

当量定价机制下发电商的产量决策分析与比较

李玉平¹, 李晓刚², 言茂松³

(1. 上海大学 经济系, 上海 201800; 2. 华东电力培训中心,

上海 200438; 3. 上海大学 自动化系, 上海 200072)

摘要: 分析了当量定价机制下发电商的最优产量决策, 比较了当量电价、统一出清和按报价支付 3 种定价机制对发电商的产量决策的激励作用。指出在统一出清和按报价支付定价机制下, 发电商会通过持留行为滥用市场力, 而在当量电价下, 尤其在缺电情况下, 发电商的最优产量决策仍然是申报其最大可用容量, 而不是持留发电容量。当量定价方法激励发电商申报全部容量的机制, 可以保证电力市场的充裕容量, 从而实现了电价乃至市场的稳健性。

关键词: 电力市场; 报价策略; 持留; 统一出清电价; 当量电价

中图分类号: F 123.9

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)09-0012-04

0 引言

在电力市场的竞价上网中, 对发电商而言有 2 类决策问题, 即价格决策和产量决策。相对应的发电商行使市场力的行为通常有 2 大类, 即报高价和持留发电容量, 通俗而言就是“哄抬物价”和“囤积居奇”。在实际电力市场的运作中, 前者由于特征明显, 易于监管, 而发电商持留容量行为由于其隐蔽性, 在实际操作中难以发现和监管, 但其造成的危害性往往要大于前者。经济学理论指出: 在寡头垄断的市场上, 寡头垄断者往往通过限制产量抬高物价, 获取超额利润, 最终损害市场效率。由于电力市场接近区域寡头垄断市场, 因而发电商会采取限制产量的持留(withholding)策略以获取超额利润^[1]。即发电商在报价时有意少报部分可用容量, 其主要表现形式包括: 谎称设备不能使用或部分不能使用; 有意不恰当地安排检修; 不申报发电或不发电。

目前, 实际运营的电力市场中大多采用基于统一出清定价 UCP(Uniform Clearing Pricing)原理的竞价机制, 在该电价体系下, 边际机组以下的发电商可以通过持留一部分发电容量, 使原先在最优发电序列以外的高价发电单元进入发电序列, 同时抬高边际电价; 当持留容量获得的超额利润大于因持留容量而少发电所损失的利润时, 发电商就会采取持留容量策略^[2]。其实质是 UCP 电价下, 部分发电商的最优产量决策是持留发电容量。这会人为造成电力供应紧张、电价飞升等诸多严重危害, 2000 年至 2001 年美国加州电力危机在某种程度上就是由于发电商持留容量策略造成的^[3-5]。

由于在实行 UCP 电价的市场中, 发电商采用持

留容量策略会使其获利最大化, 因而在该电价机制下无法从根本上避免其采取持留容量策略。必须有一种新的定价机制, 在该定价机制下, 发电商采取持留容量策略, 其利益不会最大化, 即该定价机制下, 发电商的最优产量策略是申报全部发电容量。文献[6-8]给出的当量电价 EVE(Electricity Value Equivalent)理论为此进行了有益的探索。加州电力危机之后, 有部分电力工业学者和政府官员也曾建议采用按报价支付 PAB(Pay-As-Bid)定价方法。但对该定价方法理论和实践的探索都不理想^[9-10]。本文将分析当量电价下发电商的产量决策, 初步分析当量电价抑制发电商持留容量行为的内在机理, 并与 UCP 和 PAB 机制进行比较。

1 当量电价下发电商的产量决策

下面将分析当量电价下发电商的产量决策。发电单元 i 向电力交易中心上报运行成本报价 b_i 和可用发电容量 P_i , 电力交易中心按照当量电价原理^[7]确定发电单元加载位置和上网电价。如图 1 所示进行一些假设。

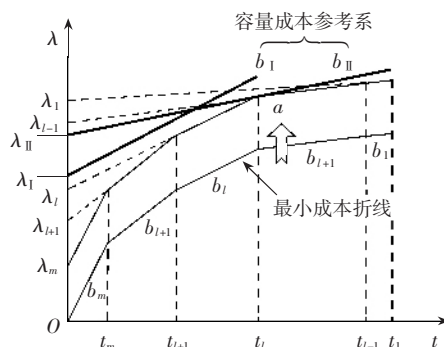


图 1 当量电价法的说明

Fig.1 Illustration of EVE pricing method

a. 发电单元的加载顺序为

$$1, 2, 3, \dots, l-1, l, l+1, \dots, m-1, m$$

其中, m 为边际机组, l 为切点机组。

b. $0 < t_m \leq t_{m-1} \leq \dots \leq t_{l+1} \leq t_l \leq t_{l-1} \leq \dots \leq t_2 \leq t_1$, t_l 为最小成本折线与容量成本参考系切点的横坐标, 即为切点机组的日利用小时数。容量成本参考系在成本平面上形成了一个上边界, 最小成本折线整体向上平移, 直到与容量成本参考系相切为止, 图中 a 是切点。

忽略容量效益项(该项很小, 忽略不影响分析结果^[7]), 则发电单元 i 的上网电价为

$$p_i = \lambda_i / t_i + \begin{cases} \frac{\lambda_j + b_j t_l}{t_i} - \frac{1}{t_i} \sum_{k=l}^{i-1} b_k (t_k - t_{k+1}) & i > l \\ \frac{\lambda_j + b_j t_l}{t_i} & i = l \\ \frac{\lambda_j + b_j t_l}{t_i} + b_i (1 - \frac{t_{l+1}}{t_i}) & i = l-1 \\ \frac{\lambda_j + b_j t_l}{t_i} + b_i (1 - \frac{t_{l+1}}{t_i}) + \frac{1}{t_i} \sum_{k=i+1}^{l-1} b_k (t_k - t_{k+1}) & i < l-1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\lambda_i = \begin{cases} \lambda_j + b_j t_l - (\sum_{k=l}^i b_k t_k - \sum_{k=l}^{i-1} b_k t_{k+1}) & i > l \\ \lambda_j + b_j t_l - b_i t_i & i = l \\ \lambda_j + b_j t_l - b_i t_{i+1} & i = l-1 \\ \lambda_j + b_j t_l + \sum_{k=i+1}^{l-1} b_k t_k - \sum_{k=i}^{l-1} b_k t_{k+1} & i < l-1 \end{cases} \quad (2)$$

其中 λ_j 和 b_j 是与最小成本折线相切的容量成本参考系的直线方程的参数。则发电商的收益为

$$\pi_i = P_i (p_i - b_i) t_i = P_i \lambda_i \quad (3)$$

设 t_i^0 与 λ_i^0 分别为 $P_i = P_i^{\max}$ 时, 发电机组 i 的利用小时数和影子容量成本, 下面求使 π_i 最大的最优产量决策 P_i^* 。

当 $P_i = P_i^{\max}$ 时

$$\pi_i^0 = P_i^{\max} \lambda_i^0 \quad (4)$$

$$\forall P_i = P_i^x \in (0, P_i^{\max}] \quad (5)$$

设在进行产量决策的同时不进行价格决策, 即发电商的申报价格保持不变, 则发电单元的加载位置始终为 $1, 2, 3, \dots, l-1, l, l+1, \dots, m-1, m$ 。

当 $i \geq l$, 即发电单元 i 的加载位置在切点机组以后, 则 $t_i^x = t_i^0$, $\lambda_i^x = \lambda_i^0$ 。

$$\pi_i^x = P_i^x \lambda_i^0 \quad (6)$$

由于 $P_i^x \leq P_i^{\max}$, 则 $\pi_i^x \leq \pi_i^0$ 。

当 $P_i^x = P_i^{\max}$ 时

$$\pi_i^x = \pi_i^0 = \max_{P_i^x} (\pi_i^x) \quad (7)$$

即此时发电商的最优决策是上报所有发电容量。

当 $i \leq l$, 即发电单元 i 的加载位置在切点机组以前, 则 $t_i^x = t_i^0$ 。

$$t_k^x \geq t_k^0 \quad k \geq i+1 \quad (8)$$

$$\lambda_i^x = \lambda_j + b_j t_l^x - b_i t_{l+1}^x + \sum_{k=i+1}^{l-1} b_k (t_k^x - t_{k+1}^x) \quad (9)$$

$$\pi_i^x = P_i^x \lambda_i^x \quad (10)$$

$$\pi_i^x - \pi_i^0 = P_i^x \lambda_i^x - P_i^0 \lambda_i^0 = P_i^x [\lambda_j + \sum_{k=i+1}^{l-1} b_k (t_k^x - t_{k+1}^x)] + P_i^x (b_j t_l^x - b_i t_{l+1}^x) - P_i^{\max} [\lambda_j + \sum_{k=i+1}^{l-1} b_k (t_k^0 - t_{k+1}^0)] - P_i^0 (b_j t_l^0 - b_i t_{l+1}^0) \quad (11)$$

在近似情况下有

$$t_k^0 - t_{k+1}^0 = t_k^x - t_{k+1}^x = \frac{P_i^{\max} - P_i^x}{P_i^{\max}} t_i^0 \quad (12)$$

$$t_l^0 - t_{l+1}^0 = t_l^x - t_{l+1}^x = (l-i-1) \frac{P_i^{\max} - P_i^x}{P_i^{\max}} t_i^0 \quad (13)$$

则

$$\pi_i^x - \pi_i^0 = (P_i^x - P_i^0) \left[\lambda_j + \sum_{k=i+1}^l b_k \left(\frac{P_i^{\max} - P_i^0}{P_i^{\max}} \right) t_l^0 \right] + b_j (P_i^x t_l^x - P_i^0 t_l^0) - b_i (P_i^x t_{l+1}^x - P_i^0 t_{l+1}^0) \quad (14)$$

易知

$$b_j (P_i^x t_l^x - P_i^0 t_l^0) - b_i (P_i^x t_{l+1}^x - P_i^0 t_{l+1}^0) \rightarrow 0 \quad (15)$$

则

$$\pi_i^x - \pi_i^0 \leq 0 \quad (16)$$

即当 $P_i^x \in (0, P_i^{\max})$ 时, π_i^x 始终小于等于 π_i^0 。

故取 $P_i^x = P_i^{\max}$ 时, $\pi_i^x = \pi_i^0 = \max (P_i^x)$, 即此时发电商的最优产量策略是上报全部发电容量。

综上所述, 在当量电价下发电商的最优产量策略是上报所有发电容量, 发电商从其自身利益最大化的角度出发是不会选择持留发电容量的策略, 即可以从根本上避免了持留容量行为。

下面进一步分析缺电情况下, 发电商的产量决策。在缺电情况下, 最小成本折线与容量成本参考系的切点通常在容量成本参考系的最右端, 且保持不变, 即所有机组的加载位置都在切点机组以后^[11], 由式(1)可知任一机组 i 的上网电价为

$$p_i = \frac{\lambda_{1f} + b_{1f} t_1}{t_i} - \frac{1}{t_i} \sum_{k=1}^{i-1} b_k (t_k - t_{k+1}) \quad (17)$$

其中 λ_{1f} 、 b_{1f} 为容量成本参考系中最右段的容量成本和电量成本参数。即上网电价与 P_i 无关为常数, 发电商的收益为

$$\pi_i = P_i (p_i - b_i) t_i \quad (18)$$

由于 b_i 、 t_i 、 p_i 为常数, 则收益 π_i 是上报容量 P_i 的一次函数。当 P_i 取最大值 $P_i^{\max}$ 时, π_i 达到最大值。这表明, 在当量电价下, 哪怕是在缺电情况下, 发电商的最优产量决策仍然是上报其最大可用容量, 而不是持留发电容量。

2 当量电价与 UCP 和 PAB 对产量决策作用

由上述分析可知:由于申报现有的最大可用容量是在当量电价下发电商的最优产量策略,从而发电商的机组设备完好率就是决定其效益收入与竞争风险的重要方面。因为发电商机组的完好率决定了该竞价发电商的现货竞争能力与利润空间,所以,在当量电价机制下,对发电商的激励是保证发电机组的设备完好率,在竞争市场上采用申报现有的最大可用发电容量策略,从而市场上不会出现文献[3-5,12]中 UCP 定价机制下的物理滞留和经济滞留行为,不会造成市场上人为的容量短缺和哄抬电价的现象,有利于电力市场的健康发展。

在 UCP 定价机制下,由于发电商的持留容量行为会使市场出清电价上升,而由此获益的是上网发电的所有发电商,所以,出现了某个发电商持留上网发电的所有发电商“搭便车”的现象,发电商越持留,市场越缺电,市场电价越高,发电商获益越多,最终会出现 2000 年加州电力市场中的电力市场灾难。

在 PAB 定价下,因对竞价成功的发电机组按其报价进行支付,发电商持留发电容量之后,如果仅考虑产量决策,不同时考虑价格决策,由于其上网电价未变,持留容量之后发电量减少,发电商的利润反而下降。故在 PAB 电价下,仅考虑产量决策时,发电商没有持留发电容量的利益驱动。因而在加州电力危机之后,曾有部分电力工业学者和政府官员建议采用 PAB 定价方法。

但进一步深入研究后发现,上述结论是在假设发电商持留容量前后报价不变的情况下得到的;即使在 PAB 电价下,当市场供应较紧张的时候,发电商持留容量,更导致发电市场由买方市场变成卖方市场,这样一来,发电商更可通过报高价谋取额外利润。而且越是市场供应紧张,发电商越有可能持留发电容量。在 PAB 电价方法下,一方面如果发电商报高价成功,将获得超额利润,而另一方面报价失败的风险也将增加。下面用一个简单模型分析这一问题,并导出在 PAB 定价方法下,发电商的报价策略。

设发电商 i 的发电成本为 c_i ,发电容量为 P_i ,其报价为 B_i ,其报价成功的概率为 $S_i(B_i)$,则发电商按 B_i 报价的期望收益为

$$\pi_i = P_i (B_i - c_i) S(B_i) \quad (19)$$

当 $\partial \pi_i / \partial B_i = 0$ 时, π_i 取得最大值。

由 $\partial \pi_i / \partial B_i = P_i [S_i(B_i) + (B_i - c_i) \partial S_i(B_i) / \partial B_i] = 0$ 可得发电商的报价策略为

$$B_i = c_i - \frac{S_i(B_i)}{\partial S_i / \partial B_i} \quad (20)$$

由 $\partial S_i(B_i) / \partial B_i \leq 0$, $S(B_i) \geq 0$, 可知在式(20)中 $\frac{S_i(B_i)}{\partial S_i(B_i) / \partial B_i} > 0$ 。可见发电商 i 的报价策略也是其成本再加上一个正的提升量,而提升量的大小取

决于其报价成功的概率及报价成功的概率随报价的变化率,而这又最终取决于市场中其他厂商的报价情况。从上面的分析可以看出在 PAB 电价方法下,发电商也有偏离成本报高价的倾向。

文献[13]采用智能代理(agent-based computational economics)的方法,在 UCP 和 PAB 定价下对发电商策略报价行为进行了大量的模拟计算,仿真结果表明,采用 PAB 的市场日电价水平要比 UCP 还要高,而且高很多。文献[14-15]对 UCP 电价、PAB 和当量电价定价方式下电力拍卖市场运行特征进行了比较研究。该文在给定日负荷曲线情况下,比较了系统具有正常备用(备用率为 10%)及系统缺电(备用率为 2%)情况下的平均电价和市场的购买费用,平均电价表现为:在系统有正常备用和缺电的前后,当量电价的平均电价几乎没有变化,而 UCP 和 PAB 市场平均电价分别增加了 38.38% 和 28.50%;当量电价市场的购电费用上涨了 8.135%,而 UCP 和 PAB 的市场分别上涨了 50.631% 和 39.823 4%,所以当量电价市场情况最为平稳,而 UCP 和 PAB 的电价增加幅度都较大,在容量相对短缺时,当量电价的稳健特性更加明显。由于我国上海发电市场于 2001 年 4 月 1 日,把现货竞价交易的电价方式由 UCP 方式改为 PAB 方式。文献[16]给出了上海电力市场实行 UCP 和 PAB 前后的市场电价、发电商持留情况等的记录比较,表明在 PAB 市场中,发电商的决策情况要复杂的多,发电商的价格策略和产量将会交替并用,在多次重复博弈之后,会从囚徒困境式的价格战开始,逐步走上稳定的默契持留。这也表明,不可以期望在拍卖市场利用 PAB 电价抑制发电商的不良市场行为。

3 结语

本文研究了当量电价定价机制下发电商的产量决策问题,并与 UCP 和 PAB 定价机制进行了比较。发现在当量电价下发电商的最优产量决策是上报全部可用发电容量,因而不会出现威胁市场安全的持留容量行为,这表明当量电价在竞价机制设计时,抑制了发电商的市场力,实现了电力市场的内在稳定性。

参考文献:

- [1] STOFT S. Power system economics: designing markets for electricity[M]. Hoboken, New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2001.
- [2] 李晓刚, 言茂松, 谢贤亚. 3 种定价方法对发电厂商报价策略的诱导机理[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(5): 20-25.
LI Xiao-gang, YAN Mao-song, XIE Xian-ya. Inducement mechanism of strategic bidding under three typical pricing methods [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(5): 20-25.
- [3] 李玉平, 言茂松. 发电容量的持留激励和电力危机的预警[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22): 5-9.
LI Yu-ping, YAN Mao-song. Incentive for withholding generator capacity and forewarning of electricity crisis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 5-9.

- [4] 文福拴,DAVID A K. 加州电力市场失败的教训[J]. 电力系统自动化,2001,25(5):1-5.
WEN Fu-shuan,DAVID A K. Lessons from electricity market failure in California[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,25(5):1-5.
- [5] 刘亚安,管晓宏,孙婕,等. 电力市场电价飞升机理分析[J]. 中国电力,2001,34(8):67-70.
LIU Ya-an,GUAN Xiao-hong,SUN Jie,et al. Mechanism of pricing spiking in electricity power market[J]. Electric Power, 2001,34(8):67-70.
- [6] 言茂松. 当量电价体系及相关制度设计:(一)管制竞争阶段的两大电力市场与当量电价理论[J]. 电力系统自动化,2003,27(7):1-6.
YAN Mao-song. Electricity Value Equivalent(EVE) pricing system and relevant systems design:two electricity markets and electricity value equivalent pricing theory[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(7):1-6.
- [7] 言茂松. 当量电价体系及相关制度设计:(二)发电上网的实用当量电价法及其市场特性[J]. 电力系统自动化,2003,27(8):1-9.
YAN Mao-song. Electricity Value Equivalent(EVE) pricing system and relevant systems design:practical electricity value equivalent pricing method for pool purchase and its market characters[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(8):1-9.
- [8] 言茂松. 当量电价体系及相关制度设计:(三)水电上网的当量电价法[J]. 电力系统自动化,2003,27(11):1-4.
YAN Mao-song. Electricity Value Equivalent(EVE) pricing system and relevant systems design:electricity value equivalent pricing method for hydro-units in electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(11):1-4.
- [9] KAHN A E,CRAMTON P C,PORTER R H,et al. Uniform pricing or pay-as-bid pricing:a dilemma for California and Beyond[J]. The Electricity Journal,2001,14(6):70-79.
- [10] BOWER J,BUNN D. Experimental analysis of the efficiency of uniform-price versus discriminatory auctions in the England and Wales electricity market[J]. Journal of Economic Dynamics & Control,2001,25(3/4):561-592.
- [11] 言茂松,邹斌,李晓刚. 缺电情况下能开放电力市场吗?——兼论当量电价的应用[J]. 电力系统自动化,2003,27(10):1-7.
YAN Mao-song,ZOU Bin,LI Xiao-gang. Could open electricity market with capacity inadequacy—remarks on the application of the Electricity Value Equivalent(EVE) pricing method[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(10):1-7.
- [12] 李晓刚,李玉平. 统一出清电价下发电厂商的持留容量行为及相关抑制措施[J]. 电力自动化设备,2004,24(7):85-88.
LI Xiao-gang,LI Yu-ping. Withholding generation capacity and mitigation mechanism of market power under uniform clearing pricing method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(7):85-88.
- [13] VAZQUEZ C,RIVER M,PEREZ-ARRIAGA J. If pay-as-bid auctions are not a solution for California,then why not a reliability market[J]. The Electricity Journal,2001,14(4):41-48.
- [14] 邹斌,言茂松,谢光前. 不同定价方式下电力拍卖市场运行特征的比较研究(一)模型与算法[J]. 电力系统自动化,2004,28(15):7-14.
ZOU Bin,YAN Mao-song,XIE Guang-qian. Comparisons among pricing methods in pool-based electricity market by agent-based simulation. Part one:model and algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(15):7-14.
- [15] 邹斌,言茂松,谢光前. 不同定价方式下电力拍卖市场运行特征的比较研究(二)仿真结果及分析[J]. 电力系统自动化,2004,28(16):16-20,50.
ZOU Bin,YAN Mao-song,XIE Guang-qian. Comparisons among pricing methods in pool-based electricity market by agent-based simulation. Part two:results and analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(16):16-20,50.
- [16] 李瑞庆,刘敦南,何光宇,等. 电力市场的运营监管信息系统[C]//区域电力市场风险规避和安全稳定高级研讨会论文集汇编. 南京:[s.n.],2004:37-44.
LI Rui-qing,LIU Dun-nan,HE Guang-yu,et al. Operating monitoring and evaluating system of electricity market[C]//Proceeding of Regional Power Market Risk Evade and Security Stability. Nanjing:[s.n.],2004:37-44.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

李玉平(1965-),女,河南郑州人,副教授,博士,主要研究方向为电力市场的监管与电力市场交易机制等(E-mail: ypli30@hotmail.com);

李晓刚(1975-),男,湖南长沙人,工程师,博士,研究方向为电力市场竞价机制与报价策略、电力系统与电力市场仿真、电力市场监管等(E-mail: xglee@sh163.net);

言茂松(1935-),男,湖南湘潭人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力工业重构、电价理论、电力市场交易机制等(E-mail: yanms@public3.sta.net.cn)。

Capacity decision of power supplier with electricity value equivalent pricing method

LI Yu-ping¹, LI Xiao-gang², YAN Mao-song³

(1. Department of Economics, Shanghai University, Shanghai 201800, China;

2. East China Electric Power Training Center, Shanghai 200438, China;

3. Department of Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: A study on optimal capacity decision of power suppliers with EVE (Electricity Value Equivalent) method is presented. Incentive mechanisms of pay-as-bid pricing method, uniform clearing pricing method and EVE pricing method are compared. With the uniform clearing pricing method and the pay-as-bid pricing method, the power supplier abuses market power by withholding action, but with the EVE pricing method, especially when there is no sufficient electricity, the optimal capacity decision of the power supplier is to submit his maximum available capacity without any withholding capacity. With the EVE pricing method, the abundant capacity of the power market can be ensured, thus stable and robust market and price are realized.

Key words: electricity market; bidding strategy; withholding; uniform clearing pricing method; electricity value equivalent