

可靠性需求市场中用户的风险决策

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, 江苏省南京市 210016)

Risk Decision-making for Customer in Reliability Demand Market

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

(College of Auto. Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The customer has two kinds of identities namely participating in energy market and reserve market in electricity market environment. Different beneficial and supplementary properties for the two kinds of capacities should be utilized to improve customer benefit. In this paper, decision for customer reliability demand is made based on risk management opinion and coordination optimization theory. The objective function of math model is the sum of the deterministic benefit resulting from using power and the risk benefit from interruptible supply. Optimization algorithm based on sensitivity technology is proposed in order to quicken the velocity of optimization. Simulation results are presented to validate that too high or too low in customer reliability demand are both not appropriate and an optimal value should be existed.

KEY WORDS: reliability demand; risk decision; benefit; coordination optimization; risk management; electricity market

摘要: 市场环境下, 用户的身份按其参与市场的方式可分为用电容量的需求方和备用容量的供应方 2 类。为提高用户收益, 该文在对这 2 种容量不同收益特性及其互补性进行分析的基础上, 基于风险管理观点与协调优化理念, 提出基于风险的用户可靠性需求决策模型, 使用户参与用电市场的确定性收益与参与备用市场的风险性收益之和最大。为加快寻优速度, 提出基于灵敏度技术的优化算法。仿真结果表明用户可靠性需求过高或过低都不合适, 而应存在最优值。

关键词: 可靠性需求; 风险决策; 收益; 协调优化; 风险管理; 电力市场

0 引言

随市场观点的引入, 用户是系统供电可靠性市场的参与方。不同用户对供电可靠性的需求不同, 迫切要求供应商能按其供电可靠性要求进行合理定价。有关如何区分不同可靠性水平下的用电电价, 已成为市场环境下系统可靠性研究的一个热点^[1]。

目前围绕用户可靠性电价的制定, 已提出了多种方法。文献[2]提出应将供电可靠性作为电力商品, 并按质定价。文献[3]以配电系统为研究对象, 提出一种基于用户可靠性需求的综合定价法。文献[4]基于用户停电损失, 采用线性加权的方法来计算可靠性电价。文献[5-6]鉴于可靠性电价属于分级电价的一种, 按供电可靠度对用户进行分级, 并应用边际定价理论, 给出了计算分级电价的数学模型。文献[7]引入需求价格弹性, 建立了考虑用户满意度的需求侧管理(demand side management, DSM)价格决策模型。文献[8]基于机制设计理论来让管制者对多类型用户进行非线性定价。

在系统运行中, 发电机停运、输电网故障、负荷意外波动等容量事故场景具有高度的不确定性^[9], 随时会破坏电力生产与消费之间的实时平衡, 轻则影响电能质量, 重则破坏电力系统的物理稳定性^[10]。当系统出现各种可能的容量事故时, 既可购买发电侧备用容量, 也可购买需求侧可中断负荷(interruptible load, IL)来应对^[11]。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, IL参与备用服务市场的意义非常重大。

用户有经营型用户与非经营型用户(如具有生活用电需求的居民用户)之分, 文中所提到的用户是指前者。市场环境下, 用户既是用电容量的需求方, 也是系统备用容量的供应方。用户这种多样化的角色将使其利润的来源具有多元化, 即用户既可通过支付反映其供电可靠性需求的可靠性电价的方式来获取用电收益, 也可以 IL 身份参与系统备用来获取一定的中断补偿(或称备用收益)。

用电收益与容量事故是否真正发生无关, 故其收益特性是确定性的; 而备用收益则与容量事故有关, 故其收益特性具有风险性。对于小概率的容量

事故,用户选择较高的可靠性需求从增加用电收益角度可能并不合理;而对于高概率的容量事故,选择较低的可靠性需求从增加其备用收益角度也不合理,因而用户收益完全可在一定备用收益风险水平达到最大化,其可靠性需求决策的实质是一个收益最大化问题。然而迄今为止,从用户同时参与用电与备用两种市场角度,对其可靠性需求进行风险决策的研究一直被长期忽视和孤立。

本文将用户用电容量与备用容量的确定性和风险性两种收益进行货币化,在满足系统安全可靠性的前提下,基于风险管理观点与协调优化理念,建立用户可靠性需求风险决策模型并求解。

1 用户参与用电市场所获得的确定性收益

设 p_0 为电网平均销售电价,研究时段为1h,用户 j 可靠性需求水平为 $r_j(0 < r_j < 1)$,所支付的可靠性电价为 $p_j = (1+r_j)p_0$,用电负荷为 $Q_{j,1}$,消费单位用电负荷所获得的总收益为 $v_{j,1}$,则其用电收益(静收益)为

$$S_{j,1} = k_{j,1}Q_{j,1}(v_{j,1} - p_j) = k_{j,1}Q_{j,1}(v_{j,1} - (1+r_j)p_0) \quad (1)$$

式中 $k_{j,1}$ 为考虑用电过程各种附加成本所引入的折算系数。

2 用户参与备用市场所获得的风险性收益

2.1 用户的停电赔偿费用

按对用户补偿方式的不同,IL可分为低电价可中断负荷(interruptible load with low price, ILL)与高赔偿可中断负荷(interruptible load with high compensation, ILH),其中ILL是在事故前通过电价打折来换取负荷的可中断权^[12-14],ILH则是在事故发生且中断措施实施后才进行赔偿^[15-19]。市场规则要求各IL分别申报线性报价函数,并按中断成本等微增率准则参与IL市场竞价,具体竞价过程可参照发电侧^[20]。这里以用户参与ILH市场为例,对其竞价过程进行介绍;对于ILL市场情况,则可以此类推。

在 r_j 下,设用户 j 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)为 $h_j(Q_{j,2}) = \alpha_j + \beta_j Q_{j,2}$,其中 α_j 和 β_j 为其竞标策略(极限情况下为常数); $Q_{j,2}$ 满足 $Q_j^{\min} \leq Q_{j,2} \leq Q_j^{\max}$ 。作为理性的用户,如果所申报的 r_j 越大,则所申报的 $h_j(Q_{j,2})$ 也应越大。一旦实施停电,电网公司支付用户 j 的停电赔偿费用为 $C_j(Q_{j,2}) = p_0 h_j(Q_{j,2}) Q_{j,2}$ 。

假设针对事故 m 需要中断的ILH容量为 $Q_{h,m}$,用

户侧IL管理中心以电网公司向各ILH支付的赔偿费用之和最小为优化的目标,撮合交易。

$$\min \sum_j p_0 h_j(Q_{j,2}) \times Q_{j,2} \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \sum_j Q_{j,2} = Q_{h,m} \quad (3)$$

$$Q_j^{\min} \leq Q_{j,2} \leq Q_j^{\max}, \quad \forall j \quad (4)$$

先不考虑不等式约束(4),运用拉格朗日乘子法求解式(2)、(3),得到

$$\lambda = \frac{Q_{h,m} + \sum_j \frac{\alpha_j}{2\beta_j}}{\sum_j \frac{1}{2p_0\beta_j}} \quad (5)$$

$$Q_{j,2} = \frac{\lambda - p_0\alpha_j}{2p_0\beta_j}, \quad \forall j \quad (6)$$

式中 λ 为拉格朗日乘子。然后考虑不等式约束,若 $Q_{j,2} \leq Q_j^{\min}$,则置 $Q_{j,2} = Q_j^{\min}$;若 $Q_{j,2} \geq Q_j^{\max}$,则置 $Q_{j,2} = Q_j^{\max}$;运用式(5)、(6),重新计算 λ 和其它ILH所分配到的可中断容量,直到约束(4)完全满足为止。

一旦对容量为 $Q_{h,m}$ 的ILH实施停电,电网公司所支付的停电赔偿费用为

$$L_{d,m} = \sum_j p_0 h_j(Q_{j,2}) Q_{j,2} \quad (7)$$

2.2 备用收益风险

针对容量事故集 M ,在各容量事故持续时间为1h的前提下,用户 j 参与系统备用所获得的备用收益总风险为

$$S_{j,2} = \sum_{m \in M} \lambda_m v_{j,2} Q_{j,2} \quad (8)$$

式中: λ_m 为事故 m 的发生概率; $v_{j,2}$ 为用户 j 参与ILH市场被中断单位容量所获得的静收益。

3 决策模型

3.1 模型的建立

在满足系统安全可靠性的前提下,针对 M ,用户 j 基于风险的可靠性需求决策模型为

$$\begin{cases} \max S_j = S_{j,1}(r_j) + S_{j,2}(r_j, Q_1, \dots, Q_m, \dots, Q_M) \\ \text{s.t.} \sum_j Q_{j,2} = Q_m \\ Q_j^{\min} \leq Q_{j,2} \leq Q_j^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中 Q_m 为事故 m 下要切除的IL总量。式(9)以用电收益与备用收益总风险之和最大为目标函数,并以系统安全可靠性的要求、要求应对的IL总量平衡及用户可中断容量限制为约束条件。

3.2 模型特点

针对不同交割方式,该决策模型以用户参与用电市场所获得的用电收益作为确定性收益,以参与系统备用市场所获得的备用收益作为风险性收益。以确定性收益与风险性收益之和最大为目标函数,而不是单纯以确定性收益或风险性收益最大为目标函数,引入了风险管理观点与协调优化理念。

3.3 决策问题的描述

在满足系统安全可靠性的前提下,图 1 以单一事故下的收益曲线来描述用户 j 可靠性需求 r_j 的风险决策过程,从中不难看出以下 3 点:①随 r_j 的增加, $S_{j,2}$ 随之增加, $S_{j,1}$ 随之减少;②当 $r_j > r_{j,0}$ 时,如果所要求的 r_j 过高,则 $S_{j,2}$ 的增加量将不足以弥补 $S_{j,1}$ 的减少量,此时可适当减小 r_j 来增加 S_j ;③当 $r_j < r_{j,0}$ 时,如果所要求的 r_j 过低,则 $S_{j,2}$ 的增加量将大于 $S_{j,1}$ 的减少量,此时可适当增加 r_j 来增加 S_j 。

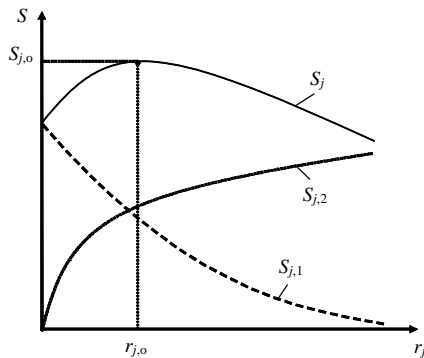


图 1 用户 j 可靠性需求的风险决策
Fig. 1 Risk decision-making for reliability requirement for customer j

可见,只要 $r_j \neq r_{j,0}$,都将导致 S_j 减少。用户 j 的可靠性需求决策过程就是寻找 $r_{j,0}$ 点的过程。

3.4 优化算法

根据等微增率准则,用户 j 可靠性需求的最优决策值应满足 $|\partial S_{j,1} / \partial r_j| = \partial S_{j,2} / \partial r_j$ 。通过 $w_j = \partial S_{j,2} / \partial S_{j,1}$,可有效引导对 $r_{j,0}$ 的搜索。

根据上面的搜索策略,可采用以下算法^[11]:①对 r_j 初始配置量赋以零值($n = 0, r_{j,n} = 0$),并设其增加的步长为 Δr ;②在每一 Δr 内,计算 w_j ;③判断 w_j 是否小于 1,如是,则转⑤;④令 $r_{j,n+1} = r_{j,n} + \Delta r$,按步长增加 r_j ,转②;⑤得出 $r_{j,0}$ 最优决策方案。

虽然该算法不能得到最优解,但能通过较少的计算量得到满意解,因而比较适合工程应用。基于收益的灵敏度技术将大大加快搜索速度。

4 仿真分析

4.1 计算条件

设电网平均销售电价 p_0 为 400 元/(MW·h)。用户 1 用电负荷 $Q_{1,1}$ 为 120 MW,用电总收益 $v_{1,1}$ 为 1 000 元/(MW·h),中断单位容量所获得的静收益 $v_{1,2}$ 为 7 000 元/(MW·h), $k_{j,1}$ 为 0.05。表 1~3 分别给出了其它用户的可靠性需求投标、ILH 市场参数及事故集场景。

表 1 其它用户可靠性需求投标
Tab. 1 Bidding of reliability requirement for other customers

用户	2	3	4
可靠性需求指标	0.3	0.5	0.7

表 2 ILH 市场参数
Tab. 2 Parameters of ILH market

用户	可中断容量下限/MW	可中断容量上限/MW	竞标策略
1	0	20	r_1
2	0	40	3
3	0	40	5
4	0	60	7

表 3 事故集场景
Tab. 3 Fault scenarios

事故	发生概率	要求切除的 IL 总量/MW
1	0.05	50
2	0.03	80
3	0.02	100

4.2 用户 1 最优可靠性需求决策

图 2 给出用户 1 针对单个事故, r_1 与 S_1 的关系。对于不同的容量事故,关系曲线的相对位置不同。为此,用户 1 在制定 $r_{1,0}$ 方案时,必须考虑 M ,如图 3 所示。在上述仿真条件下,得到的最优方案为: $r_{1,0}$ 为 0.65, $S_{1,0}$ 为 0.79 万元,其中 $S_{1,1}$ 为 0.20 万元。其优化结果如表 4 所示。

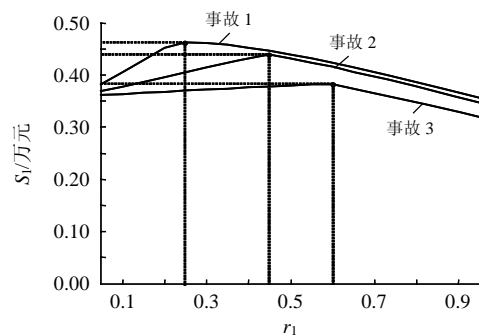


图 2 单个事故下用户 1 最优可靠性需求
Fig. 2 Optimal reliability requirement of customer 1 for the individual fault

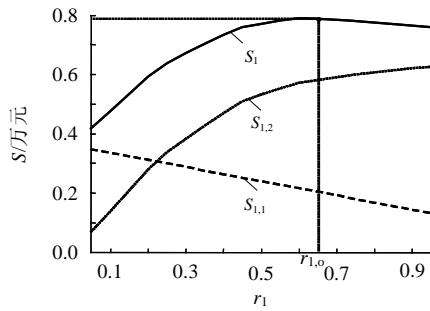


图3 事故集下用户1最优可靠性需求
Fig. 3 Optimal reliability requirement of customer 1 for all faults

表4 优化结果
Tab. 4 Results of optimization

事故	$r_{1,0}$	$S_l/\text{万元}$
1	0.25	0.46
2	0.45	0.43
3	0.60	0.38
事故集	0.65	0.79

5 结论

市场环境下,虽然容量事故的不确定性不可控,但用户作为市场参与者与风险管理者,其收益风险则完全可控。对于小概率的容量事故,用户选择较高的可靠性需求从增加用电收益角度可能并不合理;而对于高概率的容量事故,用户选择较低的可靠性需求从增加其备用收益角度也不合理,因而用户可靠性需求过高或过低都不合适,而应存在最优值,其决策实质是一个收益最大化问题。

本文以用户参与用电市场的确定性收益与参与备用市场的风险性收益之和最大为目标函数,以系统安全可靠要求及可中断容量限制为约束条件。不但协调了市场环境下的安全性与经济性,而且实现了用户两种具有不同收益特性容量之间的协调。仿真结果表明了其风险决策的有效性。

参考文献

- [1] 吴政球,叶世顺,匡文凯. 电力市场环境下的可靠性电价与可靠性交易[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 74-77.
Wu Zhengqiu, Ye Shishun, Kuang Wenkai. Reliability transaction and reliability pricing in electricity market environment[J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 74-77(in Chinese).
- [2] 胡江溢,黄家裕,侯志俭,等. 实时电价下的用户中继管理[J]. 电网技术, 1997, 21(6): 71-73, 76.
Hu Jiangyi, Huang Jiayu, Hou Zhijian, et al. Consumer outage management under real-time pricing of electricity[J]. Power System Technology, 1997, 21(6): 71-73, 76(in Chinese).
- [3] 周平,谢开贵,周家启,等. 适应电力市场环境下的可靠性电价与赔偿机制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 6-10.

- Zhou Ping, Xie Kaigui, Zhou Jiaqi, et al. Reliability power price and compensation mechanism adapted to electricity market operation environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 6-10(in Chinese).
- [4] 黄永皓,康重庆,夏清,等. 用户分类电价决策方法的研究[J]. 中国电力, 2004, 37(1): 24-28.
Huang Yonghao, Kang Chongqing, Xia Qing, et al. Study on consumer classification differentiated pricing of electricity[J]. Electric Power, 2004, 37(1): 24-28(in Chinese).
- [5] 曹世光,柳焯,于而铿. 分级电价的研究[J]. 电网技术, 1997, 21(2): 66-69.
Cao Shiguang, Liu Zhuo, Yu Erkeng. Study on priority service rate[J]. Power System Technology, 1997, 21(2): 66-69(in Chinese).
- [6] 孔造杰,孙龙,张庆,等. 基于可靠度的分级电价模型研究[J]. 河北工业大学学报, 2003, 32(1): 94-97.
Kong Zaojie, Sun Long, Zhang Qing, et al. Study on the grade electrovalence model based on reliability[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2003, 32(1): 94-97(in Chinese).
- [7] 李晖,康重庆,夏清. 考虑用户满意度的需求侧管理价格决策模型[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 1-6.
Li Hui, Kang Chongqing, Xia Qing. Price based decision making for demand side management considering customer satisfaction index[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 1-6(in Chinese).
- [8] 王先甲,梁劲,周静,等. 关于输配电企业对多类型用户的定价管制模型[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 40-44.
Wang Xianjia, Liang Jin, Zhou Jing, et al. The incentive models of regulated price for power transmission enterprises with multi-type consumers[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 40-44(in Chinese).
- [9] 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 Xiangxing, Han Xueshan. Discussion on reserve caused by uncertain facts[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 30-34(in Chinese).
- [10] 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 Yusheng. Interactions between power market stability and power system stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 1-6(in Chinese).
- [11] 赖业宁,薛禹胜,汪德星,等. 备用容量服务市场的风险决策[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 1-5.
Lai Yening, Xue Yusheng, Wang Dexing, et al. Risk decision-marking for reserve capacity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 1-5(in Chinese).
- [12] Chen C S, Lue J T. Interruptible load control for Taiwan power company[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(2): 460-465.
- [13] Majumdar S, Chattopadhyay D, Parikh J. Interruptible load management using optimal power flow analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 715-719.
- [14] Bhattacharya K, Bollen H J, Daalder J E. Real time optimal interruptible tariff mechanism incorporating utility-customer

- interactions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 700-706.
- [15] 谭伦农, 张保会. 市场环境下的事故备用容量[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 54-58.
Tan Lunnong, Zhang Baohui. Reserve capacity for accident in power market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 54-58(in Chinese).
- [16] Wang J, Redondo N E, Galiana F D. Demand-side reserve offers in joint energy/reserve electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4): 1300-1306.
- [17] Tuan L A, Bhattacharya K. Competitive framework for procurement of interruptible load services[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 889-897.
- [18] 孙昕, 童明光, 赵庆波, 等. 二级备用辅助服务市场中可中断负荷管理模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 30-33.
Sun Xin, Tong Mingguang, Zhao Qingbo, et al. A study on management model of secondary reserve for ancillary services market [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 30-33(in Chinese).
- [19] Wang Jianxue, Wang Xifan, Ding Xiaoying. The forward contract model of interruptible load in power market[C]. IEEE PES Transmission and Distribution Conference, Dalian, China, 2005.
- [20] 马新顺, 文福栓, 刘建新. 构造发电公司最优报价策略的机会约

束规划方法[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 35-39.

Ma Xinchun, Wen Fushuan, Liu Jianxin. A chance constrained programming based approach for building optimal bidding strategies for generation companies with risk management[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 35-39(in Chinese).



罗运虎

收稿日期: 2007-10-23。

作者简介:

罗运虎(1975—), 男, 博士, 讲师, 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工作, yhluo@nuaa.edu.cn;

邢丽冬(1968—), 女, 博士, 副教授, 主要从事远场涡流无损检测方面的工作;

王勤(1967—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电力电子技术方面的工作;

刘海春(1977—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事电力电子方面的工作;

翁晓光(1973—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事精密仪器与机械方面的工作。

(编辑 谷子)