

发电企业参与大用户直购电的博弈报价模型研究

刘立华¹ 杨铁峰¹ 白 阳²

(1.朝阳燕山湖发电有限公司, 辽宁 朝阳 122000; 2.沈阳浦澳玛特科技有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 大用户直购电是新一轮电力体制改革的突破口, 发电企业与大用户间的价格博弈将成为直购电交易的重点。文章分析了影响发电企业报价的主要因素, 研究了以报价平衡点为基础的博弈策略, 并提出了更简易的最优报价模型, 算例结果表明最优报价更接近于实际报价, 从而验证了所建立的模型为发电企业参与直购电交易的竞争报价提供了参考依据。

关键词: 大用户直购电; 博弈论; 报价模型; 发电企业; 电力体制改革 **文献标识码:** A

中图分类号: F224 **文章编号:** 1009-2374 (2017) 02-0157-03 **DOI:** 10.13535/j.cnki.11-4406/n.2017.02.076

1 概述

大用户直购电是指终端购电大用户直接与发电企业进行双边购售电合同的签订, 电力购销交易在两者之间直接开展。2015年, 国务院《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》的出台加快了推进以大用户直购为先导的输配电价改革和售电侧放开等改革举措。作为新一轮电力体制改革的突破口, 大用户直购电已成为各方共识。

由于电能本身的特点所导致的电力交易市场中的电价波动, 直购电将给发电企业带来不同的机遇和挑战。一方面, 对于发电企业来说, 直购电方式不仅在很大程度上解除了市场煤、计划电这一长期制约其经营发展的枷锁, 而且提供给企业更多的经营自主权, 激发了其发电的积极性; 另一方面, 电力市场的作用越发突显, 电力供应过剩的局面对于发电企业来说是严峻的, 发电企业不仅要考虑节能、降低成本、提高生产效率等措施提升自身的竞争实力, 而且在用电量增长乏力的形势下, 发电企业必须面对一个重要问题, 即如何以合适的价格竞得尽可能多的交易电量。总之, 发电企业与大用户之间的价格博弈将成为直购电交易的重点。如果发电企业可以掌握市场未来电价的变化, 利用预测的电价制定合理的报价策略, 那么该企业不仅能在电力交易市场中标, 还可以最大程度获取利润。这对于发电企业的发展有着十分重要的现实意义。

目前, 国内外关于发电侧报价策略已有比较多的理论成果, 主要包括根据发电企业成本进行报价的成本分析方法、预测市场出清价格的方法、基于博弈论的方法。其中, 利用博弈论方法进行报价, 其模拟方法更为实用, 模拟结果也能更接近实际。但是, 在实际电力市场中, 一些不确定性信息难以获取, 比如竞争对手的报价数据。同时, 多人博弈模型的理论及算法研究还不成熟。如何预估竞争对手的报价数据及竞价倾向, 并选择可行有效的博弈模型值得深入探讨, 参考文献[6]采用不完全信息, 通过双人静态博弈方法对直购电的报价模型进行了相关研究。

本文运用“报价平衡点”的概念, 以利润最大化为目标, 对参考文献[6]的博弈论模型进行分析简化, 建立基于博弈论的简易报价模型, 该模型得到的最优报价策略简单易行, 而且算例结果表明最优报价与发电企业实际报价较为吻合, 可以为发电企业参与直购电交易的竞争报价策略提供一个重要参考依据。

2 发电企业报价的影响因素分析

影响发电企业报价的因素有很多, 主要分为发电企业自身因素、电力市场因素。

2.1 自身主要因素

运营成本。发电企业的经营效益与其运营成本息息相关。发电企业的运营成本包括固定成本和可变成本。固定成本是指与电能产量无直接关系的费用, 包括材料费、工资福利、基本折旧费、大修理费等费用。可变成本指与电能产量有直接关系的费用, 包括燃料费、购入电力费和用水费等费用。发电企业运营成本越低, 在直购电中的降价能力越强。

单位发电利润。在批复电价一定的情况下, 批复电价与单位发电成本的差额即为单位发电利润。单位发电利润越高, 在直购电中的降价能力越强。

2.2 电力市场主要因素

电力供需形势。在我国经济新常态下, 电力生产消费呈现出电力供应结构持续优化、电力消费增长减速换挡的新常态特征。电力供需形势由偏紧转为宽松态势。面对电力供需新形势, 发电企业参与大用户直购及降价积极性会上升。

发电容量的扣除机制。电监市场[2009]50号规定“取得直接交易资格的发电企业, 合同期限内按照签订的合同电量剔除相应的发电容量, 电力调度机构不再对这部分剔除容量分配计划电量”。我国一些省份发布的直接交易规则中, 也给出了具体的容量扣除方法。发电企业参与直购电过程中, 按比例折算抵扣的计划电量, 可计算出发电企业利润平衡点。将该预测结果作为报价区间下限, 保证发电企业在直购电交易中有盈余, 因此

电量抵扣方式对发电企业报价有重要影响。

其他发电企业的报价。参与直购电的发电企业共同竞争大用户的直购电市场，其他发电企业的报价也将影响某发电企业的报价。如果能有效预估竞争对手出价，将提高发电企业成交的概率。有些发电企业会通过降低报价寻求更大的成交可能性，还有些发电企业以牺牲成交几率为代价寻求更大的利润空间，因此发电企业在报价时还要考虑竞争对手的竞价倾向。

直购电交易的历史经验。对于以往大用户直购交易情况，包括电力市场最终电价平衡点以及报价让利的幅度等，发电企业会有比较清晰的了解。直购电交易的历史经验对于发电企业的报价预测有重要的借鉴意义。

3 发电企业参与直购电交易的博弈报价模型设计

3.1 报价模型分析

根据大用户直购电某试点的实际情况，直购电市场交易的一般规则如下：市场主体由用电电压等级在110千伏及以上且年用电量不小于5000万千瓦时的工业用户以及单机容量30万千瓦及以上的火电企业构成。交易价格由电度电价和基本电价构成，其中，电度电价包括直接交易价格、电网输配电价、政府性基金和附加。交易方式以双边交易为主，撮合竞价交易为辅。

通过上文的分析，影响发电企业报价的因素主要有固定成本和可变成本、国家批复电价及其他发电企业的报价等。另外，发电企业在参与直购电交易时，会考虑以降低报价为代价消纳更多发电量，但若无法获得预期收益，该企业将不参与直购电，即存在报价平衡点。因此，设计报价策略时，既要考虑上述因素，也要考虑报价平衡点。

设计报价模型的总体思路如下：分析发电企业的报价基础，即使发电企业获取更多利润的报价平衡点；以获利最大化为目标，考虑发电成本、批复电价、竞争对手报价，建立最优博弈报价模型，得到发电企业的模拟报价。

3.2 报价平衡点模型

根据发电容量的扣除机制，发电企业在获得一部分直购电量的同时，也会损失一部分计划电量，因此发电企业参与大用户直购电存在报价平衡点。这个平衡点关系到发电企业是否参与直购竞价，竞价若高于报价平衡点，发电企业才有参与直购竞价的积极性。反之，若成交价格低于报价平衡点，则参与大用户直购并不能为发电企业增加利润，因此发电企业的报价一般略高于报价平衡点。报价平衡点即发电企业不参与直购电利润和参与直购电利润之间的利润差为0的报价。报价平衡点模型需要的参数见表1：

表1 报价平衡点模型参数表

参数	含义
L	发电企业不参与直购竞价的利润（单位：元）
L_1	发电企业参与直购竞价的利润（单位：元）
Q	发电企业上网电量（单位：千瓦时）
Q_1	发电企业参与直购的上网电量（单位：千瓦时）
λ	国家为鼓励发电企业参与直购而规定的参与直购电量抵扣和计划电量的比例系数

$P_{\text{标}}$	标杆电价（批复电价）（单位：元/千瓦时）
$P_{\text{降}}$	发电企业参与直购的降价（单位：元/千瓦时）
$C_{\text{变}}$	发电企业单位变动成本（单位：元/千瓦时）
$C_{\text{固}}$	发电企业固定成本（单位：元）
$P_{\text{平}}$	发电企业参与直购的报价平衡点（单位：元/千瓦时）

报价平衡点的计算过程如下：

发电企业不参与直购的利润计算公式为：

$$L = Q(P_{\text{标}} - C_{\text{变}}) - C_{\text{固}} \quad (1)$$

发电企业降价（降价 $P_{\text{降}}$ 元/千瓦时）参与直购，降价造成的损失由抵扣电量得到弥补，因此得到参与直购后的利润计算公式为：

$$L_1 = Q_1(P_{\text{标}} - C_{\text{变}} - P_{\text{降}}) + (Q - Q_1)(P_{\text{标}} - C_{\text{变}}) + (1 - \lambda)Q_1(P_{\text{标}} - C_{\text{变}}) - C_{\text{固}} \quad (2)$$

$$= Q_1(P_{\text{标}} - C_{\text{变}} - P_{\text{降}}) + (Q - \lambda Q_1)(P_{\text{标}} - C_{\text{变}}) - C_{\text{固}}$$

从而利润差为：

$$\Delta L = L_1 - L = Q_1[(1 - \lambda)(P_{\text{标}} - C_{\text{变}} - P_{\text{降}}) - \lambda P_{\text{降}}] \quad (3)$$

令 $\Delta L = 0$ ，可得 $P_{\text{降}} = (1 - \lambda)(P_{\text{标}} - C_{\text{变}})$ 。

发电企业的报价平衡点为：

$$P_{\text{平}} = P_{\text{标}} - P_{\text{降}} = \lambda P_{\text{标}} + (1 - \lambda)C_{\text{变}} \quad (4)$$

3.3 发电企业参与直购电报价的双人博弈模型

模型假设与分析：假设发电企业 i 与竞争对手发电企业 j 竞标某大用户 Q_1 电量。采用一轮报价竞价方式。发电企业的机组容量和大用户 Q_1 电量是公有信息，发电企业竞价报价是私有信息。

双人博弈竞标游戏规则：报价低者得所有电量；报价相等均分电量。

双人博弈模型需要的参数见表2：

表2 博弈模型参数表

参数	含义
F, F'	发电企业 i, j 的报价（单位：元/千瓦时）
$P_{\text{降}}, P_{\text{降}}'$	发电企业 i, j 的参与直购降价（单位：元/千瓦时）
x, x'	发电企业 i, j 的降价系数
$P_{\text{平}}, P_{\text{平}}'$	发电企业 i, j 的报价平衡点（单位：元/千瓦时）
$C_{\text{变}}, C_{\text{变}}'$	发电企业 i, j 的单位变动成本（单位：元/千瓦时）

假设发电企业降价 $P_{\text{降}}$ 参与直购竞价，即报价为：

$$F = P_{\text{标}} - P_{\text{降}} \quad (5)$$

建模分析：

发电企业 i 参与直购报价的报价区间为 $F \in [P_{\text{平}}, P_{\text{标}}]$ ，其中 $P_{\text{平}} = \lambda P_{\text{标}} + (1 - \lambda)C_{\text{变}}$ ，发电企业的利润空间为 $P_{\text{标}} - P_{\text{平}} = (1 - \lambda)(P_{\text{标}} - C_{\text{变}})$ 。

受平衡点报价公式启发，假设发电企业 i 参与直购报价的报价公式为：

$$F = xP_{\text{标}} + (1 - x)C_{\text{变}}, \quad x \in [\lambda, 1] \quad (6)$$

$x \in [\lambda, 1]$ 为报价系数， $x = \lambda$ 时的最低报价为报价平衡点； $x = 1$ 时的最高报价为标杆电价。把式 (5) 代入式 (6) 可得：

$$P_{\text{降}} = (1 - x)(P_{\text{标}} - C_{\text{变}}) = \frac{1 - x}{1 - \lambda}(P_{\text{标}} - P_{\text{平}}) \quad (7)$$

式 (7) 也表示发电企业 i 参与直购降价与发电企业利润空间成正比，比例系数为 $k = \frac{1 - x}{1 - \lambda}$ ， $k \in [0, 1]$ 。参考文献 [6] 也是以“发电企业参与直购降价与发电企业利润空间成正比”为基本假设建立竞价模型，本文在比例系数上稍作变化，简化了后续优化计算过程。

把式 (7) 代入式 (3)，得到发电企业参与直购的利润差为：

$$\Delta L = Q_i(x - \lambda)(P_{\text{标}} - C_{\text{变}}) \quad (8)$$

模型的优化目标为在有发电企业j参与竞标的情形下，利润差的数学期望最大化，即：

$$\arg \max_x E(\Delta L) \quad (9)$$

模型求解：

由博弈论规则，发电企业i竞价获得的直购电量依据报价低者得所有电量；报价相等均分电量，即：

$$\Delta L = \begin{cases} Q_i(x - \lambda)(P_{\text{标}} - C_{\text{变}}), & \text{当 } F < F', \\ \frac{1}{2} Q_i(x - \lambda)(P_{\text{标}} - C_{\text{变}}), & \text{当 } F = F', \\ 0, & \text{当 } F > F'. \end{cases} \quad (10)$$

用 $P(F_i < F_j)$ 、 $P(F_i = F_j)$ 表示相关概率，则利润差的数学期望为：

$$E(\Delta L) = Q_i(x - \lambda)(P_{\text{标}} - C_{\text{变}})[P(F < F') + \frac{1}{2}P(F = F')] \quad (11)$$

以下估计相关概率：

发电企业j的报价区间 $F' \in [P_{\text{平}}', P_{\text{标}}']$ ，条件 $F < F'$ 的可行区间为 $[F, F']$ ，则 $P(F < F') = \frac{F' - F}{P_{\text{标}} - P_{\text{平}}'}$ 。由于随机变量是连续分布函数， $P(F_i = F_j) = 0$ 。

式(11)化为：

$$E(\Delta L) = Q_i(x - \lambda)(P_{\text{标}} - C_{\text{变}}) \frac{F' - F}{P_{\text{标}} - P_{\text{平}}'} \quad (12)$$

令 $\frac{d(E(\Delta L))}{dx} = 0$ ，注意到 $\frac{dF}{dx} = P_{\text{标}} - C_{\text{变}}$ ，计算可得使 $E(\Delta L)$ 取最大值的 x 的解为：

$$x_0 = \frac{F' - C_{\text{变}} + \lambda(P_{\text{标}} - C_{\text{变}})}{2(P_{\text{标}} - C_{\text{变}})} \quad (13)$$

代入式(6)可得发电企业i的最优竞价报价为：

$$F_0 = \frac{F' + P_{\text{平}}'}{2} \quad (14)$$

即发电企业i的最优报价策略为竞争对手报价和平衡点报价的平均值。

参考文献[6]考虑了历史直购经验和供需形式，在竞价系数 x 上乘了2个常数因子 k_1 和 k_2 。其实从数学角度看，对优化模型在变量 x 上乘以常数是没必要的，去掉常数不影响优化结果，而且使模型计算过程变得简单。

4 实际算例

为方便比较计算结果，本文采用参考文献[6]中的数据。具体数据如下：某省某发电企业2014年四季度入炉综合标煤单价为690元/吨，供电标准煤耗为314克/千瓦时，2015年一季度入炉综合标煤单价为660元/吨。其单位成本为0.3003元/千瓦时，单位燃煤成本约为0.2009元/千瓦时，单位固定成本约为0.0994元/千瓦时。政府批复电价为0.4416元。目前该省规定直购电按双交易成交量的85%抵扣一般电量，因此， $\lambda=0.85$ 。单位变动成本与单位燃煤成本近似，其可变成本约为 $C_{\text{变}}=0.2079$ 元/千瓦时，代入式(4)计算可得报价平衡点 $P_{\text{平}}=0.4065$ 元/千瓦时。

估计竞价对手企业j的可能报价估计值 $E(F')$ ，其中 $F' = x'P_{\text{标}} + (1-x')C_{\text{变}}'$ ， $x' \in [\lambda, 1]$ ，由参考文献[6]知竞争对手企业j的可变成本 $C_{\text{变}}'$ 服从 $[0.1914, 0.2244]$ （单位元/千瓦

时）上的均匀分布，因此 $E(C_{\text{变}}') = 0.2918$ 元/千瓦时；竞争对手企业的报价系数 $x' \in [\lambda, 1]$ ，则 $E(x') = \frac{\lambda+1}{2} = 0.925$ ，从而可得 $E(F') = E(x')P_{\text{标}} + [1 - E(x')]C_{\text{变}}' = 0.4250$ 元/千瓦时。

把以上数据代入最优竞价式(14)，计算得到发电企业i的最优报价 $F_0 = \frac{E(F') + P_{\text{平}}}{2} = 0.4157$ 元/千瓦时。参考文献[6]计算的 $F_0 = 0.4148$ 元/千瓦时，且该企业的实际交易竞价为0.4200元/千瓦时。计算结果表明最优报价接近该企业的实际交易竞价，可以作为企业竞价的参考依据。

5 结语

随着新电改的不断推进，大用户直购电已受到电力市场中各参与主体的高度重视。电价是整个电力市场的支点，其变化将影响各参与主体的市场行为。本文从报价平衡点概念出发，以发电企业获利最大化为目标，提出了一个基于博弈论的简易报价模型，从而得到发电企业参与直购电的模拟报价。通过实际算例计算，结果表明本模型简单易行，能更准确地反映发电企业的真实报价，为发电企业的报价预测提供了重要的参考价值。

参考文献

- [1] 刘鹏飞. 大用户直购电交易若干关键问题研究[J]. 中国高新技术企业, 2016, (22).
- [2] 夏清, 白杨, 钟海旺, 等. 中国推广大用户直购电交易的制度设计与建议[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20).
- [3] 于亚男, 江全元, 张维, 等. 大用户直购电市场风险评估设计及政策影响分析[J]. 能源工程, 2016, (4).
- [4] 丁建林. 新电改对发电企业的冲击[J]. 企业改革与管理, 2015, (20).
- [5] 冯义军. 陈宗法发电企业可能重新洗牌[J]. 广西电力, 2015, (3).
- [6] 于亚男. 大用户直购电的交易模拟及风险分析方法研究[D]. 浙江大学, 2016.
- [7] 谷志红. 大唐耒阳发电厂建设项目生产及财务后评价研究[D]. 华北电力大学, 2005.
- [8] 中国电力企业联合会. 2016年度全国电力供需形势分析预测报告[N]. 中国电力报, 2016-02-04.
- [9] 山东能源监管办. 山东省电力用户与发电企业直接交易规则(2015年修订版)[S]. 2015.
- [10] 江苏能源监管办. 江苏省电力用户与发电企业直接交易试点暂行办法[S]. 2014.
- [11] 浙江省经济和信息化委员会. 浙江省电力用户与发电企业直接交易试点实施方案(试行)[S]. 2014.

作者简介：刘立华(1977-)，男，内蒙古赤峰人，朝阳燕山湖发电有限公司高级工程师，研究方向：热能与动力。

(责任编辑：周琼)