

# 考虑报价经验的发电商竞价策略模型

陈永权<sup>1</sup>, 肖湘宁<sup>1</sup>, 宋永华<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206;

2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

## Bidding Strategy Model for Generation Companies Considering Bidding Experiences

CHEN Yong-quan<sup>1</sup>, XIAO Xiang-ning<sup>1</sup>, SONG Yong-hua<sup>2</sup>

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 10084, China)

**ABSTRACT:** With the regional electricity market of the generation side having been constructed and put into the trial operation, a more practical bidding strategy is needed for generation companies when they participate in the regional electricity market. The current domestic and overseas bidding strategies are reviewed. Then a bidding strategy model considering historical bidding experiences is proposed. Four key issues on this bidding model are expounded. The first is how to seek the ideal bidding point. The second is to divide the ideal point into five parts and to estimate risks based on the subjective probability judgment. The third is to determine the most superior electric quantity. The fourth is to adjust the initial probability estimate. Historical bidding experiences can be introduced into the model through the subjective probability judgment and the initial probability judgment can be adjusted. The model has been applied in the annual bidding dealings of northeast regional electricity market and results verify the practicability and effectiveness of the proposed model.

**KEY WORDS:** regional electricity market; generation company; subjective probability judgment; bidding strategy; market clearing

**摘要:** 随着发电侧区域电力市场的构建基本完成并试点运行, 对于参与其中的发电商来说需要更为实用的竞价策略。提出一种对发电商具有实用性的考虑报价经验的竞价策略模型, 并阐述此模型的 4 个关键问题: 寻找理想的报价点, 通过模拟市场出清法和估计竞争对手报价来实现; 形成主观概率判断及对理想报价点进行风险分段; 求出最优竞价电

量; 对形成的初始概率估计进行调整。通过中标概率主观判断的概念把历史报价的经验引入到竞价策略模型中, 并通过主观概率判断的演进实现对初始概率判断的调整从而实现发电商的经验报价趋近于真实值, 在东北区域电力市场初期年度第一轮竞价交易中, 算例结果验证了该方法的实用性和有效性。

**关键词:** 区域电力市场; 发电商; 主观概率判断; 竞价策略; 市场出清

## 0 引言

发电商的竞价策略是指发电商在电力市场进行电力交易过程中根据市场规则进行报价决策时所采取的一整套报价方法。由经济学理论可知, 在理想的、完全竞争的电力市场中, 社会效益得到最大化, 此时发电商的最优报价策略是将电力价格设定在发电机组的边际运行成本, 但实际上, 电力市场不是完全竞争的市场, 而是更接近于寡头垄断市场。这是由电力工业的特殊性所决定的, 如有限数目的发电商、大的投资规模、输电约束和输电损耗等。这些因素决定了在电力市场中, 某些地区可能只有少数发电商提供电力, 这样发电商可以利用市场规则的不完美进行策略性的投标以最大化自身的利润。

国内外的学者在发电商的竞价策略方面已经做了大量研究工作, 可分为 4 大类: 基于成本分析的方法<sup>[1-4]</sup>、预测市场出清价的方法<sup>[5-7]</sup>、估计竞争对手报价行为的方法<sup>[8-9]</sup>以及基于博弈论的方法<sup>[10-12]</sup>。

上述各种竞价策略的形成方法, 有些过多依靠经验, 缺乏理论支持, 有些则对于实际市场做了过多的假设, 使得结果与实际的市场行为有较大的

基金项目: 国家自然科学基金项目(70572090)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (70572090).

偏差；此外，不少区域电力市场的市场规则规定了企业的竞价申报必须满足非负递增的分段形式等，这也令有些传统的竞价策略形成方法不具有可操作性。

随着概率理论的发展，出现了一种可以表达和处理含有未来信息的主观概率判断演进理论，它可以用来研究面向未来的决策行为，在电力市场竞价中，当前竞价行为的决定会受到对未来结果的预测的影响，而这种预测很少有确定性的，一般只能是一种主观概率判断，这种判断的演进在对应的动态决策过程中具有决定性的作用。主观概率方法在电力系统中已有运用，如文献[13]应用主观概率判断研究了强外力骚扰下电力系统脆弱性评估与防护的问题。除此之外，其他不确定性处理方法也大量应用于电力系统中，如文献[14]实现了配电系统可靠性的改进区间分析方法，文献[15]考虑配电网网架规划中的不确定因素，建立了配电网网架区间规划模型等。

本文尝试使用主观概率判断的演进来表达电力市场中发电商报价结果对其未来报价的影响，即通过对报价经验的积累来改进竞价预测主观概率判断的精度，使之逐渐趋近于真实概率，以期跨越由于未知而产生的有限信息的影响，从而修正从市场出清模型中得到的理想报价点，这样，发电企业就可根据自身风险承受能力和市场情况形成最后的报价决策方案。

## 1 主观概率判断演进

存在某种事件A，它或者发生，或者不发生，对此决策人认为事件A的发生带有随机性，并就此形成一种主观概率判断<sup>[16]</sup>，如果他观察到A事件发生了，那么会对先前形成的主观概率判断做出调整。

**定义 1** 主观概率判断的演进过程，初始状态由两部分组成：一部分是由以往经验得到的主观概率判断P，其中事件A发生的概率为p，不发生的概率为(1-p)；另一部分是这种判断所对应的主观上的实验次数 $\hat{n}$ ，可以称它为信次，即目前的主观概率判断相当于进行了 $\hat{n}$ 次实验，观察到事件A发生 $\hat{n}p$ 次，不发生 $\hat{n}(1-p)$ ，整个状态记为 $s=(P, \hat{n})$ 。对应主观概率判断的演进就是由 $s=(P, \hat{n})$ 在对事件A发生与否的n次观察后向新的状态 $s'=(P', \hat{n}')$ 的转移，其中观察到 $n_A$ 次发生， $n-n_A$ 次不发生，则形成的状态转移的公式为

$$\begin{cases} p' = \frac{\hat{n}p + n_A}{\hat{n} + n} \\ P' = \{p', 1 - p'\} \\ \hat{n}' = \hat{n} + n \end{cases} \quad (1)$$

信次无法更好的表达主观概率，为此引入它的一种转化形式信度，信度定义为

$$c = \frac{\hat{n}}{1 + \hat{n}} \quad (2)$$

式中： $c \in [0, 1]$ ；逆变换为 $\hat{n} = c/(1-c)$ 。

**推论 1** 初始状态为 $s=(P, \hat{n})$ 的等价形式为 $s=(P, c)$ ，如果对事件A进行了n次观察(一次观察为特殊情况)，其中观察到 $n_A$ 次发生， $n-n_A$ 次不发生，则状态转移为

$$\begin{cases} p' = \frac{cp + n_A(1-c)}{c + n(1-c)} \\ P' = \{p', 1 - p'\} \\ c' = \frac{c + n(1-c)}{1 + n(1-c)} \end{cases} \quad (3)$$

**定义 2** 决策者对自己已经形成的概率判断的信心往往因人而异，这种信心来自于自己的知识水平、对经验获得渠道的信任程度以及对所考察随机事件的真实概率不随时间变化的相信程度等等，为此，引入信心指数 $\rho$ 的概念，它满足 $\rho \geq 0$ ，其中 $\rho > 1$ 称为信心弱， $\rho < 1$ 称为信心强， $\rho = 1$ 称为信心中性。

将信心指数引入定义 1，从初始状态 $s=(P, \hat{n})$ 开始，对事件A进行n次观察，其中观察到 $n_A$ 次发生， $n-n_A$ 次不发生，则状态转移为 $s'=(P', \hat{n}')$ ，其中

$$\begin{cases} p' = \frac{\hat{n}p + \rho n_A}{\hat{n} + \rho n} \\ P' = \{p', 1 - p'\} \\ \hat{n}' = \hat{n} + \rho n \end{cases} \quad (4)$$

**推论 3** 信心指数为 $\rho$ ，初始状态为 $s=(P, c)$ ，对事件A进行n次观察，其中观察到 $n_A$ 次发生， $n-n_A$ 次不发生，则状态转移为 $s'=(P', \hat{c}')$ 。

$$\begin{cases} p' = \frac{cp + \rho n_A(1-c)}{c + \rho n(1-c)} \\ P' = \{p', 1 - p'\} \\ \hat{c}' = \frac{c + n(1-c)\rho}{1 + n(1-c)\rho} \end{cases} \quad (5)$$

特别地，当 $n=1$ 时，

$$p' - p = \frac{\rho(n_A - p)(1-c)}{c + \rho(1-c)} \quad (6)$$

## 2 考虑报价经验的发电商竞价策略

### 2.1 目标市场规则简介

东北区域电力市场<sup>[17-18]</sup>采取全电量竞争模式，在日前交易开放前，地区负荷按年度合同交易 80%、月度合同交易 20% 的比例分配。年度合同交易以竞价电厂为单位分两次进行，交易在每年的 12 月底前完成，每次交易电量空间各占年度总竞价空间的 50% 左右。

各竞价电厂按五段报价方式报价，交易中心对各电厂报价进行网损修正，并以市场总购电费用最低为目标进行竞价交易，中标电量的中标价格为各竞价电厂中标电量的分段申报价格。交易中心在市场出清时进行安全校核，并根据安全校核结果对竞价结果进行修正。

### 2.2 理想报价点—市场出清模型

发电商理想报价点的获取可以采用模拟市场出清法。模拟市场出清法是指根据市场规则并通过估计竞争对手的报价数据来模拟市场的出清过程，以此得出市场出清价<sup>[19-20]</sup>。

市场出清过程实际上是交易中心进行竞价交易的一个优化问题，其目标函数和约束条件应该符合市场规则的规定。假设交易规则是在满足负荷需求及安全约束的前提下以市场总购电费用最低为目标进行竞价交易，同时交易为年度交易且分两轮进行，第一轮年度市场竞价出清的数学模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \min C_{SP} = \sum_{i \in G} \sum_{j=1}^n \lambda_{i,j} Q_{i,j} U_{i,j} \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i \in G} \sum_{j=1}^n Q_{i,j} U_{i,j} = Q_d \\ \sum_{j=1}^n Q_{i,j} \leq Q_{i,\max} \\ Q_{i,j} \geq 0 \\ \lambda_{\min} \leq \lambda_{i,j} \leq \lambda_{\max} \end{array} \right. \\ \min \Delta Q = \sum_{j \in G_U} |\Delta Q_j| \\ \text{s.t.} Q_l \leq Q_{l,\max}, \quad l = 1, 2, \dots, m \end{array} \right. \quad (7)$$

式中： $C_{SP}$ 为市场总购电成本； $G$ 为竞价电厂的集合； $n$ 为允许的最大报价段数，此处为 20； $Q_{i,j}$ 为各电厂的申报电量； $\lambda_{i,j}$ 为各电厂的申报电价； $U_{i,j}$ 为竞价电厂各段报价的中标情况， $U_{i,j}=1$  表示被选中， $U_{i,j}=0$  表示未被选中； $Q_d$ 为市场的竞价电量空间或负荷需求； $Q_{i,\max}$ 为各竞价电厂的最大可申报电量； $\lambda_{\min}$ 、

$\lambda_{\max}$ 分别为市场公布的最低、最高限价； $\Delta Q$ 为主要输电断面出现阻塞时调整的交易量； $G_U$ 为所有中标电量的集合； $Q_{l,\max}$ 为断面 $l$ 的最大传输能力； $Q_l$ 为交易完成后断面 $l$ 的传输电量； $m$ 为东北区域电网的主要输电断面数，此处为 3。

式(7)表示交易中心以市场总购电费用最低为目标进行竞价交易。第 1 个约束为电量平衡约束；第 2、3、4 个约束分别表示各段之和不大于该电厂的最大可申报电量、竞价电厂的各段申报电量不小于 0、各段申报电价在市场公布的最高最低限价之内；第 5 个约束为主要输电断面出现阻塞时交易中心的调整过程。

第二轮年度市场竞价出清时多考虑了各竞价电厂的最小方式电量约束，因此需把第 2 个约束改写成

$$Q_{i,\min} \leq \sum_{j=1}^n Q_{i,j} + Q_i^l \leq Q_{i,\max} \quad (8)$$

式中： $Q_i^l$ 为 $i$ 竞价电厂经过第一轮竞价后的中标电量； $Q_{i,\min}$ 为 $i$ 竞价电厂的最小方式电量。

### 2.3 考虑报价经验的分段竞价模型

理论上按照模拟市场出清法产生的理想报价点进行报价能获得最大的收益，但由于影响市场出清价的因素众多，理想报价点一定是需要修正的，通常这依赖于报价人员的经验，报价经验在这里体现为对理想报价点的修正以及对各段报价中标的估计，这种估计带有报价人员的主观因素，可以通过主观概率判断给出，但报价人员凭借经验给出的主观概率判断具有很大的不确定性，需要通过对未来结果的验证来不断修改初始的判断，最终获得满意的概率数值，这就是主观概率判断的演进，也是考虑报价经验的分段竞价模型的关键。

#### 1) 中标概率主观判断的描述。

中标概率主观判断是一种既在一定程度上反映客观事物、又受人脑主观因素影响的不确定量，它反映报价员对某种报价的中标，在内心有几分把握，是对中标概率的主观推测。

定义 1 电价中标概率主观判断

$$P_{\text{price\_bel}} = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (9)$$

式中： $P_{\text{price\_bel}}$ 为电价中标概率主观判断，是 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 的函数； $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 分别为客观影响因素(如竞价决策人员能够获得的市场信息、网络信息、估计的竞争对手信息、上次中标的结果以及前面获得的理想报价点等)和主观影响因素(如报价员的素

质、经验、当时心理上受到的压力等)。

**定义2** 电量中标概率主观判断

$$P_{\text{quantity\_bel}} = f(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n) \quad (10)$$

式中： $P_{\text{quantity\_bel}}$ 为电量中标概率主观判断； $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ 分别为竞价决策人员能够考虑到的诸如市场供需情况和自身的市场地位等的客观因素以及竞价决策人员的素质、经验、当时心理上受到的压力等主观因素。

2) 分段报价的形成。

在通过市场出清模型获得理想报价点后,对其作分段处理,比如可以按照一定的比例分段递减设置。

3) 最优投标电量的获得。

假设发电商通过对未来市场价格等因素的分析,形成的电价中标概率主观判断分别为(假设市场规定申报 $n$ 段报价):报电价 $P_{\text{MCP}1}$ 时的中标可能性为 $p_1$ ;报 $P_{\text{MCP}2}$ 时中标可能性为 $p_2$ ;...;报 $P_{\text{MCP}i}$ 时中标可能性为 $p_i$ ;...;报 $P_{\text{MCP}n}$ 时中标可能性为 $p_n$ 。其中, $P_{\text{MCP}1} < P_{\text{MCP}2} < \dots < P_{\text{MCP}i} < \dots < P_{\text{MCP}n}$ ,  $1 \geq p_1 > \dots > p_i > \dots > p_n \geq 0$ 。发电商最大可申报电量为 $Q_{\text{max}}$ ,其电量中标概率主观判断为:中标电量为 $\hat{Q}_1$ 的可能性不小于 $q_1$ ;...;中标电量为 $\hat{Q}_j$ 的可能性不小于 $q_j$ ;...;中标电量为 $\hat{Q}_m$ 的可能性不小于 $q_m$ 。其中, $0 \leq \hat{Q}_1 < \dots < \hat{Q}_j < \dots < \hat{Q}_m \leq Q_{\text{max}}$ ,  $1 \geq q_1 > \dots > q_j > \dots > q_m \geq 0$ 。

电价中标可能性区间( $p_1, p_n$ )和电量中标可能性区间( $q_1, q_m$ )存在3种可能性,即 $p_n > q_1$ 、 $q_m > p_1$ 以及两区间有交集,前2种可能性为非正常状态。为不失一般性,对这3种可能的情况下申报电量的确定方法讨论如下:

1) 当 $p_n > q_1$ 时表明电价中标信心强于电量中标信心,为提高发电商收益将所有可申报电量集中在第 $n$ 段报价上。

2) 当 $q_m > p_1$ 时表明电量中标信心强于电价中标信心,为降低发电商风险将所有可申报电量集中在第1段报价上。

3) 当两区间有交集时,假设每段的申报电量为 $Q_i(i=1, \dots, n)$ ,则可以以 $Q_i$ 为优化变量,以最大化发电商的期望收益为优化目标建立一个线性优化问题来确定各段的申报电量。

在电价中标概率主观判断和电量中标概率主观判断的基础上,发电商确定最优申报电量所依据的期望收益最大化模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \max [E(f)] = Q_1 P_{\text{MCP}1} p_1 + [Q_2 P_{\text{MCP}2} + \\ Q_1 (P_{\text{MCP}2} - P_{\text{MCP}1}) p_2 + \dots + [Q_i P_{\text{MCP}i} + \\ (Q_1 + Q_2 + \dots + Q_{i-1}) (P_{\text{MCP}i} - P_{\text{MCP}i-1})] \cdot \\ p_i + \dots + [Q_n P_{\text{MCP}n} + (Q_1 + Q_2 + \dots + Q_{n-1}) \cdot \\ (P_{\text{MCP}n} - P_{\text{MCP}n-1})] p_n \\ \text{s.t.} \begin{cases} Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i + \dots + Q_n \leq Q_{\text{max}} \\ 0 \leq Q_i \leq Q_{\text{max}}, \quad i=1, \dots, n \\ \sum_{i=1}^l Q_i \geq \hat{Q}_k; \quad k=1, \dots, m, \quad p_l \geq q_k \text{ 且 } p_{l+1} < q_k \end{cases} \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \max [E(f)] = Q_1 P_{\text{MCP}1} p_1 + Q_2 P_{\text{MCP}2} p_2 + \dots + \\ Q_i P_{\text{MCP}i} p_i + \dots + Q_n P_{\text{MCP}n} p_n \\ \text{s.t.} \begin{cases} Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i + \dots + Q_n \leq Q_{\text{max}} \\ 0 \leq Q_i \leq Q_{\text{max}}, \quad i=1, \dots, n \\ \sum_{i=1}^l Q_i \geq \hat{Q}_k; \quad k=1, \dots, m, \quad p_l \geq q_k \text{ 且 } p_{l+1} < q_k \end{cases} \end{array} \right. \quad (12)$$

式中： $E(f)$ 为发电商的期望收益,式(11)表示发电商在市场出清电价(market clearing price, MCP)结算规则下的可能收益及不同段报价的中标信心;式(12)表示发电商在按报价支付(pay as bid, PAB)结算规则下的可能收益及不同段报价的中标信心;约束条件中第1个约束式表示各段申报电量之和不大于最大可申报电量;第2个约束式表示各段申报电量的取值范围不小于0且不大于最大可申报电量;第3个约束式表示当电价中标可能性大于电量中标可能性时,电价中标可能性大的各申报段的申报电量之和不小于该期望中标电量。

约束条件可以根据需要相应地增加,例如第1段申报电量占最大可申报电量的比例、各段申报电量间逐渐减小等,这完全视具体的电力市场规则而定,此问题为常见的线性优化问题,可以采用单纯形法等优化方法来求解,求出的优化结果即为发电商基于该组电价中标概率主观判断和电量中标概率主观判断下的各段最优申报电量。

4) 中标概率主观判断的调整。

本次竞价结果对下一次中标主观概率估计的影响可由 $\Delta p$ 表示,此处 $n_A$ 为中标事件发生的状态,可以取0或1,由式(3)可知:

$$p' = cp + n_A(1-c) \quad (13)$$

令 $\Delta p = p' - p$ ,则

$$\Delta p = (n_A - p)(1-c) \quad (14)$$

式中:当中标时 $n_A$ 为1,没中标时 $n_A$ 为0。

当引入信心指数 $\rho$ 时的影响为

$$\Delta p = \frac{\rho(n_A - p)(1 - c)}{c + \rho(1 - c)} \quad (15)$$

式中：当中标时 $n_A$ 为 1，没中标时 $n_A$ 为 0。

信心指数是决策者赋予新观察值的权重。如果信心强，则赋予新观察值的权重就低，或者说，这个决策者比较坚持；如果信心弱，则赋予新观察值的权重就高，决策者的判断容易改变；信心中性则是中间情况。信心指数表明决策者是否容易改变自己的判断。

## 2.4 计算步骤

考虑报价经验进行分段报价的策略，其具体步骤如下：

1) 通过对竞争对手的估计按照市场出清模型得到出清价格获得自身的理想报价点。

2) 采用主观概率对电价中标概率和电量中标概率给出初始判断。

3) 将考虑风险的分段竞价及考虑风险的电量带入期望收益最大模型中求出最优的投标电量。

4) 根据投标结果对下一轮投标概率做出调整。

5) 每次竞价重复步骤 1)~4)，直到投标概率稳定在一个自己满意的数值。

## 3 算例分析

本文采用东北区域电力市场 2005 年度模拟运行第一轮竞价交易的数据进行计算和分析。

东北区域电力市场 2005 年度第一轮交易的竞价空间为 414.27 亿 kW·h，各安全区的竞价空间为：龙江东为 35.95 亿 kW·h，龙江中西为 73.94 亿 kW·h，吉林为 46.16 亿 kW·h，辽宁为 258.22 亿 kW·h。3 个主要输电断面的输送能力分别为：龙江东部为 45.61 亿 kW·h，吉黑省间为 55.74 亿 kW·h，辽吉省间为 87.99 亿 kW·h。其中，各电厂第一轮竞价电量为其最大可申报电量的 60%且按照市场要求申报五段报价。

1) 发电厂的理想报价点确定。

A 发电厂位于黑龙江东部，装机容量为 70.55 MW，最大可申报电量为 32 530 万 kW·h，最小运行方式电量为 23 210 万 kW·h，网损修正系数为 1.023 74，其中龙江东部断面的输送能力为 45.61 亿 kW·h。将初始竞价数据输入到理想报价点-市场出清模型(7)中，应用 Matlab 程序计算采用排序法求解此优化问题得到各竞争对手的模拟出清结果如表 1 所示，模拟的市场出清价为 220.069 元/MW·h，没有出现输电断面越限情况。

表 1 A 电厂的部分对手电厂模拟出清结果

序号	发电厂	第 1 段	第 2 段	第 3 段	第 4 段	第 5 段
1	B	14 280	10 710	7 140	3 570	0
2	C	0	0	0	0	0
3	D	64 908	0	0	0	0
4	E	186 156	0	0	0	0
5	F	73 128	54 846	0	0	0
6	G	0	0	0	0	0
7	H	228 420	0	0	0	0
8	I	74 052	0	0	0	0
9	J	0	0	0	0	0
10	K	0	0	0	0	0
11	L	75 312	0	0	0	0
12	M	38 016	25 344	0	0	0
13	N	121 752	81 168	0	0	0
14	Z	304 841	203 227	0	0	0
15	ZZ	281 497	0	0	0	0

假设 A 发电厂综合考虑两轮竞价的的风险及收益，以第一轮中标电量为最大可申报电量的 60%，第二轮中标电量为最大可申报电量的 40% 作为理想的中标期望，则第一轮 A 发电厂的理想申报电量为 19 520 万 kW·h，考虑网损系数的影响，其理想申报电价为 215 元/MW·h。由此，模拟得出 A 发电厂在本轮竞价的理想报价点(19 520 万 kW·h，215 元/MW·h)。

2) A 发电厂竞价分段及主观概率判断。

根据模拟得出的市场出清价，并综合考虑市场的基准电价 204.723 元/MW·h、最高限价 307.085 元/MW·h、最低限价 102.362 元/MW·h 以及电厂的单位发电平均成本，A 发电厂可以形成自己的电价中标概率主观判断。假设此处为：第 1 段申报电价为 180 元/MW·h 时其中标可能性为 95%，第 2 段申报电价为 190 元/MW·h 时中标可能性为 90%，第 3 段申报电价为 200 元/MW·h 时中标可能性为 70%，第 4 段申报电价为 210 元/MW·h 时中标可能性为 50%，第 5 段申报电价为 215 元/MW·h 时中标可能性为 30%。

3) A 发电厂最优申报电量求解。

A 发电厂本轮的理想中标电量为 19 520 万 kW·h，A 发电厂形成自己的电量中标概率主观判断为假设中标电量为 3 000 万 kW·h 的可能性不小于 90%，中标电量为 4 000 万 kW·h 的可能性不小于 85%，中标电量为 5 000 万 kW·h 的可能性不小于 75%，中标电量为 6 500 万 kW·h 的可能性不小于 60%，中标电量为 10 000 万 kW·h 的可能性不小于 40%，中标电量为 15 000 万 kW·h 的可能性不小于 20%。

将数据带入式(12)可得:

$$\begin{aligned} \max[E(f)] &= 171Q_1 + 171Q_2 + 140Q_3 + 105Q_4 + 64.5Q_5 \\ \text{s.t.} &\begin{cases} 15\,000 \leq Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \leq 19\,520 \\ Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \geq 10\,000 \\ Q_1 + Q_2 \geq 5\,000 \\ 1\,952 \leq Q_i \leq 19\,520, \quad i=1,2,\dots,5 \end{cases} \end{aligned}$$

采用单纯形法求解此线性优化问题,第1段至第5段申报电量分别为5856、5856、1952、1952、1952万kW·h。

那么,本次报价的最终投标如表2所示,其中电量单位为万kW·h,电价单位为元/MW·h,

表2 A电厂考虑报价经验的报价

Tab. 2 Bidding based on bidder's experience of plant A

分段	申报电价/(元/MW·h)	申报电量/(万 kW·h)
第1段	180	5856
第2段	190	5856
第3段	200	1952
第4段	210	1952
第5段	215	1952

此处做对比分析,最终市场出清价为205元/MW·h,当不采取本文所述及的竞价策略而是通过申报电量为理想申报电量的五段均分,申报电价与本文所述模型相同的竞价策略来申报,即:第1段是(3904, 180),第2段是(3904, 190),第3段是(3904, 200),第4段是(3904, 210),第5段是(3904, 215)。其中电量单位为万kW·h,电价单位为元/MW·h,则考虑报价经验的竞价策略的收益为2557.12万元,申报电量五段均分的报价策略收益为2225.28万元,可见考虑报价经验的竞价模型能为企业带来更大的利益。

#### 4) 主观概率判断的调整。

市场出清价为205元/MW·h,则A发电厂本次竞价对各个主观概率的调整如下:

未引入信心指数时,代入式(13)得 $\Delta p(P_{MCP1}) = (1-0.95) \times (1-0.5) = 0.025$ ,其中 $c=1/2=0.5$ ,是由于只进行了1次报价。

同理可得 $\Delta p(P_{MCP2})=0.10$ ,  $\Delta p(P_{MCP3})=0.15$ ,  $\Delta p(P_{MCP4})=-0.25$ ,  $\Delta p(P_{MCP5})=-0.15$ 。

那么下一次各段报价的主观概率 $p_{\text{next}}$ 为 $p_{\text{next}}(P_{MCP1})=0.95+0.25=0.975$ 。

同理 $p_{\text{next}}(P_{MCP2})=0.9$ ,  $p_{\text{next}}(P_{MCP3})=0.85$ ,  $p_{\text{next}}(P_{MCP4})=0.25$ ,  $p_{\text{next}}(P_{MCP5})=0.15$ 。

当形成信心指数 $\rho$ 对应各段报价分别为1、1、1、0.5、2时,代入式(14)则主观概率的调整为 $\Delta p(P_{MCP1}) = 1 \times (1-0.95) \times (1-0.5) / 0.5 + 1 \times (1-0.5) = 0.025$ ,

同理可得,  $\Delta p(P_{MCP2})=0.10$ ,  $\Delta p(P_{MCP3})=0.15$ ,  $\Delta p(P_{MCP4})=-0.17$ ,  $\Delta p(P_{MCP5})=-0.20$ 。

那么下一次各段报价的主观概率为 $p_{\text{next}}(P_{MCP1})=0.975$ , 同理 $p_{\text{next}}(P_{MCP2})=0.90$ ,  $p_{\text{next}}(P_{MCP3})=0.85$ ,  $p_{\text{next}}(P_{MCP4})=0.33$ ,  $p_{\text{next}}(P_{MCP5})=0.10$ 。

从结果可以看出,当引入信心指数时能够很好地表达报价人员对于已经做出的概率判断的信心。当信心强时,原来所作的判断调整小,当信心弱时,需要做出较大的调整。将主观概率判断演进引入到报价中标的估计中,既可以对初始概率判断的正确做出积极的认定,也可以对判断失误作出修改。

本文仅以东北区域电力市场年度报价的竞价结果为例,说明了主观概率判断演进用于发电企业分段竞价策略的运用框架。当下一次报价时,发电企业可以调整上次竞价的影响,从而动态跟踪竞价产生的关键信息,实现自身收益的最大化。

## 4 结论

本文首先回顾了电力市场环境中发电商的竞价策略的4类方法,然后提出一种考虑报价经验的竞价策略模型。该模型包含4个方面的工作:1)寻求理想报价点,通过模拟市场出清法和估计竞争对手报价来实现;2)考虑报价经验的报价分段以及主观概率估计;3)求出最优竞价电量;4)对形成的初始概率估计进行调整。最后用案例对该报价策略方法进行了验证。由于该方法能够对初始主观概率做增加和减少的双向调整,从而实现对原来决策行为的改进,因而具有很强的可操作性和实用性,结果的有效性和精度还有赖于市场未来的数据积累以及进一步的研究。

## 参考文献

- [1] 李涛, 蒋传文, 侯志俭. 发电侧电力市场的成本报价模型[J]. 水电能源科学, 2001, 19(3): 62-63.  
Li Tao, Jiang Chuanwen, Hou Zhijian. A cost offer model on the generation side of power market[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2001, 19(3): 62-63(in Chinese).
- [2] 周建平, 周浩. 电力市场竞价策略探讨[J]. 中国电力, 2001, 34(3): 8-10.  
Zhou Jianping, Zhou Hao. Preliminary study on bidding strategy for electricity market[J]. Electric Power of China, 2001, 34(3): 8-10(in Chinese).
- [3] Batlle C, Barquin J. A strategic production costing model for electricity market price analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 67-74.
- [4] Reneses J, Centeno E, Barquin J. Medium-term marginal costs in competitive generation power markets[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(5): 604-610.

- [5] Conejo A J, Nogales E J, Arroyo J M. Price-taker bidding strategy under price uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4): 1081-1088.
- [6] Liu Youfei, Wu F F. Generator bidding in oligopolistic electricity markets using optimal control: fundamentals and application[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1050-1061.
- [7] Plazas M A, Conejo A J, Prieto F J. Multimarket optimal bidding for a power producer[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 2041-2050.
- [8] 雷兵, 王秀丽, 高英, 等. 独立发电商在日前市场的竞价策略分析[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 8-14.  
Lei Bing, Wang Xiuli, Gao Ying, et al. Analysis on bidding strategy of independent power producer in days-ahead market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 8-14(in Chinese).
- [9] Wen F S, David A K. Optimal bidding strategies and modeling of imperfect information among competitive generators[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2001, 16(1): 15-21.
- [10] Kang D J, Kim B H, Hur D. Supplier bidding strategy based on non-cooperative game theory concepts in single auction power pools[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(5-6): 630-636.
- [11] Wei J Y, Smeers Y. Spatial oligopolistic electricity models with cournot generators and regulated transmission prices[J]. Operations Research, 1999, 47(1): 102-112.
- [12] Benjamin F H. Linear complementarity models of nash-cournot competition in bilateral and POOLCO power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(2): 194-202.
- [13] 王鹏, 徐东杰, 王雪冬, 等. 强外力骚扰下电力系统脆弱性评估与防护问题初探[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(1): 14-18.  
Wang Peng, Xu Dongjie, Wang Xuedong, et al. Preliminary research on vulnerability evaluation and safeguard of power system under external force harassment[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(1): 14-18(in Chinese).
- [14] 张鹏, 王守相, 王海珍. 配电系统可靠性评估的改进区间分析方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 50-55.  
Zhang Peng, Wang Shouxiang, Wang Haizhen. An improved interval method applied to large scale distribution system reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 50-55(in Chinese).
- [15] 张永伍, 余贻鑫, 严雪飞. 基于区间算法和范例学习的配电网网架规划[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 40-44.  
Zhang Yongwu, Yu Yixin, Yan Xuefei. Distribution network planning based on interval algorithm and paradigm learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 40-44(in Chinese).
- [16] 黄涛. 主观概率判断的演进[J]. 数量经济技术经济研究, 1998(5): 45-50.  
Huang Tao. The evolution of subjective probability judgment[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 1998(5): 45-50(in Chinese).
- [17] 国家电力监管委员会. 东北区域电力市场初期运营规则[R]. 北京: 电监供电[2003]54号, 2003.
- [18] 国家电力监管委员会. 东北区域电力市场实施方案[R]. 北京: 电监供电[2003]55号, 2003.
- [19] 郑华, 谢莉, 张粒子, 等. 系统边际价格概率分布的实证分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 43-47.  
Zheng Hua, Xie Li, Zhang Lizi, et al. Positivism analysis on the probability distribution of system marginal price[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 43-47(in Chinese).
- [20] 刘西陲, 沈炯, 李益国. 系统边际电价概率分布检验及模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 72-77.  
Liu Xichui, Shen Jiong, Li Yiguo. Study on probability distribution and model of system marginal price[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 72-77(in Chinese).



陈永权

收稿日期: 2009-08-06。

作者简介:

陈永权(1971—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事电力经济、信息技术及智能理论的研究, yqc@vip.163.com;

肖湘宁(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力电子方面的研究, xxnylp@public.bta.net.cn;

宋永华(1964—), 男, 教授, 英国皇家工程院院士, 主要从事智能电网方面的研究, yhsong@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 刘浩芳)