

基于蒙特卡洛模拟的电力市场风险评估研究

张新松, 王胜锋, 郭晓丽

(南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226007)

摘要: 电力市场中, 市场参与者以自身利益最大化为行动导向。由于市场的不完善, 市场参与者的逐利行为有可能会产生市场风险。为了规避市场风险, 对其进行评估是十分必要的。基于风险经济学中的风险评估理论, 以电价为切入点, 将市场参与者的报价看成随机变量, 利用蒙特卡洛法建立了一套市场风险评估模型。该模型不需要借助市场运行的历史数据, 就可以快速、有效地评估出市场风险, 为市场机制设计人员提供有益的参考。

关键词: 电力市场; 蒙特卡洛; 风险评估

Research on evaluating risk of power market based on Monte Carlo simulation

ZHANG Xin-song, WANG Sheng-feng, GUO Xiao-li

(Nantong University Electric Engineering College, Nantong 226007, China)

Abstract: In the electricity market, the participants make their best effort to get more profit. What they do may produce market risk. In order to avoid this risk, evaluation on market risk is very important. In this paper, the bidding strategy of participants is looked as a variable, so the price is also a variable. Based on the theory of risk economics, this paper uses Monte Carlo simulation to establish a model that can be used to evaluate market risk without any running data of market. This model can be used as an assistant tool in designing power market mechanism to design more excellent market mechanism.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Jiangsu Province(No.BK2005405) and Natural Science Foundation of Nantong University(No.03040313).

Key words: power market; Monte Carlo; evaluate

中图分类号: TM73; F123.9

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)18-0030-04

0 引言

随着上世纪90年代开始的英格兰电力市场改革获得成功^[1], 世界范围内的电力工业正经历着市场化的改革, 我国也在积极推进电力市场的改革进程^[2]。目前, 我国发电侧市场已经初步建立, 发电商成为独立的经济实体, 竞价上网。在市场中, 参与市场的主体以自身利益最大化为行动导向^[3]。由于市场本身的特征, 这一发电侧市场是一个不稳定的市场^[4], 参与者在获得最大化的利润的同时有可能会产生市场风险^[5]。这也是造成加州电力市场崩溃的原因之一。事实上, 电价作为电力市场的核心问题之一^[6], 其不合理的价格水平和剧烈的波动往往是导致电力市场风险的主要原因。为规避市场风险, 在市场设计阶段就必须对市场风险进行一定的评估, 以判断市场机制的优劣, 进而对其进行修正以确保其投入运行后能够起到保证市场健康运行, 规避市场风险的作用。

对电力市场中的风险如何评估一直是学者们关注的问题。文献[7, 8]将VAR(Value at Risk)的方法应用于电力市场风险评估, 并得到了电力市场风险评估的初步结果。文献[9, 10]将系统剩余容量与电价的关系引入到电力市场的风险评估中, 对电力市场的短期风险和中长期风险进行评估, 取得了较好的结果。文献[11]研究了蒙特卡洛法在电力市场短期金融风险评估中的应用, 并提出了具体的风险评估模型。上述各文献提出的风险评估模型都没有考虑市场参与者的报价行为和最终电价的关系, 且需要较多的历史数据, 因此不适用于在市场设计阶段对市场风险进行评估。本文从研究电力市场中市场参与者的报价行为和最终电价的关系入手, 将市场参与者的报价看作是随机变量, 利用蒙特卡洛法建立了一套市场风险评估模型。并利用该模型对某市场进行了风险评估, 计算表明该模型能够有效地评估出市场机制的优劣, 从而为市场设计人员提供有益的参考。

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK2005405); 南通大学自然科学基金项目(03040313)

1 电力市场模型^[5]

假定某区域电力市场的发电侧一共有 n 台机组竞价上网。在市场中, 交易中心以机组为出清单位, 按统一的出清电价进行结算。市场某一投标时段的负荷需求为 P_L 。以机组 i 为研究对象, 其成本函数为二次函数:

$$c_i = d_i + a_i P_i + 0.5 b_i P_i^2 \quad i=1, \dots, n \quad (1)$$

出力约束:

$$P_{i\min} \leq P_i \leq P_{i\max} \quad (2)$$

各机组向交易中心提交的报价曲线为:

$$c_i = k_i (d_i + a_i P_i + 0.5 b_i P_i^2) \quad (3)$$

式(3)中的 k_i 称为机组 i 的报价策略系数。交易中心在收到各机组的报价后, 进行出清计算。本文暂时只考虑系统负荷平衡, 忽略机组的启停约束和电网的安全约束。交易中心代表所有电力用户向发电商购买电能, 其目标是使电能采购费用 f 最小:

$$\min f = \sum_{i=1}^n c_i(P_i) \quad (4)$$

$$\text{st.} \quad \sum_{i=1}^n P_i = P_L$$

显然, 这是一个求条件极值的问题, 利用拉格朗日法可以求得此时市场的出清电价 ρ 和机组的出力 P_i 分别为:

$$P_i = \frac{P_L'}{1 + k_i b_i B} - a_i / b_i \quad (5)$$

$$\rho = \frac{P_L'}{(1/k_i b_i) + B} \quad (6)$$

$$\text{其中: } P_L' = P_L + \sum_{i=1}^n a_i / b_i \quad B = \sum_{j \neq i} 1/k_j b_j$$

按照交易规则, 交易中心以机组为出清单位, 按统一的出清电价进行结算, 则各机组的收益函数为:

$$\pi_i = P_i \rho - (d_i + a_i P_i + 0.5 b_i P_i^2) \quad (7)$$

2 市场风险评估

很显然, 上节所介绍的市场是寡头垄断市场, 市场中的供给者有限。分析此类市场的传统方法是借助基于博弈论的寡头模型^[12]进行分析。这类方法将各发电商在 market 中的竞价行为看作是静态的博弈过程, 习惯上将此方法求得的市场均衡称为静态均衡。该静态均衡是基于博弈论求取的, 博弈论要求市场参与者具有“完美的理性”。实际上具有“完美理性”的市场参与者是不存在的^[13], 因此市场往往

不能达到理想的均衡状态, 电价具有不确定性。本文将市场中的电价看作是一个随机变量; 给出了市场风险评估模型。

2.1 市场静态均衡分析模型

市场中, 为了实现机组利润最大化, 发电商必须调整其报价策略系数 k_i , 使其满足:

$$\partial \pi_i / \partial k_i = 0 \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)得:

$$\partial \pi_i / \partial k_i = P_i \frac{\partial \rho}{\partial k_i} + (\rho - a_i - b_i P_i) \frac{\partial P_i}{\partial k_i} = 0 \quad (9)$$

对其化简可得机组的报价策略系数 k_i :

$$k_i = \frac{(P_L' - a_i / b_i) / B + b_i P_L'}{b_i (P_L' + a_i / b_i)} \quad (10)$$

从式(2)可以看出, 机组都有自己的出力范围, 当机组的出力越限后, 发电商必须调整机组的报价策略系数 k_i 使机组的出力成为可能, 调整方法如下^[14]:

当机组出力低于最小出力极限时, 应减小 k_i 使机组出力增大到最小出力, 则策略报价系数为:

$$k_i = \frac{P_L' / (P_{i\min} + a_i / b_i) - 1}{b_i B} \quad (11)$$

当机组出力高于最大出力极限时, 应增大 k_i 使机组出力减小到最大出力处, 则策略报价系数为:

$$k_i = \frac{P_L' / (P_{i\max} + a_i / b_i) - 1}{b_i B} \quad (12)$$

至此可得机组 i 的策略报价空间 $F(i)$ 为:

$$\left\{ \begin{array}{ll} k_i = \frac{(P_L' - a_i / b_i) / B + b_i P_L'}{b_i (P_L' + a_i / b_i)} & P_{i\min} \leq P_i \leq P_{i\max} \\ k_i = \frac{P_L' / (P_{i\max} + a_i / b_i) - 1}{b_i B} & P_i > P_{i\max} \\ k_i = \frac{P_L' / (P_{i\min} + a_i / b_i) - 1}{b_i B} & P_i < P_{i\min} \end{array} \right. \quad (13)$$

从式(13)可以看出, 机组的策略报价系数和其它机组的策略报价系数相关, 假设竞争对手都理性地采用此策略报价模型, 各机组的报价策略相互关联, 最后将得到一个彼此都认可的均衡解, 此即博弈论中的纳什均衡点, 其实质是市场中 n 台机组

的策略报价空间 $F(i)(i=1, \dots, n)$ 构成的 n 元非线性方程组的收敛解。

2.2 市场风险评估模型

上文已求出了市场的静态均衡点，依据博弈论的观点，在此点各发电商都能获得最大的利润，谁都不愿意改变自己的报价策略系数，市场稳定在此点。但是，实际上任何发电商都不可能具备博弈论所要求的“完美理性”，因此发电商不可能按照静态均衡点报价。市场中的竞价行为是一个重复博弈的过程，在一次次的博弈过程中，各发电商理性层次越来越高，也越来越熟悉对手，其报价策略系数会以较大的概率落在以静态均衡点为中心的小区间内。因此，本文认为发电商的报价策略系数 k_i 是一个服从正态分布 $N(k_i^*, \gamma_i)$ 的随机变量。这里 k_i^* 是上面求出的市场静态均衡点。为了求出此正态分布中的方差 γ_i ，模型假设发电商的报价策略系数 k_i 以几率 q 落在区间 $((1-\delta)k_i^*, (1+\delta)k_i^*)$ 中。这里 q, δ 都是介于 0 和 1 之间的常数。 q 值越大 δ 越小，某种意义上说明发电商的理性层次越高，其报价系数逼近静态均衡点的概率越高。依据概率论可得：

$$\phi\left(\frac{\delta k_i^*}{\gamma_i}\right) = (1+q)/2 \quad (14)$$

这里函数 $\phi(x)$ 是标准正态分布 $N(0,1)$ 的分布函数，依据式 (14) 可以求得正态分布中的方差 γ_i 。

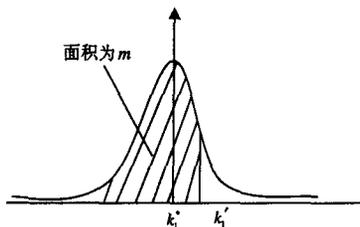


图 1 发电商 1 的报价策略系数分布曲线
Fig.1 Distribution function of generator's bidding strategy index

蒙特卡洛法常常被用来模拟随机因素，是风险评估的有力工具。本模型利用蒙特卡洛法模拟市场的运营情况，具体的步骤如下：

1) 随机产生 n 个介于 0 和 1 之间的随机数(市场中有 n 台机组)。假设第一个随机数为 m ，在图 1 中找到一点 k_i' ，使图中阴影部分的面积为 m ， k_i' 就是发电商 1 的报价策略系数。其它发电商的报价策略系数也可以由此产生。

2) 上一步产生的 n 个报价策略系数作为市场

中 n 台机组向交易中心提交的报价，依据式 (6) 可以求得市场中的出清电价 ρ_i' 。

3) 将前两步重复若干次，一般来讲重复的次数越多模拟结果越精确。

4) 第 1 步和第 2 步模拟得到的电价是一个随机变量，依据式 (15) 和式 (16) 可以求出该随机变量的方差和期望。其中 ρ_i' 是每次模拟得到的市场出清电价， η 是模拟次数。

$$\bar{\rho} = \frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^{\eta} \rho_i \quad (15)$$

$$F = \sqrt{\frac{1}{\eta} (\rho_i' - \bar{\rho})^2} \quad (16)$$

依据风险经济学的知识，式 (15) 求得的价格 $\bar{\rho}$ 和式 (16) 求得的价格方差 F 可以用做评测市场风险的依据。该模型用价格方差 F 相对于市场平均电价 $\bar{\rho}$ 的百分数量化市场的价格风险，计算公式如下：

$$\sigma = \frac{F}{\bar{\rho}} \times 100\% \quad (17)$$

市场机制设计人员在设计市场机制时，可以事先确定所要达到的风险指标 σ ，然后借助于此模型就可以评价出市场机制是否满足设计要求。

3 算例分析

为了验证本文提出的风险评估模型的有效性，本节将以某实际系统部分机组构成的区域电力市场为算例进行计算。市场中，交易中心每隔一小时组织一次竞价，也就是说市场的竞标时段为一小时。此系统由 10 台机组组成，机组的参数如表 1 所示，

表 1 机组数据

Tab.1 Parameter of the generators

机组编号	最小出力	最大出力	d	a	b
1	15	60	750	70	3.06
2	20	80	1250	75	2.4
3	30	100	2000	67.5	2.34
4	25	120	1600	70	2.28
5	50	150	1450	77	1.26
6	75	280	3600	67.5	0.78
7	120	320	5250	69.8	0.4
8	50	150	5000	66.45	0.84
9	200	520	2450	63.2	0.84
10	75	200	4100	60.7	0.9

此表中的 d, a, b 分别代表机组成本函数 (1) 中的参数 d_i, a_i, b_i 。本节表格中出力的单位都是 MW，价格的单位都是元。

此系统中 10 台机组总的容量为 1 800 MW, 在计算过程中, 本文用负荷占发电总容量的比例来表示此时的负荷水平。当负荷处于一个较高的水平时, 文献[5]已经证明此市场是一个不稳定的市场, 市场中风险水平较高。为了控制此风险, 该文献在虚拟负荷需求弹性 l 的基础上, 基于社会效益理论提出了一种价格控制模型, 即当市场中的电价超过边际成本后, 各发电商按下式赔偿社会效益损失^[5]:

$$A_i' = \frac{G_i}{\sum_{j=1}^n G_j} lr(\rho - \rho_0) \quad (18)$$

$$A_i'' = \left(\frac{G_i}{\sum_{j=1}^n G_j} P_L - P_i \right) \frac{lr(\rho - \rho_0)}{P_L} \quad (19)$$

其中: P_L 为某投标时段的负荷水平; ρ_0 为市场在该负荷水平下的边际成本; G_i 为市场各台机组的出力; ρ 为市场出清电价; r 是由负荷结构和社会经济发展水平决定的系数, 反应单位电量不足导致的社会效益损失; $lr(\rho - \rho_0)$ 是对社会效益损失的度量。发电商赔偿的社会效益损失由两部分组成, 式(18)表示其中与其机组容量相关的那一部分, 式(19)表示的是与其机组实际出力相关的那一部分。

当市场中的负荷水平为 0.858 (1 700 MW) 时, 采用本文提出的风险评估模型对采取价格控制前后的市场进行风险评估。评估时假设发电商的报价 k_i 遵从正态分布 $N(k_i^*, 0.1k_i^*/1.96)$, 也就是说发电商的报价系数有 95% 的几率落在区间 $(0.9k_i^*, 1.1k_i^*)$ 中。模拟次数为 100 次, 结果如表 2。

表 2 风险评估结果

Tab.2 Results of risk evaluation

电价 (元/MW)	价格 控制前	价格 控制后	统比下降 /(%)
边际成本	289.233	289.233	0
价格水平	323.731	291.047	10.09
价格期望	8.713 92	7.004 25	19.61
市场风险	2.69	2.40	10.7

从表 2 得出的结果可以看出, 采用该价格控制措施后, 市场风险有了明显的降低。文献[5]已经证明采用此价格控制措施后市场运行变得更稳定, 也就是说本文提出的市场风险评估模型能够有效地评价出市场机制的优劣, 从而为市场机制设计人员提供有益的参考。

4 结论

蒙特卡洛模拟法是风险评估的常用工具, 本文以电价为研究的切入点, 将市场参与者的报价看作满足正态分布的随机变量, 首次提出了基于蒙特卡洛模拟法的电力市场风险评估模型。该模型不需要借助市场运行的历史数据, 就可以快速、有效地评估出市场风险, 为市场机制设计人员提供有益的参考。

参考文献

- [1] 丁军威, 夏清, 等. 发电侧逐步市场化的竞价新模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3):10-15.
DING Jun-wei, XIA Qing, et al. A New Model for Gradually Establishing Competitive Generation Market[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3):10-15.
- [2] 耿建, 王锡凡, 丁小莺, 等. 电力市场分段竞价模型与分时竞价的比较[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9):22-27.
GENG Jian, WANG Xi-fang, DING Xiao-ying, et al. Models of Block Bidding in Power Market and Comparisons with Hourly Bidding[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9):22-27.
- [3] 汤振飞, 唐国庆, 于尔铿, 等. 电力市场动态分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12):88-92.
TANG Zheng-fei, TANG Guo-qing, YU Er-keng, et al. Power Market Dynamic Analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12):88-92.
- [4] 王锡凡. 我国电力市场竞价模型框架探讨[J]. 中国电力, 2000, 33(11):37-40.
WANG Xi-fan. Study on Framework of Bidding System Model for Power Market in China[J]. Electric Power, 2000, 33(11):37-40.
- [5] 王秀丽, 张新松, 许小川, 等. 单边电力市场中价格调控机制及其模拟[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21):10-14.
WANG Xiu-li, ZHANG Xin-song, XU Xiao-chuan, et al. Research on Mechanism of Price Adjusting and Simulation in Unilateral Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21):10-14.
- [6] 白利超, 康重庆, 夏清, 等. 不确定性电价分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5):36-41.
BAI Li-chao, KANG Chong-qing, XIA Qing, et al. Analysis on the Uncertainty of Electricity Price[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5):36-41.
- [7] Denton M, Palmer A, Mastello R, et al. Managing Market Risk in Energy[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2):494-502.
- [8] Dahlgren R, Liu C C, Lawarree J. Risk Assessment in Energy Trading[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2):503-511.

(下转第 67 页 continued on page 67)

方向误动。现有两种解决方案:

- 1) 断开 OO' , 增加 $O'N$ 连线。
- 2) 取消 $3U_0$ 回路。在这种情况下, 也不能允许有 OO' 连线。

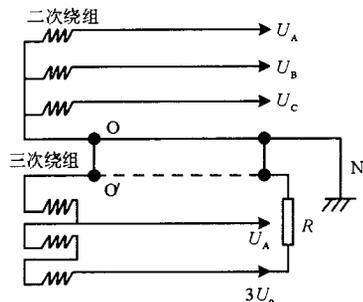


图3 常见的电压互感器二次回路和三次回路接线

Fig.3 Common connections of voltage transformer secondary circuit and third circuit

现在我局所有电压互感器更换后均采取断开 OO' , 增加 $O'N$ 连线, 在控制室中集屏一点接地。

4 结论

一组或几组 N 线相连的电压互感器二次绕组的二次回路只允许在控制室内有一点接地, 电压互感器二次的四根开关场引出线中的零线和电压互感器三次的两根开关场引出线中的 N 线必须分开引入控

制室一点接地, 不得共用电缆。通过以上反措, 保证了设备的安全稳定运行, 确保继电保护装置、自动装置、监控系统正确动作。

参考文献

- [1] GB/T 14285—200X, 继电保护和安全自动装置技术规程[S].
GB/T 14285—200X, Technical Regulations of Protection Equipment and System Stability Control Devices[S].
- [2] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护实用技术问答[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
National Power and Commutation Center. Relay Protection Practical Technique Question and Answer of the Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [3] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护规程汇编[M]. 北京: 中国电力出版社, 1977.
National Power and Commutation Center. Compilation of Power System Relay Protection Regulation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1997.

收稿日期: 2007-01-26;

修回日期: 2007-03-07

作者简介:

刘晓忠 (1977-), 男, 本科, 从事电力系统继电保护工作; E-mail: Lxz_123@21cn.com

叶东印 (1971-), 男, 工程师, 从事继电保护、电力系统生产运行管理工作。

(上接第 33 页 continued from page 33)

- [9] 周浩, 康建伟, 韩祯祥, 等. 利用系统剩余容量评估电力市场短期金融风险[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 6-10.

ZHOU Hao, KANG Jian-wei, HAN Zhen-xiang, et al. Evaluating Short-term Financial Risk in Electricity Market by Applying System Surplus Capacity Percent[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 6-10.

- [10] 周浩, 张富强, 韩祯祥, 等. 利用系统剩余容量评估电力市场中长期金融风险[J]. 电工技术学报, 2004, 19(12): 53-58.

ZHOU Hao, ZHANG Fu-qiang, HAN Zhen-xiang, et al. Evaluating Medium and Long-Term Financial Risk in Electricity Market by Applying System Surplus Capacity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(12): 53-58.

- [11] 周浩, 康建伟, 陈建华, 等. 蒙特卡罗方法在电力市场短期金融风险中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 74-77.

ZHOU Hao, KANG Jian-wei, CHENG Jian-hua, et

al. Evaluating Short-term Financial Risk in the Electricity Market Monte-carlo Method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 74-77.

- [12] 吴易风, 刘凤良, 吴汉洪. 西方经济学[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2000. 268-330.

- [13] 谢识予. 有限理性条件下的进化博弈理论[J]. 上海财经大学学报, 2001, 3(5): 3-9.

XIE Shi-yu. Evolutionary Game Theory Under Bounded Rationality[J]. Journal of Shanghai University of Finance and Economics, 2001, 3(5): 3-9.

- [14] 高鑫, 王秀丽, 雷兵, 等. 独立发电商的策略报价研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6).

GAO Xing, WANG Xiu-li, LEI Bin, et al. Research of Bidding Strategy for Independent Power Plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6).

收稿日期: 2006-09-18;

修回日期: 2007-04-30

作者简介:

张新松 (1980-), 男, 硕士, 助教, 从事电力市场方面的研究和教学。E-mail: prettypbble@163.com