

文章编号:1672-3961(2008)03-0077-04

需求侧 2 种可中断负荷备用市场报价策略的协调

罗运虎, 邢丽冬, 王勤, 刘海春, 翁晓光

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要:迄今为止,有关用户如何协调需求侧低电价与高赔偿 2 种可中断负荷(interruptible load, IL)备用市场报价策略方面的研究一直被长期忽视和孤立.用户在低电价与高赔偿 2 种 IL 市场中的收益特性相同,且属于风险性收益.为使得在这 2 种 IL 市场中所获得的风险性收益之和最大,用户应根据自身停电损失曲线,对这 2 种 IL 市场的报价策略进行协调.为此,在用户优化单一 IL 市场报价策略的基础上,从风险管理角度提出用户协调这 2 种 IL 市场报价策略的数学模型,并基于灵敏度方法对各市场最优报价策略的近似解进行求解.仿真结果验证了该模型的合理性和方法的有效性.

关键词:可中断负荷;报价策略;风险管理;协调优化;备用市场

中图分类号:TM73; F123.9 **文献标志码:**A

Coordination of bidding strategies for two kinds of interruptible load reserve markets on demand side

LUO Yun-hu, XING Li-dong, WANG Qin, LIU Hai-chun, WENG Xiao-guang

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Interruptible load (IL) market can be classified into two kinds of IL markets according to customer participating fashion, namely interruptible load with low price (ILL) market and interruptible load with high compensation (ILH) market. Coordination of bidding strategies in ILL market and ILH market have been ignored and isolated till now. The benefits in ILL market and ILH market are the same and belong to risky benefit. In order to maximize the sum of risk benefit in ILL market and ILH market, customers should coordinate their bidding strategy in ILL market and ILH market according to the interruption cost curve. A mathematical model on the optimization of bidding strategies in ILL market and ILH market was proposed from the viewpoint of risk management and was solved by the sensitivity method on the basis of optimization bidding strategy of individual IL market. Simulation results are presented to validate this method.

Key words: interruptible load; bidding strategy; risk management; coordination optimization; reserve market

0 引言

市场环境下,系统容量事故具有高度的不确定性^[1]和严重的后果^[2].作为一种需求侧紧急备用容量资源,特别是应对小概率高风险的容量事故,可中断负荷(interruptible load, IL)参与备用服务市场的意义非常重大^[3].按用户参与方式的不同,IL 市场可

分为低电价 IL(interruptible load with low price, ILL)市场与高赔偿 IL(interruptible load with high compensation, ILH)市场 2 种,其中 ILL 是在容量事故发生前通过电价打折的方式进行补偿,而 ILH 则是在容量事故发生且被中断后才进行赔偿.文献【4】针对两者经济互补性,对其进行了协调.

目前,有关报价策略优化方面的研究较多地集中在发电商与购电商.文献【5-8】分别基于可能性理

收稿日期:2007-11-01

基金项目:南京航空航天大学引进人才科研基金资助项目(S0736-032)

作者简介:罗运虎(1975-),男,安徽肥东人,讲师,博士,主要从事变电站电气检测与故障诊断、电力需求侧管理方面的研究.

E-mail: yhluo@nuaa.edu.cn

论、模糊博弈理论、效用分析理论以及 SP/A 理论建立了发电公司优化报价策略的方法.文献【9】针对某电厂,给出了其不同机组间的策略组合报价模型.文献【10】将发电商报价策略问题解耦为双层优化问题,上层运用最优潮流得到各电厂的分配量;下层研究各电厂内部各发电商的最优报价策略.文献【11】研究了风险厌恶型和进取型发电商的最优报价策略.文献【12】对供电公司在能量市场上的最优购电报价策略进行优化.

用户在 ILL 市场与 ILH 市场所获得的收益特性相同,且属于风险性收益.ILL 在合约规定的范围内对其实施中断时,将不再支付赔偿,但在研究时段内,ILL 是否被中断以及被中断的强度将与容量事故有关,这将使得 ILL 所获得的经济补偿与其实际中断停电损失之差(简称净收益)将与事故有关,且属于风险性收益.ILH 只有在确实被停电后,才按合约得到高额赔偿,故它所获得的净收益也同样应属于风险性收益.为使得在 ILL 市场与 ILH 市场中的风险性收益之和最大,用户应根据停电损失曲线,对这 2 种 IL 市场的报价策略进行协调.然而迄今为止,这方面的研究一直被长期忽视和孤立.

本文在用户优化单一 IL 市场报价策略的基础上,从风险管理角度,提出用户协调 ILL 市场与 ILH 市场报价策略的数学模型,并基于灵敏度方法对最优报价策略的近似解进行求解.

1 数学模型

1.1 模型的建立

设备用管理中心负责 IL 市场交易撮合,用户申报线性报价函数并按等报价准则参与市场竞价.电网公司在收到各用户在 ILL 市场与 ILH 市场的报价后,针对容量事故集 M ,以购买 IL 付出的补偿总代价 C 值最小为目标,其中 C 值包含在 ILL 市场上的电费损失 $C_i(Q_i)$ 和在 ILH 市场上为各种停电事故承担赔偿责任的总风险 C_h .约束中包括各事故下要求切除的 IL 总量等式约束,以及各 IL 市场可中断容量总量不等式约束^[4].

针对事故 m ,用户 i 的 $\alpha_{i,l}$ 和 $\beta_{i,l}$, $\alpha_{i,h}$ 和 $\beta_{i,h}$, 以及 $Q_{i,l}$ 和 $Q_{i,h}$ 需要满足下式:

$$p_0 d_i(Q_{i,l}) t_z = p_0 h_i(Q_{i,h}) t_m q_m = R, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^I Q_{i,l} + \sum_{i=1}^I Q_{i,h} = Q_m, \quad \forall m, \quad (2)$$

$$Q_{i,l}^{\min} \leq Q_{i,l} \leq Q_{i,l}^{\max}, \quad Q_{i,h}^{\min} \leq Q_{i,h} \leq Q_{i,h}^{\max}. \quad (3)$$

式中: p_0 为销售电价; $d_i(Q_{i,l}) = \alpha_{i,l} + \beta_{i,l} Q_{i,l}$ 为用户 i 在 ILL 市场所申报的电价平均减少率,其中 $\alpha_{i,l}$

和 $\beta_{i,l}$ 为其报价策略, $Q_{i,l}$ 满足 $Q_{i,l}^{\min} \leq Q_{i,l} \leq Q_{i,l}^{\max}$; t_z 为研究时段的长度; $h_i(Q_{i,h}) = \alpha_{i,h} + \beta_{i,h} Q_{i,h}$ 为用户 i 在 ILH 市场所申报的高赔偿倍数(即单位负荷的停电代价与 p_0 的比值),其中 $\alpha_{i,h}$ 和 $\beta_{i,h}$ 为其报价策略, $Q_{i,h}$ 满足 $Q_{i,h}^{\min} \leq Q_{i,h} \leq Q_{i,h}^{\max}$; R 为由 ILL 与 ILH 所组成的 IL 综合备用服务市场的统一出清价; t_m, q_m 分别为事故 m 发生的概率、事故持续时间; Q_m 为事故 m 下要求切除的 IL 总量.

当不考虑式(3)时,求解式(1)和式(2)可得

$$R = \frac{Q_m + \sum_{i=1}^I \frac{t_z \alpha_{i,l} + t_m q_m \alpha_{i,h}}{t_z \beta_{i,l} + t_m q_m \beta_{i,h}}}{\sum_{i=1}^I \frac{1}{p_0 (t_z \beta_{i,l} + t_m q_m \beta_{i,h})}}. \quad (4)$$

$$Q_{i,l} = \frac{R - p_0 t_z \alpha_{i,l}}{p_0 t_z \beta_{i,l}}, \quad Q_{i,h} = \frac{R - p_0 t_m q_m \alpha_{i,h}}{p_0 t_m q_m \beta_{i,h}}. \quad (5)$$

若 $Q_{i,l} \leq Q_{i,l}^{\min}$, 则置 $Q_{i,l} = Q_{i,l}^{\min}$; 若 $Q_{i,l} \geq Q_{i,l}^{\max}$, 则置 $Q_{i,l} = Q_{i,l}^{\max}$; 再运用式(4)及(5), 计算 R 和其它 ILL 所分配到的可中断容量, 直到约束(3)满足为止. 对于 $Q_{i,h}$ 越限情况, 以此类推.

当各用户所分配到的可中断容量都不越限时, 事故 m 下用户 i 所获得的总收益为

$$\pi_i = R(Q_{i,l} + Q_{i,h}) - C_{i,d}(Q_{i,l}, Q_{i,h}) t_m. \quad (6)$$

式中, $C_{i,d}(Q_{i,l}, Q_{i,h}) = aQ_{i,l}^2 + bQ_{i,h}^2$ 为用户 i 的中断停电损失, 其中 a, b 为系数.

由于用户 i 及其它用户的报价策略, 以及 π_i 均为随机量, 在仅考虑用户 i 收益最大的情况下, 用户协调这 2 种 IL 市场报价策略的问题可以描述为

$$\max \bar{\pi}_i, \quad (7)$$

$$\text{s. t. } Q_{i,l} = \frac{R - p_0 t_z \alpha_{i,l}}{p_0 t_z \beta_{i,l}}, \quad Q_{i,l}^{\min} \leq Q_{i,l} \leq Q_{i,l}^{\max}. \quad (8)$$

$$Q_{i,h} = \frac{R - p_0 t_m q_m \alpha_{i,h}}{p_0 t_m q_m \beta_{i,h}}, \quad Q_{i,h}^{\min} \leq Q_{i,h} \leq Q_{i,h}^{\max}. \quad (9)$$

1.2 模型的求解

上述 4 种参数并不独立, 如果预先给定其中的任意 3 个参数, 那么上述问题就可转化为一个一维搜索寻优问题. 对于预先给定 $\alpha_{i,l}, \beta_{i,l}, \alpha_{i,h}$ 情况, 则可采用数值灵敏度技术, 搜索 $d\pi_i/d\beta_{i,h}$ 为零值的点 $(\beta_{i,h,o}, \bar{\pi}_{i,o})$. 迭代中, $\beta_{i,h}$ 的初值可取为各 $\alpha_{i,l}, \beta_{i,l}, \alpha_{i,h}$ 中最大者的某个百分比, 求取数值灵敏度所用的步长和收敛门限值可按对精度的要求而定. 对于其它预先给定情况, 则可以以此类推.

当 $Q_{i,h} \geq Q_{i,h}^{\max}$ 或 $Q_{i,h} \leq Q_{i,h}^{\min}$ 时, 则可以令

$$\frac{R - p_0 t_m q_m \alpha_{i,h}}{p_0 t_m q_m \beta_{i,h}} = Q_{i,h}^{\max} \text{ 或 } \frac{R - p_0 t_m q_m \alpha_{i,h}}{p_0 t_m q_m \beta_{i,h}} = Q_{i,h}^{\min} \text{ 来求取 } \beta_{i,h,o}. \text{ 对于其它越限情况, 以此类推.}$$

2 仿真分析

2.1 计算条件

设正常销售电价 p_0 为 400 元/MW·h, 研究时段 t_z 为 24 h. 用户 1 的中断停电损失系数 a 为 0.002 元/MW²·h, b 为 0.004 元/MW²·h. 表 1 和表 2 给出了其它用户在 ILL 市场与 ILH 市场所申报的 $\beta_{i,l}$ 与 $\beta_{i,h}$, 且服从区间上的均匀分布; 表 3 为事故集场景.

表 1 其它用户在 ILL 市场上的报价参数

Table 1 Bidding parameters in ILL market for other customers

用户 i	可中断容量 下限/MW	可中断容量 上限/MW	报价策略 $\beta_{i,l}$
2	0	40	[0.002 5, 0.003 5]
3	0	40	[0.004 5, 0.005 5]
4	0	60	[0.006 5, 0.007 5]

表 2 其它用户在 ILH 市场上的报价参数

Table 2 Bidding parameters in ILH market for other customers

用户 i	可中断容量 下限/MW	可中断容量 上限/MW	报价策略 $\beta_{i,h}$
2	0	40	[3, 5]
3	0	45	[5, 7]
4	0	60	[7, 9]

表 3 事故集场景
Table 3 Fault scenarios

事故 m	发生概率	要求切除的 IL 总量/MW	持续时间/h
1	0.100	50	3
2	0.015	100	5
3	0.005	150	7

2.2 单个事故下各 IL 市场最优报价策略

针对 $\beta_{i,h} = 1, \beta_{i,l} = 0.001$ 以及单一事故, 图 1 和图 2 分别给出用户 1 在 ILL 市场、ILH 市场上的报价策略与其总收益期望的关系. 表 4 给出了优化结果.

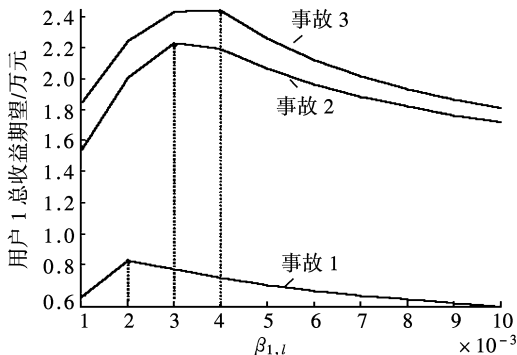


图 1 当 $\beta_{i,h} = 1$ 时用户 1 在 ILL 市场上的最优报价策略

Fig.1 Optimal bidding strategy in ILL market with respect to $\beta_{i,l}$ while $\beta_{i,h} = 1$ for customer 1

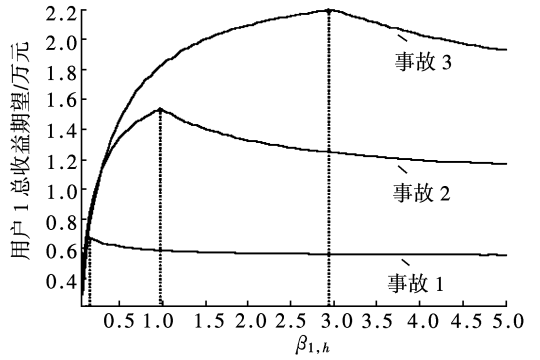


图 2 当 $\beta_{i,l} = 0.001$ 时用户 1 在 ILH 市场上的最优报价策略

Fig.2 Optimal bidding strategy in ILH market with respect to $\beta_{i,h}$ while $\beta_{i,l} = 0.001$ for customer 1

表 4 优化结果

Table 4 Results of optimization

事故 m	$\beta_{i,h} = 1$		$\beta_{i,l} = 0.001$	
	$\beta_{i,l,o}$	$\pi_{1,o}/\text{万元}$	$\beta_{i,h,o}$	$\pi_{1,o}/\text{万元}$
1	0.002	0.820 6	0.015	0.676 4
2	0.003	2.227 5	0.950	1.532 5
3	0.004	2.447 8	2.950	2.199 7

2.3 ILL 市场最优报价决策

对于不同的单一事故, 用户 1 在 ILL 市场的最佳报价策略并不相同. 为此, 用户 1 在制定 ILL 市场最佳报价策略时, 必须考虑 M . 针对 M 下 ILL 容量最优配置决策 95MW (见图 3), 图 4 给出了用户 1 在 ILL 市场的最佳报价决策.

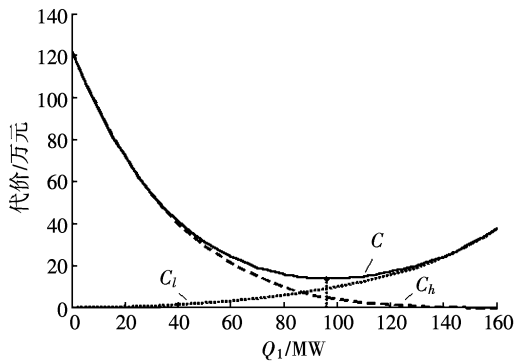


图 3 最优 ILL 容量决策

Fig.3 Optimal ILL capacity decision

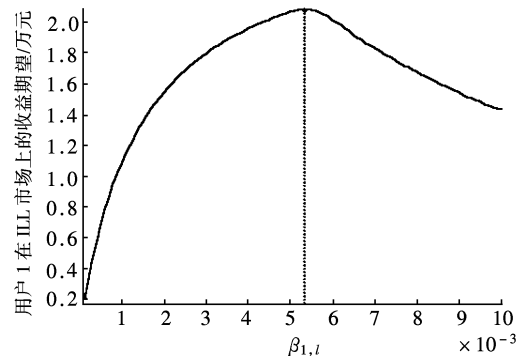


图 4 用户 1 在 ILL 市场的最佳报价决策

Fig.4 Optimal bidding decision in ILL market for customer 1

3 结语

迄今为止,有关用户如何协调 ILL 市场与 ILH 市场报价策略方面的研究一直被长期忽视和孤立. 本文在用户优化在单一 IL 市场报价策略的基础上, 在假设用户按线性函数报价并采用市场统一结算的前提下, 从风险管理角度提出用户协调在 ILL 市场与 ILH 市场报价策略的数学模型, 并运用灵敏度方法对最优报价策略的近似解进行求解, 从而为用户构造报价策略时兼顾 ILL 市场与 ILH 市场收益提供了新的解决途径. 仿真结果表明了其有效性.

参考文献:

- [1] 孟祥星, 韩学山. 不确定性因素引起备用的探讨[J]. 电网技术, 2005, 29(1):30-34.
MENG Xiang-xing, HAN Xue-shan. Discussion on reserve caused by uncertain facts [J]. Power System Technology, 2005, 29(1):30-34.
- [2] 薛禹胜. 电力市场稳定性与电力系统稳定性的相互影响[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21):1-6.
XUE Yu-sheng. Interactions between power market stability and power system stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21):1-6.
- [3] 薛禹胜, 罗运虎, 李碧君, 等. 关于可中断负荷参与系统备用的评述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10):1-6.
XUE Yu-sheng, LUO Yun-hu, LI Bi-jun, et al. A review of interruptible load participating system reserve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10):1-6.
- [4] 罗运虎, 薛禹胜, DONG Z, 等. 低电价与高赔偿 2 种可中断负荷的协调[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11):17-21.
LUO Yun-hu, XUE Yu-sheng, DONG Z, et al. Coordination of low price interruptible load and high compensation interruptible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11):17-21.
- [5] 杨莉, 文福栓, 吴复立, 等. 基于可能性理论的发电公司最优报价策略[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(23):

12-17.

YANG Li, WEN Fu-shuan, WU Fu-li, et al. A possibility theory based approach for building optimal strategies in electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23):12-17.

- [6] 马林, 谢敦礼. 模糊博弈理论在发电厂商报价决策中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(17):15-18, 85.
MA Lin, XIE Dun-li. Application of fuzzy game theory to bidding decision of power producers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17):15-18, 85.
- [7] 张喜铭, 姚建刚, 李立颖, 等. 基于效用分析方法的发电企业最优报价策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7):12-16, 78.
ZHANG Xi-ming, YAO Jian-gang, LI Li-ying, et al. Utility analysis based optimal bidding strategies for power generating enterprises[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7):12-16, 78.
- [8] 吕泉, 武亚光, 李卫东. 基于 SP/A 理论的发电商报价决策模型[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4):29-34.
LÜ Quan, WU Ya-dong, LI Wei-dong. Novel decision-making model for generation company based on SP/A theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4):29-34.
- [9] 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(7):41-46.
GAO Xin, WANG Xiu-li, LEI Bing, et al. Research on bidding strategy for an independent power plant[J]. Proceedings of the CESS, 2004, 24(7):41-46.
- [10] GOUNTIES V P, BAKIRTZIS A G. Bidding strategies for electricity producers in a competitive electricity market place [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1):356-365.
- [11] RODRIGUEZ C P, ANDERS G J. Bidding strategy design for different types of electric power market participants[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2):964-971.
- [12] 谢俊, 陈星莺. 单一卖方电力市场供电公司最优报价策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16):68-73.
XIE Jun, CHEN Xing-ying. Optimal bidding strategies for distribution companies in single-seller electricity markets[J]. Proceedings of the CESS, 2006, 26(16):68-73.

(编辑:许力琴)