

## 基于信息间隙决策理论的发电商电量分配策略

赵琛, 张少华<sup>†</sup>

(上海大学自动化系, 上海 200072)

**摘要:** 在电力市场环境下, 发电商需要在现货市场、双边合同和期权等交易选择中合理分配交易电量. 针对现货市场电价的严重不确定性, 采用信息间隙决策理论, 提出风险回避发电商在多种交易选择中的电量分配鲁棒决策模型. 算例仿真验证了模型方法的合理性和有效性, 并表明, 所提出方法提供了发电商不同预期收益目标下的电量分配策略可抵抗的现货价格波动幅度, 风险回避发电商可由此评价不同的电量分配策略, 并采用相应的策略来保证预期收益目标.

**关键词:** 电力市场; 发电电量分配; 风险管理; 信息间隙决策理论

**中图分类号:** TM73      **文献标志码:** A

### Generation asset allocation strategies based on IGDT

ZHAO Chen, ZHANG Shao-hua<sup>†</sup>

(Department of Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** In the deregulated electricity market, one of the important decisions which a generation company (GenCo) has to make is to allocate generation asset among the spot market, the bilateral contract and the option contract. To deal with the severe uncertainty in spot market prices, by adopting a risk management technology based on the information gap decision theory (IGDT), a robust model is proposed for risk-averse GenCo's generation asset allocation. Numerical examples are presented to illustrate the reasonableness and effectiveness of the proposed method. It is shown that the proposed method can help the GenCo to assess the robustness of its generation allocation strategies against spot price fluctuation under different expected profits. A risk-averse GenCo can thus evaluate different generation allocation strategies and employ an appropriate strategy to guarantee its expected profit.

**Keywords:** electricity market; generation asset allocation; risk management; information gap decision theory

### 0 引言

电力工业的市场化改革可为发电商提供多种交易选择. 发电商可通过现货市场售电, 也可通过双边合同和期权合同进行电力交易. 通常, 电力现货市场的价格波动剧烈, 具有较严重的不确定性. 面对具有严重不确定性的现货交易电价, 发电商如何制定合理的电量分配策略, 使其收益风险控制可在可接受的范围内, 是电力市场环境下发电商面临的重要问题之一<sup>[1]</sup>.

考虑不确定因素的发电商电量分配策略已得到较多研究, 文献 [1] 采用均值-方差模型, 文献 [2] 基于条件风险价值 (CVaR) 理论, 研究了在现货电价不确定环境下发电商的电量分配风险决策问题. 然而, 现有研究大多假设不确定的现货电价服从已知的概率

分布. 由于电力市场现货价格具有较严重不确定性, 通常较难获得其概率分布信息, 基于均值-方差模型和 CVaR 模型等风险决策理论的发电商电量分配方法, 在实际中较难应用.

针对具有严重不确定因素的风险决策问题, 可采用鲁棒优化<sup>[3]</sup>和信息间隙决策理论<sup>[4]</sup>等方法加以解决. 鲁棒优化方法采用“集合”的形式描述严重不确定性, 以最坏场景为优化对象, 当不确定参数波动时, 仍能确保优化方案的可行性. 然而, 由于场景的差异性和方案的多样性, 鲁棒优化方法难以确定统一的评价准则<sup>[5]</sup>. Ben-Haim<sup>[4]</sup>提出的信息间隙决策理论 (IGDT) 不需要不确定性参数的任何概率分布假设, 注重已知信息与未知信息之间的间隙. 该理论定义了严重不确定环境下的决策性能函数 (鲁棒函数和

收稿日期: 2016-03-14; 修回日期: 2016-08-01.

基金项目: 上海市自然科学基金项目 (14ZR1415300).

作者简介: 赵琛 (1988—), 女, 博士生, 从事电力市场风险管理与决策的研究; 张少华 (1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力市场风险管理、博弈分析等研究.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: eeshzhang@staff.shu.edu.cn

机会函数),有效解决了严重不确定环境下对不确定性的描述和评价准则选取两个问题<sup>[5]</sup>,因此在具有严重不确定性因素的电力市场风险管理中得到了越来越多的关注和应用<sup>[6-8]</sup>.其中:文献[6]采用IGDT理论描述了电力现货市场价格的严重不确定性,研究了发电商在现货市场中的投标策略问题;文献[7]讨论了基于IGDT理论的发电商自我调度决策方法;文献[8]采用IGDT理论,考虑了市场电价和风电出力的不确定性,建立了风力发电商自我调度的鲁棒决策模型.

本文将IGDT理论应用于发电商电量分配决策问题,采用IGDT方法描述电力现货市场价格的严重不确定性,建立风险回避发电商在双边合同、看跌期权和现货市场等交易选择中的电量分配鲁棒决策模型.通过算例分析表明所提出方法的合理性和有效性.

## 1 基于IGDT理论的发电商电量分配模型

### 1.1 模型假设

考虑某一风险回避发电商,面对具有严重不确定性价格的现货市场,它可选择在现货市场售电,也可通过双边合同交易回避现货市场电价波动的风险,还可以通过买入看跌期权合同回避现货市场电价下降的风险.

考虑 $T$ 个小时时段, $T_1$ 为用电需求高峰时段集合, $T_2$ 为用电需求非高峰时段集合.假设存在 $N$ 个双边合同可供发电商选择,看跌期权合同交易只针对高峰时段,且交易量不随时段变化.

采用IGDT方法,假设各时段现货市场电价 $\lambda_s(t)$ 围绕预测电价 $\tilde{\lambda}_s(t)$ 的波动描述如下:

$$\lambda_s(t) \in U(\alpha, \tilde{\lambda}_s(t)) = \left\{ \lambda_s(t) : \frac{|\lambda_s(t) - \tilde{\lambda}_s(t)|}{\tilde{\lambda}_s(t)} \leq \alpha \right\}, \alpha \geq 0, \quad (1)$$

其中 $\alpha$ 为各时段现货电价的波动幅度, $\alpha \geq 0$ .

发电商需决策在各个交易选择中的电量分配,决策变量为

$$q = [p_s(t), p_{oc}, p_b^l(t), l = 1, 2, \dots, N, t = 1, 2, \dots, T].$$

其中: $p_s(t)$ 为发电商在第 $t$ 时段的现货市场交易量, $p_b^l(t)$ 为发电商选择的第 $l$ 个双边合同在第 $t$ 时段的交易量, $p_{oc}$ 为看跌期权合同交易量.

### 1.2 发电商电量分配鲁棒决策模型

发电商的收益函数可表示为

$$B(\lambda_s, q) =$$

$$\sum_{t \in T_1} \left[ \max \{ \lambda_{ck}, \lambda_s(t) \} \cdot p_{oc} + \sum_{l=1}^N \lambda_b^l \cdot p_b^l(t) + \lambda_s(t) \cdot p_s(t) - \lambda_0 p_{oc} - C(p(t)) \right] + \sum_{t \in T_2} \left[ \sum_{l=1}^N \lambda_b^l \cdot p_b^l(t) + \lambda_s(t) \cdot p_s(t) - C(p(t)) \right]. \quad (2)$$

其中: $\lambda_b^l$ 为通过双边合同 $l$ 售电的价格; $\lambda_{ck}$ 、 $\lambda_0$ 分别为看跌期权的敲定价格和权利金.当 $\lambda_s(t) < \lambda_{ck}$ 时,发电商执行期权,其期权交易电量按敲定价格售电;当 $\lambda_s(t) > \lambda_{ck}$ 时,发电商放弃执行期权,其期权交易电量按现货价格售电. $C(p(t))$ 为第 $t$ 时段发电商的发电成本,表示为

$$C(p(t)) = a(p(t))^2 + b(p(t)) + c. \quad (3)$$

其中: $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为发电商的成本系数, $p(t)$ 为第 $t$ 时段发电商发电出力.

在现货电价不确定的环境下,风险回避的发电商通常要求保证某一预期收益目标的实现,在满足最小发电收益不小于某一预期收益 $B_c$ 的前提下,追求其能抵抗的现货电价波动幅度最大化的电量分配策略.根据IGDT理论,可建立如下发电商电量分配的鲁棒决策模型:

$$\hat{\alpha}(B_c) = \max_q \alpha. \quad (4)$$

$$\text{s.t. } \min B(\lambda_s, q) \geq B_c; \quad (5)$$

$$B_c = (1 - \sigma)B_0; \quad (6)$$

$$\lambda_s(t) \geq (1 - \alpha)\tilde{\lambda}_s(t), t = 1, 2, \dots, T; \quad (7)$$

$$\lambda_s(t) \leq (1 + \alpha)\tilde{\lambda}_s(t), t = 1, 2, \dots, T. \quad (8)$$

其中: $B_0$ 为现货市场电价等于预测电价时发电商的最大收益; $\sigma$ 为偏差因子,即预期收益目标 $B_c$ 低于 $B_0$ 的偏差程度,表示由于电价的不确定而造成的风险回避发电商对于收益目标恶化的容忍程度. $\sigma$ 越大, $B_c$ 越小,表示发电商的风险回避程度越大.另外,还需考虑以下约束条件:

1) 发电商出力约束

$$p^{\min} \leq p(t) \leq p^{\max}, t = 1, 2, \dots, T, \quad (9)$$

其中 $p^{\min}$ 和 $p^{\max}$ 分别表示发电商出力的最小和最大限制.

2) 发电爬坡速率约束

$$|p(t-1) - p(t)| \leq \Delta, \quad (10)$$

其中 $\Delta$ 为发电出力爬坡速率限制.

3) 双边合同最大最小合同量约束

$$p_b^l \min s_l < P_b^l(t) < p_b^l \max s_l,$$

$$l = 1, 2, \dots, N, t = 1, 2, \dots, T. \quad (11)$$

其中:  $s_l$  为二进制变量, 若合同  $l$  被选中, 则  $s_l = 1$ , 否则,  $s_l = 0$ ;  $p_p^{l \min}$ 、 $p_p^{l \max}$  分别为双边合同  $l$  的最小、最大合同量。

4) 在  $t$  时段, 发电商的现货市场、双边合同、看跌期权售电总和等于发电出力  $p(t)$ , 即

$$p_s(t) + \sum_{l=1}^N p_b^l(t) + p_{oc} = p(t), \forall t \in T_1; \quad (12)$$

$$p_s(t) + \sum_{l=1}^N p_b^l(t) = p(t), \forall t \in T_2. \quad (13)$$

通常, 当现货市场实际电价取最小值时, 发电商的收益最小, 因此上述鲁棒决策模型可表示为

$$\hat{\alpha}(B_c) = \max_q \alpha. \quad (14)$$

$$\text{s.t. } B(\lambda_s, q)|_{\lambda_s(t)=(1-\alpha)\hat{\lambda}_s(t)} \geq B_c; \quad (15)$$

$$B_c = (1 - \sigma)B_0; \quad (16)$$

$$\text{式(9) ~ 式(13)}. \quad (17)$$

该鲁棒决策模型为混合整数非线性规划问题, 本文采用 GAMS 软件中的 SBB/CONOPT 求解器进行求解<sup>[9]</sup>。

## 2 算例分析

采用美国 PJM 电力市场 2005 年 1 月 3 日 24 小时时段电价作为现货市场预测电价, 如图 1 所示。现货市场实际电价围绕该预测电价上下波动, 用电高峰时段为 8:00~23:00, 其余时段为非高峰时段。风险回避发电商的发电成本系数  $a = \$0.00048/(\text{MW})^2\text{h}$ ,  $b = \$16.19/\text{MWh}$ ,  $c = \$1000.0$ ; 发电商最大、最小出力分别为 455 MW、150 MW; 发电爬坡速率限制  $\Delta = 40 \text{ MW/h}$ 。看跌期权敲定价格  $\lambda_{ck} = \$23.11/\text{MWh}$ , 权利金  $\lambda_0 = 5\% \cdot \lambda_{ck} = \$1.16/\text{MWh}$ 。假设用电非高峰时段和用电高峰时段分别存在 5 个双边合同可供发电商选择, 合同详细参数如表 1 所示。

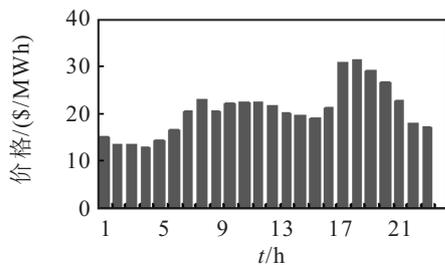


图 1 现货市场预测电价

### 2.1 不考虑现货市场电价不确定性

假设实际电价等于预测电价, 通过求解发电商收益最大化问题, 得到此时发电商收益  $B_0$  为 \$29 856, 发

表 1 双边合同参数

合同编号	使用时段	最小值 (MW)	最大值 (MW)	合同价格 (\$/MWh)
1	非高峰时段	15	25	17
2	非高峰时段	25	40	16.5
3	非高峰时段	30	55	15
4	非高峰时段	35	60	14
5	非高峰时段	40	75	13
6	高峰时段	15	25	25
7	高峰时段	25	40	24.5
8	高峰时段	30	55	23.5
9	高峰时段	35	60	23
10	高峰时段	40	75	22

电商的电量分配结果如图 2 所示。发电商选择合同 1、2、3、6、7、8、9 进行电力交易, 而不选择合同 4、5、10; 高峰时段看跌期权签订量为 275 MW。在 24 小时时段内, 看跌期权总售电量为 4 400 MWh, 所占份额为 46.3%; 双边合同售电量 3 347 MWh, 份额为 35.3%; 现货市场售电量为 1 748 MWh, 份额为 18.4%。此时, 若发电商的预期收益取为  $B_0$ , 即 \$29 856, 则以上电量分配策略能抵抗现货市场电价波动的幅度为 0, 即鲁棒区域  $\hat{\alpha}(\$29 856) = 0$ 。

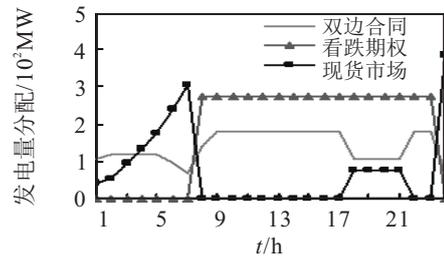


图 2 实际现货电价等预测电价时的电量分配

### 2.2 考虑现货电价不确定性的鲁棒电量分配

假设各时段实际现货电价围绕预测电价上下波动, 波动幅度为  $\alpha$ 。根据发电商不同的预期收益目标  $B_c$  或偏差因子  $\sigma$ , 可获得鲁棒函数  $\hat{\alpha}(B_c)$  随偏差因子  $\sigma$  变化的曲线如图 3 所示。可以看出, 鲁棒函数 (即鲁棒区域) 随  $\sigma$  的增大而增大, 即鲁棒区域随预期收益  $B_c$  的减小而增大。这表明, 发电商预期收益越低, 得到的电量分配策略鲁棒性越好, 越能抵抗较大的现货电价波动。

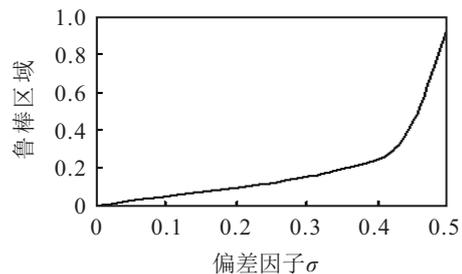


图 3 鲁棒函数随偏差因子  $\sigma$  的变化曲线

图4为电量分配策略随偏差因子 $\sigma$ 变化的曲线。由图4可见,随着 $\sigma$ 的增大或预期收益的减小,双边合同电量增大,现货市场和期权合同的电量减小。表明,随着发电商预期收益的减小(即发电商的风险回避程度增大),发电商将增加价格确定的双边合同交易量,减少价格不确定的现货市场和期权合同交易量,以增大电量分配策略的鲁棒区域。

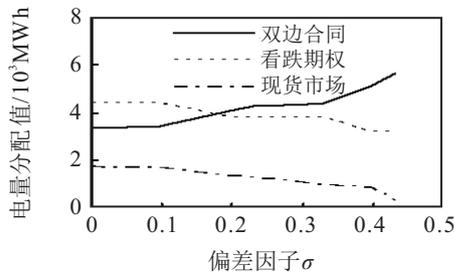


图4 电量分配随 $\sigma$ 的变化曲线

设发电商预期收益 $B_c$ 为\$18 000(比 $B_0$ 小39.7%,即 $\sigma = 0.397$ ),计算得到鲁棒区域 $\hat{\alpha}$ (\$18 000)为0.238,即当现货市场实际电价围绕预测电价的波动幅度不超过23.8%时,能保证发电商的收益至少为\$18 000。此时,发电商的电量分配策略如图5所示,发电商选择合同1、2、3、4、6、7、8、9、10进行交易,高峰时段期权签订量为200 MW。在24小时时段内,看跌期权总售电量为3 200 MWh,份额为35.1%;双边合同电量为5 085 MWh,份额为55.8%;现货市场售电量为825 MWh,份额为9.1%。与鲁棒区域为0时的电量分配策略(图2)相比,双边合同交易量增加,现货市场和期权合同交易量减少。

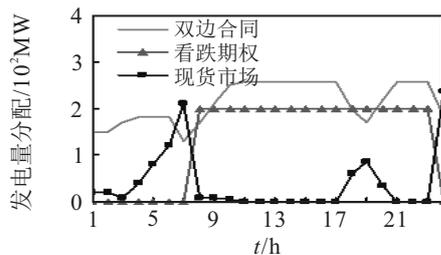


图5 鲁棒区域为0.238时的电量分配

### 3 结论

本文基于IGDT理论,提出了考虑现货市场价格严重不确定性的发电商电量分配鲁棒决策模型。研究表明:1)该模型提供了发电商不同预期收益目标下电量分配策略可抵抗的价格波动幅度,风险回避发电商可由此评价不同的电量分配策略,并采用相应的

策略保证预期收益目标。2)随着发电商预期收益的减小(即发电商的风险回避程度增大),发电商将增加价格确定的双边合同交易量,减少价格不确定的现货市场和期权合同交易量,以增大电量分配策略的鲁棒区域。3)IGDT方法对不确定因素的信息需求量少,适合于处理具有严重不确定性的风险决策问题,该方法为发电商电量分配决策与风险评估提供了新的工具和思路。

### 参考文献(References)

- [1] Guan X H, Wu J, Gao F, et al. Optimization-based generation asset allocation for forward and spot markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(4): 1796-1808.
- [2] Conejo A J, Garcia-Betrand R, Carrión M, et al. Optimal involvement in futures markets of a power producer[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(2): 703-711.
- [3] Lempert R J, Groves D G, Popper S W, et al. A general, analytic method for generating robust strategies and narrative scenarios[J]. Management Science, 2006, 52(4): 514-528.
- [4] Ben-Haim Y. Info-Gap decision theory[M]. San Diego, CA: Academic, 2001: 12-18.
- [5] 胡笑旋, 陈意. 深度不确定环境下的决策分析方法——研究现状与展望[J]. 控制与决策, 2015, 30(3): 385-394. (Hu X X, Chen Y. Decision analysis under deep uncertainty - present situation and prospect[J]. Control and Decision, 2015, 30(3): 385-394.)
- [6] Nojavan S, Zare K, Feyzi M R. Optimal bidding strategy of generation station in power market using information gap decision theory(IGDT)[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 96: 56-63.
- [7] Mohammadi-Ivatloo B, Zareipour B, Amjady N, et al. Application of information gap decision theory to risk-constrained self-scheduling of GenCos[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(2): 1093-1102.
- [8] Moradi-Dalvand M, Mohammadi-Ivatloo B, Amjady N, et al. Self-scheduling of a wind producer based on information gap decision theory[J]. Energy, 2015, 81: 588-600.
- [9] 魏传江, 王浩, 姜新民, 等. GAMS用户指南[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 449-456. (Wei C J, Wang H, Jiang X M, et al. GAMS - A user's guide[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009: 449-456.)

(责任编辑: 郑晓蕾)