

电力市场下边际成本计算方法的解读

钱程, 鲍海

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 对边际成本在电力市场中的应用问题进行了深入的研究。通过微观经济学中的边际成本由来以及如何引入电力系统出发, 分析了两者的应用前提, 得出了目前的边际成本法计算电价所存在的问题。指出了将经济学中成立前提为产品、产量和成本各自独立的边际成本用于功率互相耦合的电力系统是难以接受的; 某些情况下之所以顺利应用是由于忽视了网络中任一节点电压都是由所有节点注入功率共同维持的; 在理论上, 成本曲线上的点其切线斜率变化趋势多样, 其中一些根本无法描述边际成本; 在应用上, 由于其仅适用于 POOL 模式, 则产生了双边交易或多边交易下对电力市场公平性、公正性的考验。

关键词: 电力市场; 经济学; 边际成本; 价格曲线; 输电网络; 交易中心

Unscrambling of marginal cost algorithm in power market

QIAN Cheng, BAO Hai

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A deep research is made on the application problems of marginal cost in electrical market. Beginning with the description of the origin of marginal cost in microeconomics and its introduction into power system, it derives the problems existing in current marginal cost method used for calculating power price after analyzing the application premise of both. This paper also shows that it is difficult to accept that putting products, output and cost as the premise of the marginal cost in economics, as well as using them in the inter-coupling power systems. It can only be used under certain circumstances which neglects that any nodal voltage is maintained together by all nodal injected power. The variation trend for the tangent slope of the points on cost curves is various in theory, and some of them simply cannot be used for showing the marginal cost. When it comes to the problem of the application, for merely considering the POOL mode, it gives rise to the test for the equity and fairness on power market in bilateral transaction or multilateral transaction.

Key words: power market; economics; marginal cost; price curves; transmission network; transaction center

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0007-04

0 引言

随着对电力市场研究的深入和实践的开展, 越来越多的问题显现出来, 对电力市场基本原理的研究显得越来越重要。电力市场是市场理论在电力系统中的具体应用, 怎样将经济学原理与电力系统运行的基本规律相结合, 是电力市场研究的主要内容之一。

系统边际电价 (system marginal price, SMP) 是电力市场中反映电力商品短期供求关系的统一价格^[1]。当前我国已经初步实现的几个省级电力市场都是以 SMP 为核心进行结算的。因此, SMP 的准确性问题显得尤为重要。边际成本法^[2-9]是目前应用较多的成本计算方法, 还有一些“先边际成本法定价、后收支平衡修正”的方法^[10], 如 F.C.Schweppe

等人在 WRATES 软件中提出在短期边际成本价格上乘以适当的系数来实现收支平衡的方法^[11]; H. Rudnick, R. Palma 和 J.E. Fernanderz 提出用不同输电分配系数分配缺额的追加成本方法^[12]。由于纯粹的边际成本远小于年收支一致的平均成本, 这些修正是很大的, 几乎湮没了边际成本定价中的经济学信息而大大损害了其有效性, 因此这类方法不仅在原理上是粗略的, 而且从经济学的观点来看, 不是上策^[13]。事实上, 经济学中的边际成本在计算及原理上是有前提的, 当延伸到电力系统中应用时会产生问题。

1 经济学中的边际成本

文献[14]指出, 在生产过程中, 厂商将投入品 (也称生产要素) 变为产出 (或产品)。以厂商使用

劳动和资本两种投入品，生产出食品为例，其量可以发生变化。表 1 给出了不同投入品组合下可得到的产出。

表中最上一行为劳动的投入，最左一列为资本的投入。表中每一项表示在一个时段内相应的劳动与资本的组合同最多能生产出的产品。在几何上，包含在表 1 中的信息可以用等产量线来表示，如图 1 所示。

表 1 两种可变投入下的生产 (Q)

Tab.1 Production under the two variables (Q)

劳动投入 L \ 资本投入 K	1	2	3	4	5
1	20	40	55	65	75
2	40	60	75	85	90
3	55	75	90	100	105
4	65	85	100	110	115
5	75	90	105	115	120

图 1 中等产量线 Q_1 上每一点对应着劳动与资本年投入量的某种组合，在该组合下，最终得到 55 单位的产出。在等产量线向右上方移动时，产出水平上升。B、C、E 则分别是产量为 75 和 90 等产量线上的点。

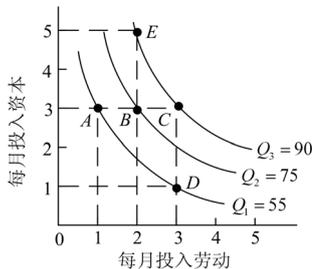


图 1 两种可变投入下的生产

Fig.1 Production under the two variables

当两种投入品可变化时，经理人员往往会考虑用一种投入品替代另一种投入品。为了将生产者更多增加另一种投入而愿意替换某一种投入的数量加以量化，经济上采用一种被称作边际技术替代率 (MRTS) 的度量法。如果用 ΔK 表示资本的变化，用 ΔL 表示劳动的变化，MRTS 便可以写成 $-\Delta K / \Delta L$ ；加上负号是为了使边际技术替代率为正值 (ΔK 总是负的)。结果，在任一点上的边际替代率在绝对值上就是等于等产量线在该点的斜率。

将这种横轴一单位变化带来纵轴量变化的比例关系思想引入成本曲线，选择横轴代表产量变化，纵轴代表成本变化。其成本增加量随多生产一单位产出的变化关系即为

$$MC = \Delta VC / \Delta Q \quad (1)$$

在经济学中，定义边际成本 (有时被称为增量成本) 为因多生产额外一单位产出而引起的成本的增加。由于固定成本不随企业产出水平的变化而变化，因此，边际成本就是每增加额外的一单位产出所引起的可变成本的增加量。

在大多生产过程中，都存在着劳动 (和其他投入品) 的边际产出 (最后一单位劳动所带来的总产出的增加量) 递减现象，一般称为边际报酬递减。由于边际报酬递减规律的作用，可变要素数量增加时，边际产量先递增至最大值后递减，致使平均产量也是先递增至最大值后递减。当平均每一单位可变要素的产量不断增加时，意味着平均每一单位产品所需的可变要素投入量减少，在要素价格一定的条件下，平均成本也相应减少；当平均产量达到最大值时，平均成本达到最小值；随着平均产量的递减，平均成本开始递增。所以，平均成本 AC 曲线是一条“U”型曲线。同理，边际成本 MC 曲线也呈“U”型，如图 2 所示。

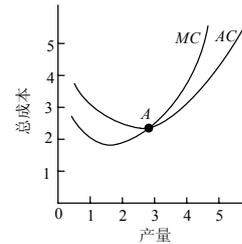


图 2 总成本曲线

Fig.2 Figure of the total cost

可以看出，一个企业的产品生产，当边际成本低于平均成本时，平均成本处于下降阶段；当边际成本高于平均成本时，平均成本处于上升阶段。所以，当边际成本等于平均成本时，平均成本为最小值。

2 边际成本引入电力系统

电力系统中，长期边际成本法定价的理论依据是从全局考虑使社会总效益 B_f 最大化^[15]，即目标函数为

$$\begin{aligned} \max B_f \\ B_f = B_e - C_d \end{aligned} \quad (2)$$

式中： B_f 为消耗电能 W_d 后产生的社会净效益； B_e 为用户使用电能 W_d 后产生的用电效益； C_d 为系统可变成本，即电量成本。

对 B_f 求偏导数, 得

$$\frac{\partial B_f}{\partial W_d} = \frac{\partial B_e}{\partial W_d} - \frac{C_d}{W_d} = 0 \quad (3)$$

以平均分摊成本的思想, 认为

$$\rho_d = \frac{C_d}{W_d} \quad (4)$$

式中: W_d 为负荷用电量; 该思想源于综合成本法平均分摊成本的计算, ρ_d 为该法计算出的电量电价。

对用户而言, 用电 W_d 产生的净效益为

$$B_d = B_e - \rho_d W_d \quad (5)$$

用户的目标是使其 B_d 最大, 即

$$\frac{\partial B_d}{\partial W_d} = \frac{\partial B_e}{\partial W_d} - \rho_d = 0 \leftrightarrow \frac{\partial B_e}{\partial W_d} = \rho_d \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (3), 可得到以下结果:

电量电价等于电量成本对负荷用电量的微增率, 即为

$$\frac{\partial C_d}{\partial W_d} = \rho_d \quad (7)$$

对于整个系统而言, 此电量电价代表了最后一个上网电厂的报价价格, 即所有上网机组中的最高价格。当有 5 个发电量都为 1 万 kWh 的电厂上网发电, 其价格曲线如图 3 所示。可以看出, 最终的边际成本为 0.34 元/kWh, 与前面上网的四个电厂报价无关, 只由最后一台的价格决定。

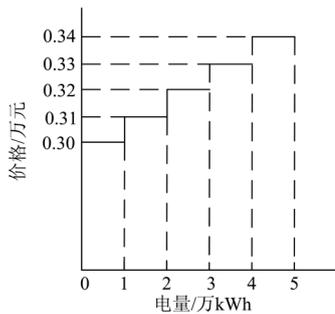


图 3 价格曲线

Fig.3 Price curves

3 电力边际成本计算引发的思考

由以上叙述发现, 经济中的边际成本源于横轴上一单位产量增加带来纵轴成本数量上的变化。各个产品, 以及生产各产品需要的成本之间相互独立, 成本可以代数相加减。而在电力系统中, 多电源注

入功率间存在耦合关系, 电网中每个节点的节点电压都由网络中所有节点的电流共同维持。电能从发电厂流出, 经输电网络到达用户, 因此, 某一个负荷节点功率的大小, 以及产生此功率的成本受整个网络的影响无法单独计算。而经济学中的边际成本, 正是在独立的产品和成本基础上计算的。所以, 应用边际成本电价描述电网输电成本存在问题。

对如图 4 所示总成本曲线进行分析。曲线 1 为系统总成本曲线, 在其上任取一点 A , 其电量为 P_A , 总成本为 C_A 。过 A 作曲线 1 的切线, 其斜率即为用电量 P_A 时的边际成本。过坐标零点做此切线的平行线 (用曲线 2 表示), 则曲线 2 具有与曲线 1 中 A 点相同的边际成本, 即用电量为 P_A 时的结算总成本为 $C_{\text{总}} = P_A \cdot \rho_A = P_A \cdot \frac{\partial C_A}{\partial P_A} = P_A \cdot \frac{C_B}{P_A} = C_B$ 。而实际上, 传输到 A 点的总成本为 C_A 。由图 4 可见, 供电成本与实际结算成本不等, 产生了 $\Delta C = C_B - C_A$ 的差值, 供需不平衡, 无法做到对市场各参与者的公平、合理。除非总成本是随产量增加而成正比的增长, 由于它的边际成本是总成本曲线的斜率, 所以它的边际成本等于平均成本, 满足供需平衡的要求。

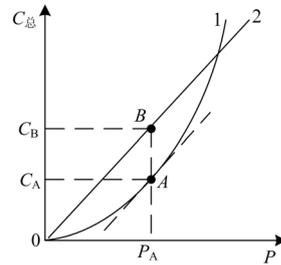


图 4 总成本曲线

Fig.4 Figure of the total cost

经济学中成本曲线是对一个企业而言的, 按报酬递减规律呈“U”型。企业关注其生产产品的平均成本, 由平均成本的大小来决定产量及产品价格。边际成本则是为产品定价服务的, 当边际成本等于平均成本时, 该产量下的平均成本最低。在电力系统中, 总成本曲线由所有上网机组共同决定。电量需求增加时, 机组随之阶段性增加, 曲线根据上网电厂的不同报价和发电量而变化。电力市场中, 各个电厂单独报价, 全天分 24 或 48 个时段, 各个时段允许报不同的价格, 如图 5 所示。将各个电厂的不同报价排序后, 根据电量变化来安排上网机组, 总成本曲线将有多种形状^[16]。所以, 在计算最后一单位电量消耗带来的总成本变化 (即边际成本) 时, 往往并不能反映实际中的总成本随电量的变化关

系。①当总成本曲线单调递增时(除正比例关系外),供给和需求无法平衡。②当总成本曲线单调递减时,不但存在供需平衡问题,而且也并不真实。③若总成本曲线不单调或存在多种形状的总成本曲线,例如折线形,那么其横轴上不同值的斜率可能相同,即在不同电量下存在相同的边际成本。再如平线报价(纵轴量不随横轴变量的变化而变化),其斜率始终为0。以上两种情况在电力系统中无法得到准确的边际成本。综上可得,边际成本只有在总成本与电量满足比例关系时适用。当总成本曲线单调递增时,供需不平衡;不单调或单调递减时,边际成本的方法不适用于电力系统中电价的求取。

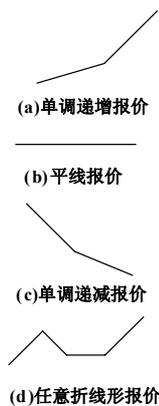


图5 报价曲线

Fig.5 Bidding curves

另外,电力系统中的边际成本计算建立在各电厂报价由交易中心付费的基础上,为电力联营体(PPOOL)交易模式下的产物。而实际上,越来越多的双边交易乃至多边交易进入电力市场,其交易行为不受交易中心的限制,发电厂与用户直接结算。然而,在这种跨过交易中心的直接交易中,电能的传输是通过电网的,其占用了电网的资源。当直接交易双方所得利益与在PPOOL模式下产生增值时,必定存在电网利益损失,换句话说,没有做到对所有市场参与者公平计费,违背了电力市场中“公平、公正”的原则。另外,对于开放的电力市场,其物理性输电权通常用在以双边贸易为基础的分散市场中,而金融性输电权经常使用在以联营为基础、按节点定价的市场中。当这两种输电权形式之间存在较大差异时,执行起来就会出现问題。

4 结论

(1) 经济学中的边际成本为平均成本服务,其成立的前提为产品、产量和成本各自独立,可采用代数相加减形式描述。电力系统中功率互相耦合,

不满足边际成本成立前提,直接套用必然产生问題。

(2) 除成本与电量满足比例关系外,边际成本应用于电力系统都存在问题。总成本曲线单调递增时,供需不平衡;不单调或单调递减时,边际成本的方法不适用于电力系统中电价的求取。

(3) 边际成本应用前提为电力联营体交易模式,当电力市场中有双边交易或多边交易存在时,在付费上违背了电力市场“公平、公正”的原则。

参考文献

- [1] 黄日星,康重庆,夏清. 电力市场中的边际电价预测[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (22): 9-12.
HUANG Ri-xing, KANG Chong-qing, XIA Qing. Systems marginal price forecasting in electricity market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (22): 9-12.
- [2] Tabors R D. Transmission system management and pricing: new paradigms and international comparisons[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9 (1): 206-215.
- [3] Merrill H M, Erickson B W. Wheeling rates based on marginal-cost theory[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4 (4): 1445-1451.
- [4] Li Y Z, David A K. Optimal multi-area wheeling[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9 (1): 288-294.
- [5] 王秀丽,黄敏,等. 计及可靠性的电力市场分时定价方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (10): 29-33.
WANG Xiu-li, HUANG Min, et al. Power system hourly pricing methods considering reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (10): 29-33.
- [6] 余志伟,高大伟,谢志棠,等. 多区域互联电力系统输电服务边际电价的实现和分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (10): 4-7, 19.
Yu Z W, David A K, Tse C T, et al. Implication and analysis of transmission services marginal pricing in a multi-area intereconnected power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (10): 4-7, 19.
- [7] 代红才,彭建春,等. 基于边际成本和潮流追踪的无功定价[J]. 电网技术, 2007, 31 (7): 59-63.
DAI Hong-cai, PENG Jian-chun, et al. Reactive power pricing based on marginal cost and power flow tracing[J]. Power System Technology, 2007, 31 (7): 59-63.
- [8] 欧阳武,程浩忠,等. 配电网节点边际容量成本及应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 18-21.
OUYANG Wu, CHENG Hao-zhong, et al. Locational marginal capacity cost in distribution network and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (1): 18-21.

(下转第15页 continued on page 15)

- 波理论分析与算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (11): 48-52.
ZHANG Jie-qi, LIANG Chang-hong, CHEN Yan-pu. Power system harmonic theory analysis and algorithm based on convolution window[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (11): 48-52.
- [10] 黄纯, 江亚群. 谐波分析的加窗插值改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (15): 26-31.
HUANG Chun, JIANG Ya-qun. Improved window and interpolation algorithm for analysis of power system harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (15): 26-31.
- [11] 庞浩, 李东霞, 俎云霄, 等. 应用FFT进行电力系统谐波分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (6): 50-54.
PANG Hao, LI Dong-xia, ZU Yun-xiao, et al. An improved algorithm for harmonic analysis of power system using FFT technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (6): 50-54.
- [12] 赵文春, 马伟明, 胡安. 电机测试中谐波分析的高精度FFT算法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (12): 83-87.
ZHAO Wen-chun, MA Wei-ming, HU An. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in the electric machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (12): 83-87.
- [13] Andria G, Savino M, Trotta A. Windows and interpolation algorithms to improve electrical measurement accuracy[J]. IEEE Trans IM, 1989, 38 (4): 856-863.
- [14] 孙同明, 许珉, 杨育霞. 应用三次样条函数快速计算插值FFT算法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (6): 60-62.
SUN Tong-ming, XU Min, YANG Yu-xia. Fast calculation of interpolated FFT algorithm using cubic spline function[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (6): 60-62.
- [15] Kincaid D, Cheney W. 数值分析[M]. 王国荣, 俞耀明, 徐兆亮, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.
Kincaid D, Cheney W. Numerical analysis[M]. WANG Guo-rong, YU Yao-ming, XU Zhao-liang, Trans. Beijing: China Machine Press, 2005.

收稿日期: 2009-09-22

作者简介:

许珉 (1956-), 男, 教授, 从事电气设备故障诊断及信号处理在电气工程中的应用研究. E-mail: xumin@zzu.edu.cn

(上接第 10 页 continued from page 10)

- [9] 张晓东, 王加璇, 高波. 关于汽轮发电机组热经济学边际成本的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (5): 140-144.
ZHANG Xiao-dong, WANG Jia-xuan, GAO Bo. A study on the thermoeconomic marginal costs of steam turbo-generator unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (5): 140-144.
- [10] Yu C W, David A K. Pricing transmission services in the context of industry deregulation[R]. 96WM 321-0 PWRS6.
- [11] Caramanis M C, Roukos N, Schweppe F C. WRATES: a tool for evaluating the marginal cost of wheeling[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4 (2): 594-605.
- [12] Rudnick H, Plama R, Fernandez J E. Marginal pricing and supplement cost allocation in transmission open access [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10 (2): 1125-1142.
- [13] 言茂松, 辛洁晴. 在电力市场环境下网嵌入的边际成本输电定价新方法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18 (2): 111-116.
YAN Mao-song, XIN Jie-qing. Grid embedded marginal-cost transmission pricing (GEMP) in power market[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18 (2): 111-116.
- [14] 平狄克, 鲁宾费尔德. 微观经济学[M]. 四版. 北京: 中国人民大学出版社, 2000.
Pindyck R S, Rubinfeld D L. Microeconomics[M]. Fourth edition. Beijing: China Renmin University Press, 2000.
- [15] 杜松怀, 温步瀛, 蒋传文. 电力市场[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
DU Song-huai, WEN Bu-ying, JIANG Chuan-wen. Electricity market[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [16] 张扬, 武亚光, 张志刚, 等. 电力市场中考虑安全校核的发电计划生成策略[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (9): 6-8.
ZHANG Yang, WU Ya-guang, ZHANG Zhi-gang, et al. Strategy of the security constrained generation scheduling for electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (9): 6-8.

收稿日期: 2010-04-06; 修回日期: 2010-05-19

作者简介:

钱程 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行、分析与控制; E-mail: spirit04081005@163.com

鲍海 (1968-), 男, 教授, 博士, 主要从事电力系统运行、分析与控制的研究工作。