究[J]. 中国电力,2005,38(9):51-55.

- LIU Chang, YAO Jian - gang, LI Ji - chuan, et al. Research of new congestion dispatching based on interruptible load [J]. Electric Power, 2005, 38(9): 51 - 55.
- [5] 李海英, 李渝曾, 张少华. 可中断负荷参与输电阻塞管理的模型与算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 17 - 21.
- LI Hai - ying, LI Yu - zeng, ZHANG Shao - hua. Model and algorithm of transmission congestion management based on interruptible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 17 - 21.
- [6] GEDRA T W, VARAIYA P P. Markets and pricing for interruptible electric power[J]. IEEE Trans on Power System, 1993, 8(1): 122 - 128.
- [7] GEDRA T W. Optional forward contracts for electric power markets[J]. IEEE Trans on Power System, 1994, 9(4): 1766 - 1773.
- [8] 王建国, 王锡凡, 张显, 等. 电力市场和过渡期电力系统可中断负荷管理(一)——可中断负荷成本效益分析[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5): 15 - 19.
- WANG Jian - xue, WANG Xi - fan, ZHANG Xian, et al. Interruptible load management in power market and interim system. Part 1: cost - benefit analysis of interruptible load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5): 15 - 19.
- [9] 王建国, 王锡凡, 张显, 等. 电力市场和过渡期电力系统可中断负荷管理(二)——可中断负荷运营[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(6): 1 - 5.
- WANG Jian - xue, WANG Xi - fan, ZHANG Xian, et al. Interruptible load management in power market and interim system. Part 2: operation of interruptible load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(6): 1 - 5.
- [10] 任震, 邝新武, 黄雯莹. 可中断负荷措施的成本效益分析[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 22 - 25.
- REN Zhen, KUANG Xin - wu, HUANG Wen - ying. Cost - benefit analysis for actualizing interruptible load measure[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 22 - 25.
- [11] 张显, 王锡凡, 王建国, 等. 可中断电力合同中新型期权的定价[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 18 - 23.
- ZHANG Xian, WANG Xi - fan, WANG Jian - xue, et al. Pricing for exotic option of interruptible electricity contracts [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 18 - 23.
- [12] 王建国, 王锡凡, 王秀丽. 电力市场中中断负荷合同模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 11 - 16.
- WANG Jian - xue, WANG Xi - fan, WANG Xiu - li. Study on model of interruptible load contract in power market [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 11 - 16.
- [13] DAVISON M, ANDERSON C L, MARCUS B, et al. Development of a hybrid model for electrical power spot prices[J]. IEEE Trans on Power System, 2002, 17(2): 257 - 264.
- [14] ZHANG Xian, WANG Xi - fan, SONG Yong - hua. Modeling and pricing of block flexible electricity contracts [J]. IEEE Trans on Power System, 2003, 18(4): 1382 - 1388.
- [15] HULL J C. 期权、期货和其他衍生产品[M]. 张陶伟, 译. 北京: 华夏出版社, 2000.
- [16] OREN S S. Integrating real and financial options in demand - side electricity contracts [J]. Decision Support Systems, 2001, 30(3): 279 - 288.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

王建国(1976-), 男, 重庆人, 讲师, 博士, 从事电力市场、可靠性及电力系统分析方面的教学、研究工作(E-mail: JXWang@mail.xjtu.edu.cn);

王锡凡(1936-), 男, 河北安平人, 教授, 博士研究生导师, 从事电力系统分析、规划及电力市场的教学、研究工作;

张显(1977-), 男, 重庆人, 博士, 从事电力市场方面的研究和管理工作的;

张钦(1982-), 男, 湖南郴州人, 博士研究生, 从事电力市场和可靠性方面的研究工作。

Market value evaluation of multi-period interruptible load contracts

WANG Jian-xue¹, WANG Xi-fan¹, ZHANG Xian², ZHANG Qin¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Power Exchange, State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: Based on the research of single-period interruptible load and with the consideration of government-fixed sale prices, the value evaluation formulation of multi-period interruptible load is presented. With the load ratio based price forecast model, Monte Carlo simulation is adopted to evaluate the market value of multi-period interruptible load. Simulation of New England market proves its feasibility and rationality. Results show that, reduction of interruption duration, increment of interruption amount and derating of price threshold can enhance the value of interruptible load, but complicate the practical operation of interruptible load. In order to effectively utilize the resources of interruptible load, the key parameters should be carefully set according to the experience of market operation.

This project is supported by the Special Fund of the National Basic Research Program of China (2004CB217905).

Key words: power market; demand side management; interruptible load; market value; electricity price forecast