

文章编号: 1000-6788(2009)01-0044-11

基于社会福利最大化的电力市场双边竞价机制设计

邹小燕¹, 张新华²

(1. 重庆师范大学 经济与管理学院, 重庆 400047; 2. 长沙理工大学 管理学院, 长沙 410076)

摘要 电力市场的双边竞价机制应该能够抑制市场力, 增加市场的社会福利. 以社会福利最大化为目标, 运用 Vickery-Clark-Groves 原理, 设计一种新的电力市场双边竞价机制. 该机制在支付平衡的基础上, 以各参与者对市场的福利贡献来进行市场的收益分配和结算. 从理论上分析该机制的经济特征, 并以西班牙电力市场的实际数据为基础, 将新机制与现有的 MCP 机制进行实证比较分析, 结果均表明新机制能够抑制拥有市场力的发电公司操纵市场报高价的行为, 增加市场的成交电量, 进而提高市场的社会福利.

关键词 电力市场; 竞价机制; 福利贡献; 市场力; Vickery-Clark-Groves 机制

中图分类号 TM73; F123.9

文献标识码 A

Double electricity auction mechanism design based on maximizing market welfare

ZOU Xiao-yan¹, ZHANG Xin-hua²

(1. College of Economics and Management, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China; 2. School of Management, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China)

Abstract A good double electricity auction mechanism should control market power and enhance the economic welfare of the electricity market. In order to achieve this aim, the paper designs a new double auction mechanism in electricity market, using the idea of the Vickery-Clark-Groves mechanism. In the new mechanism the market participants can gain some transfer payments based on their contributions to the market welfare, and the new mechanism can balance the budget of the market organizer. Then makes a theoretical analysis and gives a demonstration from the Spanish electricity market, and the results show that comparing with the MCP mechanism, the new one can reduce the bids of some generation companies with market power in faith, and enhance the economic welfare of the electricity market.

Keywords electricity market; auction mechanism; welfare contribution; market power; Vickery-Clark-Groves mechanism

1 引言

在较为完善的电力市场中, 发电公司、售电公司和用户可以选择不同的交易方式进行电能交易. 一方面, 买方和卖方可以采用面对面 OTC (Over the Counter) 方式签订双边合同, 并自行确定合同中电能的价格和数量, 这种方式主要针对的是长期的电能交易. 另一方面, 众多的买方和卖方参加双边竞价市场, 通过集

收稿日期: 2007-05-25

资助项目: 国家自然科学基金 (70501006, 70771118)

作者简介: 邹小燕 (1979-), 四川资阳人, 博士, 主要研究电力竞价机制设计, 电力市场风险等, Email: cq_zxy@163.com; 张新华 (1973-), 湖南双峰人, 博士, 副教授, 目前主要研究电力竞价策略、竞价机制设计等. Email: xyu7302@163.com.

中竞价的方式在 PX (Power Exchange) 中进行电能交易, 这种方式主要针对的是短期的电力现货交易, 因此也可以把双边竞价市场称为现货市场. 竞价机制是现货市场中电能价格的形成机制, 也是电力市场的核心问题之一, 竞价机制设计的好坏关系着电力市场的效率以及稳定性.

目前关于电力市场双边竞价机制设计的文献并不多. Nicolaisen 等建立了一个基于代理的电力市场双边竞价机制, 该机制的核心思想是根据买方和卖方的报价进行“高低匹配”^[1]. 但研究中仅考虑了单位电量的报价, 与电力市场的实际情况还有一定的差距. 王先甲等以揭示市场参与者真实信息为目标, 针对有多个发电公司和多个电力用户参加的电力市场, 设计了一种激励相容的双边竞价机制, 不仅能实现电力的经济调度, 而且可以诱导市场参与者披露其真实信息, 所设计机制的突出特点在于引入归一价格解决交易成本问题^[2]. 谢俊等运用机制设计理论, 引入激励相容条件和市场成员个人理性条件, 给出了一种激励性的双边电力市场竞价机制, 并证明无论是否考虑输电约束, 其机制都具有良好的激励性^[3]. Block 等针对小型的热电联产电网设计了一种能提高电能分配效率的双边竞价机制, 该机制的中心是在既定的网络约束条件下最大化卖方报价与卖方报价之间的差值, 并以简单算例的方式说明用极大值原理求解的思路^[4], 但由于模型求解十分复杂, 可能影响其适用性.

实际电力市场中, 双边合同与现货市场(双边竞价)这两种交易方式互为补充, 双边竞价机制设计不应使现货市场中的资源达到最优配置, 还要能够促进双边合同交易的形成. 而上述文献在设计双边竞价机制时没有考虑现货市场与双边合同这两种交易方式的相互影响. 文 [5] 通过构建双边合同动态谈判博弈模型深入分析了现货市场对双边合同形成的影响, 并提出了增加现货市场透明度有利于促进双边合同的形成, 进而可以提高整个电力市场效率的政策建议. 根据文 [5] 的结论并结合电力市场的实际, 本文认为在设计电力市场的双边竞价机制时, 应以社会福利最大化为目标. Hobbs 等将 Vickery-Clark-Groves 机制运用于电力市场, 以社会福利最大化为目标进行了双边竞价机制设计^[6]. Hobbs 等所设计的机制考虑了发电成本的非凸性和用电效益的非凹性, 且对发电公司有弱激励特性, 但其支付原则可能导致入不敷出.

本文在文 [6] 的基础上, 以社会福利最大化为目标, 运用 VCG 机制的思想, 设计一种新的电力市场双边竞价机制, 该机制能在支付平衡的基础上, 最大化电力市场的社会福利. 通过分析新机制的经济特征, 证明了该机制可以有效地抑制市场力行为. 最后以西班牙电力市场的实际数据为基础, 将所设计的新机制与现有的 MCP 机制进行实证比较分析, 说明其正确性和可行性.

2 电力市场中的两种交易方式及其相互关系

在较为成熟的电力市场中, 发电公司、售电公司和用户可以选择不同的交易方式进行电能交易. 正如引言中提到的: 一方面, 买方和卖方可以采用面对面 (OTC) 方式签订双边合同实现长期电能交易; 另一方面, 通过集中竞价的方式在现货市场中进行短期现货电能交易. 因此, 根据实际电力市场中电能交易的时序, 可以把交易方式分成双边合同和现货市场两种, 如图 1 所示^[7], 各种交易方式适合于不同需求的用户.

1) 双边合同交易

双边合同一般针对长期电能交易, 由售电公司、用户和发电公司自由协商达成. 在英国电力市场中双边合同主要以面对面 OTC 方式签署, 买卖双方自行确定合同中电能的交易价格和数量.

双边合同的价格一旦确定就与现货市场的结算价格不相关, 但双边合同会影响现货市场的竞争程度. 因

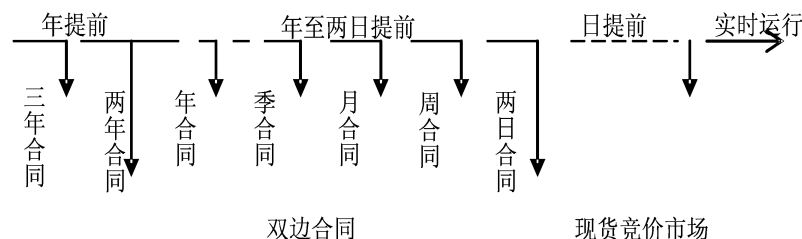


图 1 电力交易时序图

为在电力总需求不变的情况下, 双边合同的存在必然减少现货市场的需求电量, 这样双边合同的存在提高了

现货市场的竞争程度,削弱了发电公司的市场力量,也有助于市场的稳定与效率.而且还会影响现货市场参与者在竞价过程中的决策行为.对于买卖双方而言,达成双边合同不仅可以交易电能,而且还可以规避一定的市场风险.

2) 现货市场(双边竞价)交易

现货市场针对短期电能交易,一般是通过竞价方式实现电能的价值,即市场参与者通过提前承诺出价,在下一个交易日里获得他们所希望出售(或购买)的部分电量.较为成熟的电力市场环境下,现货市场竞价的参与者主要包括卖方(发电公司)和买方(售电公司或大用户,简称用户)^[2],也就是众多买方和卖方同时竞价交易电能.

现货市场按交易日进行,每个交易日为 1 个日历日,可以分为 24 或 48 个交易日.以 48 个交易日为例,每个交易时段为 30min.交易日从当日 0:00 开始,第一个时段为 0:00~0:30,最后一个交易时段为 23:30~次日 0:00.市场组织者负责组织现货市场竞价和交易,在固定的时间间隔内,收集买卖双方的报价信息,确定竞价成功的参与者及其交易数量,最后匹配成交并确定交易^[2].文中所指的电力市场双边竞价机制就是针对现货市场交易所设计的竞争机制.

现货市场交易比较灵活,但是一般交易价格与成本较高,适合于非计划性电力需求,具有较强的零售与调剂性质;双边合同比较稳定,但是规定也较为具体,适合特殊保障要求的大用户以及售电公司与独立发电公司之间的单独协商交易.二者之间的关系是互为补充,片面地依赖其中一种交易方式都会造成不必要的损失.畅通充足的现货交易市场是双边合同交易的有效缓冲,现货市场竞价机制设计应在能促进双边合同交易形成的基础上进行.本文从这一角度出发,以社会福利最大化为目标来设计电力市场的双边竞价机制,也即针对电力现货市场交易设计竞争机制.

3 电力市场双边竞价的新机制设计

电力市场双边竞价的过程具体包括四个阶段:双边报价、市场出清、交易结算、交易匹配^[2].本部分根据这一过程进行电力市场双边竞价机制的设计.

3.1 市场参与者的报价规则

在报价时,市场参与者提交电量与电价.对于发电公司 i 而言,根据实际发电成本特征,其总发电成本函数为 $c_i = \alpha_i + \beta_i q^2/2$,其中 $\alpha_i, \beta_i > 0$,那么边际发电成本 $mc_i = \beta_i q$ ^[8].由于在参与现货市场竞价前发电公司 i 已经与用户签订了电量为 q_i^0 的双边合同,所以在现货竞价时,发电公司 i 的边际发电成本为 $mc_i = \beta_i q_i^0 + \beta_i q_i$,且 $q_i + q_i^0 \leq q_i^{\max}$,其中 q_i^{\max} 和 q_i 分别表示发电公司 i 的最大可供电量以及其在现货市场中的电量.

根据上述发电成本的特征,本文设计双边竞价机制的报价规则要求各参与者提交的报价采用曲线形式,即发电公司 i 的报价曲线为 $B_i = a_i + b_i q_i$ 且 $a_i, b_i > 0$,报价随电量递增,即报价曲线向上倾斜,其形状如图 2(a) 所示.

对于用户和售电公司而言,所提交的电量与电价的组合中,二者的关系也采用线性形式,即报价曲线为 $B_j = c_j - d_j q_j$ 且 $c_j, d_j > 0$.与发电公司报价不同的是,用户和售电公司所提交的电价随电量递减,而不是递增,也就是说用户和售电公司的报价曲线向下倾斜,如图 2(b) 所示.

3.2 市场的出清规则及过程

1) 确定参与者对现货市场的福利贡献

各参与者对市场的福利贡献是其参加现货市场竞价所带来的社会福利增量^[6].即某一参与者对市场的福利贡献是其参加现货市场竞价时所计算出的社会福利减去其不参加竞价时的社会福利之差.

如果有 m 家发电公司和 l 家用户参与现货市场竞价,用 W 表示所有 $m+l$ 个参与者参加竞价时的市场总社会福利.将所有 m 家发电公司的报价曲线加总得到现货市场的初始供给曲线,在图 3 中用 S' 表示.根据各发电公司的报价表达式可得到曲线 S' 的表达式(是一个分段函数)为:

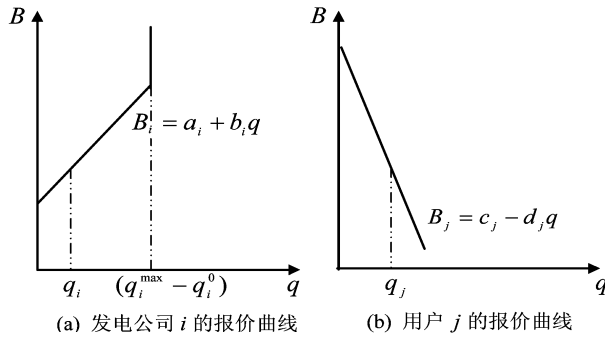


图 2 电力市场参与者的报价曲线

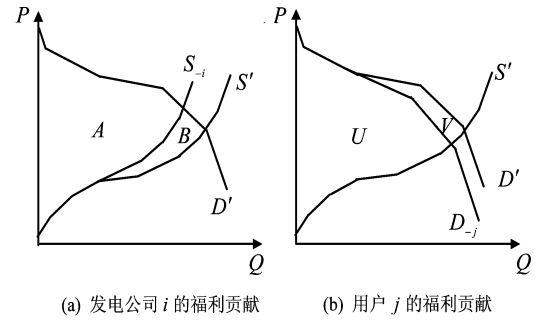


图 3 现货市场参与者的社会福利贡献

$$P = (Q + \sum_{i=1}^x \frac{a_i}{b_i}) / \sum_{i=1}^x \frac{1}{b_i} \quad a_x \leq P < a_{x+1} \quad (1)$$

(1) 式中 $a_x (x = 1, 2, 3, \dots, m)$ 表示 m 家发电公司的报价系数 a 按由小到大的顺序排列。

将所有 l 家用户的报价曲线加总得到现货市场的初始需求曲线, 图 3 中用 D' 表示. 根据各用户的报价表达式可得到曲线 D' 的表达式 (也是一个分段函数) 为:

$$P = (\sum_{j=1}^y \frac{c_j}{d_j} - Q) / \sum_{j=1}^y \frac{1}{d_j} \quad c_{y+1} \leq P < c_y \quad (2)$$

(2) 式中 $c_y (y = 1, 2, \dots, l)$ 表示 l 家用户的报价系数 c 按由大到小的顺序排列。

初始的市场供给曲线 S' 与市场需求曲线 D' 以及纵轴 (价格轴) 所围成的面积大小即是有 $m + l$ 个参与者参加竞价时现货市场的总社会福利 W , 如图 3(a) 中 $A + B$ 所表示的面积, 或图 3(b) 中 $U + V$ 所表示的面积。

用 W_{-i} 表示市场成员 i 不参与现货市场竞争, 其他 $m + l - 1$ 个成员参加竞价时的社会福利. 对于发电公司 i 而言, 将发电公司 i 以外的其他 $m - 1$ 家发电公司的报价曲线加总得到发电公司 i 不参与竞价的现货市场供给曲线 S_{-i} , 其表达式的计算方法与 S' 的相同。

发电公司 i 不参与竞价的现货市场供给曲线 S_{-i} 与原始需求曲线 D' 以及纵轴所围成的面积大小即是发电公司 i 不参与竞价时现货市场的社会福利 W_{-i} , 如图 3(a) 中 A 所表示的面积. 那么发电公司 i 的社会福利贡献是其参加市场竞争所带来的社会福利增量, 用 ΔW_i 表示, 那么 $\Delta W_i = W - W_{-i}$, 即图 3(a) 中 B 所表示的面积。

对于用户 j 而言, 将用户 j 以外的其他 $l - 1$ 家用户的报价曲线加总得到用户 j 不参与竞价时现货市场的需求曲线 D_{-j} , 其表达式的计算方法与 D' 的相同。

用户 j 不参与竞价的现货市场需求曲线 D_{-j} 与初始供给曲线 S' 以及纵轴所围成的面积大小即是用户 j 不参与竞价时现货市场的社会福利 W_{-j} , 如图 3(b) 中 U 所表示的面积. 那么用户 j 的社会福利贡献是其参加市场竞争所带来的社会福利增量, 用 ΔW_j 表示, 那么 $\Delta W_j = W - W_{-j}$, 即图 3(b) 中 V 表示的面积。

2) 交易集的确定

即确定竞价成功的现货市场参与者. 根据本小节 1) 中所计算出的参与者对电力市场的福利贡献大小来确定竞价成功的参与者. 凡是市场贡献大于零的参与者竞价成功, 市场贡献小于等于零的参与者竞价失败. 将所有竞价成功的市场参与者组成的集合称为交易集, 即如果 $\Delta W_i > 0$, 则参与者 i 竞价成功, 进入交易集; 如果 $\Delta W_i \leq 0$, 则参与者 i 竞价失败, 不进入交易集. 若有 n 家发电公司进入交易集, k 个用户进入交易集, 则 $n \leq m, k \leq l$.

根据 1) 中所计算出各个参与者对市场的社会福利贡献, 可以计算出每个进入交易集的参与者的福利贡献率 ϕ_i , 并将其作为现货市场结算中转移支付的分配依据. 进入交易集的参与者 i 的福利贡献率 ϕ_i 是该参

与者的福利贡献在所有进入交易集的参与者福利贡献总和中所占的比重, 即

$$\phi_i = \Delta W_i / \left(\sum_{i=1}^n \Delta W_i + \sum_{j=1}^k \Delta W_j \right) \quad (3)$$

3) 现货市场交易电量的确定

将交易集中所有发电公司的报价曲线加总后得到现货市场的总供给曲线 S , 交易集中所有用户的报价曲线加总得到市场的需求曲线 D . 市场供给曲线 S 和需求曲线 D 的交点 E 作为现货市场的出清点, 如图 4(a) 所示. E 点对应的数量 Q_0 是电力现货市场的出清电量, 也是交易电量, 即不管现货市场如何结算以及交易如何匹配, 现货市场中的总交易电量就是 Q_0 ; E 点对应的价格 P_0 是出清价格, 它反映了现货市场的边际价格水平, 而现货市场并不一定以该价格进行结算. 每一轮竞价结束后, 出清数量和出清价格是向市场参与者公布的信息.

对于每一个参与者而言, 根据其报价曲线上市场出清价格 P_0 对应的电量确定其分配电量, 图 4(b) 表示发电公司 i 的分配电量为 q_i , 图 4(c) 表示用户 j 的分配电量为 q_j . 根据这一规则确定的分配电量是每一个市场参与者在现货市场中的交易电量, 其值一旦确定就按其大小进行成交, 不受现货市场结算规则和交易匹配规则的影响.

对于进入交易集的市场参与者而言, 其现货市场电量分配可以用数学语言描述为:

$$\begin{cases} P = a_i + b_i q_i \\ P = c_j - d_j q_j \\ \sum_{i=1}^n q_i = \sum_{j=1}^k q_j \\ q_i^{\min} - q_i^0 \leq q_i \leq q_i^{\max} - q_i^0 \\ q_j^{\min} - q_j^0 \leq q_j \leq q_j^{\max} - q_j^0 \end{cases} \quad (4)$$

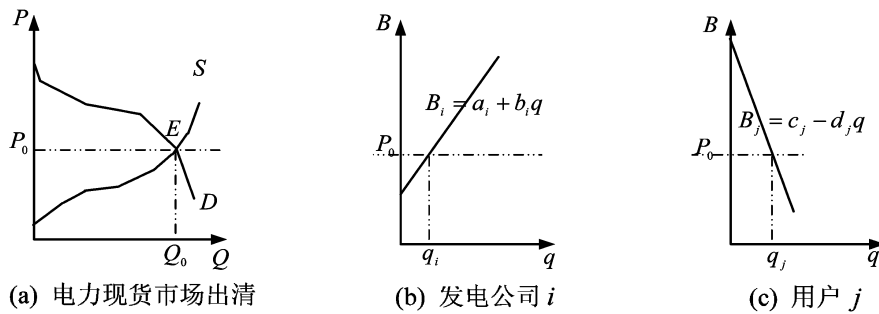


图 4 电力现货市场的出清与电量分配

3.3 市场的结算规则

在电力现货市场结算时, 并不直接以出清价格 P_0 作为交易价格, 而是在此基础上进行调整.

在本文所设计的电力市场双边竞价机制中, 具体结算时, 发电公司 i 在现货市场中的竞价收入由两个部分构成:

第一部分是根据其自身报价和分配电量所确定的电量收入, 用 F_i 表示, 那么:

$$F_i = \int_0^{q_i} (a_i + b_i q) dq = a_i q_i + b_i \cdot (q_i)^2 / 2 \quad (5)$$

第二部分是根据发电公司 i 对现货市场的社会福利贡献所进行的补偿, 也就是转移收益 $\tau_i(\cdot)$. 该转移收益是根据发电公司对现货市场的福利贡献率来分配的现货市场的剩余收入, 即发电公司 i 的福利贡献率乘以现货市场的剩余收入. 这里的现货市场剩余收入 SR 是指交易集中所有用户按其报价计算的电量支出与所

有发电公司按报价计算的电量收入的差值, 即:

$$SR = \sum_{j=1}^k \int_0^{q_j} (c_j - d_j q) dq - \sum_{i=1}^n \int_0^{q_i} (a_i + b_i q) dq = \sum_{j=1}^k F_j - \sum_{i=1}^n F_i \quad (6)$$

$$\tau_i(\cdot) = \phi_i \cdot SR = \left(\sum_{j=1}^k F_j - \sum_{i=1}^n F_i \right) \cdot \Delta W_i / \left(\sum_{i=1}^n \Delta W_i + \sum_{j=1}^k \Delta W_j \right) \quad (7)$$

这样发电公司 i 在现货市场中获得的总收入为:

$$R_i = F_i + \tau_i(\cdot) = a_i q_i + b_i \cdot (q_i)^2 / 2 + \phi_i \cdot SR$$

同样, 用户 j 在现货市场中的竞价支付也是由两部分构成的:

第一部分是根据其自身报价所确定的电量支出, 用 F_j 表示, 即:

$$F_j = \int_0^{q_j} (c_j - d_j q) dq = c_j q_j - d_j \cdot (q_j)^2 / 2 \quad (8)$$

第二部分是根据用户 j 对现货市场的社会福利贡献所进行的补偿, 也就是转移收益 $\tau_j(\cdot)$, 该转移收益同样是根据用户 j 对现货市场的福利贡献率来分配的现货市场的剩余收入, 即

$$\tau_j(\cdot) = \phi_j \cdot SR = \left(\sum_{j=1}^k F_j - \sum_{i=1}^n F_i \right) \cdot \Delta W_j / \left(\sum_{i=1}^n \Delta W_i + \sum_{j=1}^k \Delta W_j \right) \quad (9)$$

用户 j 在现货市场中的总支出为:

$$R_j = F_j - \tau_j(\cdot) = c_j q_j - d_j \cdot (q_j)^2 / 2 - \phi_j \cdot SR \quad (10)$$

可以证明, 对于市场组织者而言该机制是收支平衡的, 即现货市场中所有进入交易集的发电公司获得的收入与所有进入交易集的用户支出是相等的.

$$\sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n F_i + \left[\left(\sum_{j=1}^k F_j - \sum_{i=1}^n F_i \right) \cdot \sum_{i=1}^n \Delta W_i \right] / \left(\sum_{i=1}^n \Delta W_i + \sum_{j=1}^k \Delta W_j \right) \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^k R_j = \sum_{j=1}^k F_j - \left[\left(\sum_{j=1}^k F_j - \sum_{i=1}^n F_i \right) \cdot \sum_{j=1}^k \Delta W_j \right] / \left(\sum_{i=1}^n \Delta W_i + \sum_{j=1}^k \Delta W_j \right) \quad (12)$$

所以有:

$$\sum_{i=1}^n R_i - \sum_{j=1}^k R_j = 0 \quad \text{即:} \quad \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{j=1}^k R_j \quad (13)$$

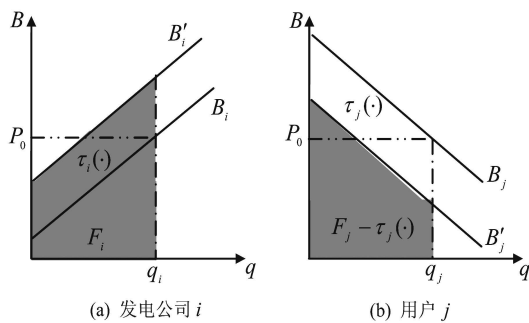


图 5 电力市场参与者报价曲线的修正

这种结算方式相当于用参与集中各参与者获得的福利补贴对其原有的报价曲线进行修正, 再按原分配电量和修正后的报价计算支付. 对于发电公司 i 而言, 将原报价曲线 $B_i = a_i + b_i q_i$ 向上平移 $\tau_i(\cdot)/q_i$ 单位的垂直距离, 得到修正后的报价曲线 $B'_i = a_i + \tau_i(\cdot)/q_i + b_i q_i$, 然后根据原分配电量 q_i 并按 B'_i 结算, 图 5(a) 中阴影部分面积表示发电公司 i 在现货市场中获得的总收入. 对于用户 j 而言, 将原报价曲线 $B_j = c_j - d_j q_j$ 向下平移 $\tau_j(\cdot)/q_j$ 单位的垂直距离, 得到修正后的报价曲线 $B'_j = c_j - \tau_j(\cdot)/q_j - d_j q_j$, 然后根据原分配电量 q_j 并按 B'_j 进行结算, 图 5(b) 中阴影部分的面积表示用户 j 在现货市场中的总支出.

3.4 市场的交易匹配规则

对于市场组织者来说, 制定一个公正合理的交易匹配规则有助于实现电力的经济调度和市场的社会福利最大化^[2]. Nicolaisen 提出了一种“高低匹配”的交易规则, 即买方(卖方)按照报价由高(低)到低(高)依次排序优先级, 首先撮合优先级最高的买方和卖方的交易. 王先甲等以电力市场交易成本最小化为目标提出了按交易量大小进行优先匹配, 对于竞价成功的市场参与者, 首先将发电量最高的发电公司和购电需求最高的用户进行匹配. 对于没有被满足要求的发电公司或用户, 再与剩下的发电公司和用户一起组成新的交易集, 以此类推, 直到所有中标者的电力要求都被满足为止^[2].

本文是以社会福利最大化为目标设计电力市场的双边竞价机制, 所以在交易匹配规则的设计中同样体现参与者的社会福利贡献. 在具体确定交易顺序时, 考虑市场参与者的福利贡献, 分别将竞价成功的发电公司和用户按照福利贡献由大到小依次排序. 在现货市场总成交量 Q_0 以及各市场参与者交易电量 q_i 确定的前提下, 首先将社会福利贡献最大的发电公司和福利贡献最大的用户进行匹配, 对于没有被满足的发电公司或用户, 再与剩下的福利贡献次高的对方进行匹配, 以此类推, 直到所有竞价成功的参与者的电力要求全部被满足为止.

4 新机制与 MCP 机制的理论比较分析

参与者实施市场力行为是降低现货市场社会福利的主要原因. 本部分考察新机制抑制市场力行为从而提高社会福利的特征. 通过将新机制下发电公司的市场力行为与现有 MCP(Market Clearing Price) 机制下的行为进行比较分析, 说明新机制可以增加市场的社会福利.

为了突出分析发电公司的竞价行为, 暂不考虑用户的具体报价行为, 可以认为现货市场电力需求曲线就是一条向下倾斜的曲线, 这条曲线是所有参加竞价用户的报价曲线的加总. 如果有 l 家对称的用户参与现货市场竞价, 由它们报价曲线加总得到的市场需求曲线用 $D(P) = M - NP$ 表示, 那么, 用户 j 的报价曲线为: $B_j = (M - l \cdot q_j)/N$.

现货市场竞价时发电公司 i 的边际成本为 $mc(q_i) = \beta_i q_i^0 + \beta_i q_i$, 由 m 家发电公司组成卡特尔组织, 其边际成本为 $MC(Q) = \alpha + \beta Q$, 其中 Q 表示卡特尔组织在现货市场中的总电量. 对于该卡特尔组织而言, 其利润最大化的决策为 $MC = MR$. 即:

$$\alpha + \beta Q = \frac{M}{N} - \frac{2}{N}Q \Rightarrow Q^* = \frac{M - N\alpha}{\beta N + 2} \quad (14)$$

将 (14) 式代入 $D(P) = M - NP$ 得:

$$P^* = \frac{MN\beta + M + N\alpha}{(\beta N + 2)N} \quad (15)$$

那么, 卡特尔组织利用其垄断地位实施市场力行为报价的表达式为:

$$B = \alpha + \left(\beta + \frac{1}{N}\right)Q \quad (16)$$

下面具体比较在现有的 MCP 机制以及新机制下发电公司实施这种市场力行为的可能性.

1) MCP 机制下发电公司实施市场力行为的可能性分析

MCP 机制下, 卡特尔组织实施垄断报价, 报价表达式为 (16) 式, 那么其在现货市场中的总利润为:

$$\pi^* = \int_0^{Q^*} (P^* - \alpha - \beta Q)dQ = \frac{1}{2N} \frac{(M + N\alpha)^2}{N\beta + 2} \quad (17)$$

如果卡特尔组织报边际成本价 $B = \alpha + \beta Q$, 该组织在现货市场中获得的总利润为:

$$\pi_0 = \int_0^{Q_0} (P_0 - \alpha - \beta Q)dQ = \frac{1}{2}\beta \left(\frac{M - N\alpha}{N\beta + 1}\right)^2 \quad (18)$$

比较 π_0 和 π^* 可得:

$$\frac{\pi^*}{\pi_0} = 1 + \frac{1}{(N\beta)^2 + 2\beta N} > 1 \quad (19)$$

即 $\pi^* > \pi_0$, 这说明对于卡特尔组织而言, 垄断报价的利润高于按真实边际成本报价的利润, 那么在 MCP 机制下它不会报真实成本价, 而是通过抬高报价获得利润最大化, 这样就抬高了现货市场的结算价格. 而且在 MCP 机制下, 卡特尔组织总报价曲线的斜率 $\beta + 1/N$ 大于边际成本曲线的斜率 β . 总报价曲线与边际成本曲线斜率的差异取决于需求弹性 N : 如果 N 越大, 也就是说电力需求曲线越平缓, 需求价格弹性越大, 卡特尔组织的报价高于边际成本的值越小; 如果 N 越小, 也就是电力需求曲线越陡峭, 需求价格弹性越小, 卡特尔组织的报价高于边际成本的值越多.

2) 新机制下发电公司实施市场力行为的可能性分析

在新机制下, 如果 m 家发电公司组成的卡特尔组织报真实成本价 $B = \alpha + \beta Q$, 现货市场出清电量 $Q_0 = (M - N\alpha)/(N\beta + 1)$, 那么新机制下垄断组织报真实成本价在现货市场中获得的总利润为:

$$\pi = F + \tau(\cdot) - \int_0^{Q_0} (\alpha + \beta Q) dQ = \frac{(M - N\alpha)^2 \cdot (l - N\beta + lN\beta)}{2N(N\beta + 1) \cdot [l(N\beta + 2) - N\beta]} \quad (20)$$

同理, 如果在新机制下卡特尔组织进行垄断报价 $B = \alpha + (\beta + 1/N)Q$, 现货市场出清电量 $Q' = (M - N\alpha)/(N\beta + 2)$, 那么, 新机制下卡特尔组织垄断报价在现货市场中的总利润为:

$$\begin{aligned} \pi' &= F' + \tau'(\cdot) - \int_0^{Q'} (\alpha + \beta Q) dQ \\ &= \frac{(M - N\alpha)^2 \cdot l(N^2\beta^2 + 5N\beta + 7)}{2N(N\beta + 2)^2 \cdot [l(N\beta + 3) - N\beta - 1]} - \frac{(M - N\alpha)^2 \cdot [(N\beta)^2 + 4N\beta + 3]}{2N(N\beta + 2)^2 \cdot [l(N\beta + 3) - N\beta - 1]} \end{aligned} \quad (21)$$

比较式 (20) 和式 (21) 的结果可得, 如果 $\pi/\pi' \leq 1$, 说明垄断报价的利润不小于按真实成本报价的利润, 那么在新机制下卡特尔组织将利用其市场力报高价, 而不会报真实边际成本价; 反之, 如果 $\pi/\pi' > 1$, 那么垄断报价的利润太低, 组织会采取报真实边际成本价, 这样新机制抑制了卡特尔组织实施市场力行为. $\pi/\pi' \leq 1$ 意味着:

$$\begin{aligned} &(N\beta + 1) \cdot [l(N\beta + 2) - N\beta] \cdot [l(N^2\beta^2 + 5N\beta + 7) - (N\beta)^2 - 4N\beta - 3] \\ &- (N\beta + 2)^2 \cdot (lN\beta - N\beta + l) \cdot [l(N\beta + 3) - N\beta - 1] \geq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

求解 (22) 式得: $l_1 = \frac{N\beta}{N\beta + 1}$, $l_2 = \frac{N\beta + 1}{N\beta + 3}$, $l_1, l_2 \in (0, 1)$ 且当 l 在 $[l_1, l_2]$ 区间上时, 不等式成立, 说明这时垄断组织会运用其市场力抬高报价. 而当 $l > l_2$ 时, 上述不等式不成立, 垄断组织运用其市场力进行垄断报价的利润小于其报真实边际成本价的利润, 那么组织不会垄断报价. 也就是说, 在新机制下, 只要有用户参与市场竞价, 垄断报价就无利可图, 这说明新机制可以有效地抑制发电公司实施市场力行为, 从而提高市场的社会福利.

5 新机制与 MCP 机制的实证比较分析

以西班牙电力市场的实际数据为基础进行实证分析. 西班牙电力市场是一个高度开放、透明的电力市场, 发电公司、特许用户和售电公司等市场成员都可以通过现货市场竞价买卖电能. 市场运行者 OMEL(电力市场公司) 负责电力市场的经济管理, 并在其网站上实时公布上一交易日各时段现货市场的竞价结果, 包括市场参与者的报价曲线、市场出清价格、成交电量等. 系统运行者 REE(电网公司) 处理有关系统技术管理问题, 在其网站上实时公布各时段的电网输电信息. 本部分采用 2001 年 11 月 11 日西班牙电力市场的实际数据进行实证分析.

5.1 实证分析数据的选取

1) 发电市场结构及发电参数

西班牙发电市场是一个高度集中的市场, 主要由 4 家较大的发电集团公司组成. 这 4 家较大的电力集团公司是: 西班牙电力公司 (ENDESA)、伊贝尔德罗拉公司 (Iberdrola. S.A.)、乌尼翁费诺萨电力公司

(UEFSA)、坎塔布连科水电公司 (HDCSA). 2001 年这四家发电公司的发电量占整个市场发电量的 92.5%^[9]. 所以在实证分析中仅考虑这四家发电公司组成的发电市场结构, 它们的容量情况见表 1.

文 [10] 通过对现货市场中各发电公司的报价信息、各发电公司的发电容量以及机组类型进行分析, 得出了 2001 年 11 月 11 日各发电公司的边际成本曲线. 表 1 中各发电公司的边际成本数据则是根据文 [10] 提供的数据对各发电公司的边际成本曲线进行曲线拟合得到的.

2) 各时段电力市场的需求数据

在西班牙电力市场中, 各时段现货市场的电能买方报价曲线 (市场需求曲线) 是向下倾斜的. 在本文的实证分析中, 重点考察发电公司的报价行为, 所以将所有买电方近似看成是一个整体, 那么买方报价曲线的加总即是现货市场的需求曲线. 用一次函数 $P = M/N - (1/N) \cdot Q$ 来拟合买方报价曲线, 可以得到 2001 年 11 月 11 日各时段现货市场的需求曲线, 其具体的参数见表 2.

根据西班牙电网公司公布的 2001 年 11 月 11 日各时段的总用电量数据, 以及西班牙电力市场公司公布的现货市场成交电量数据, 可以计算出该日各时段的双边合同电量数据, 见表 2. 从 2001 年全年来看, 双边合同交易电量占总用电量的 10% 左右.

在竞价机制的实证比较分析中, 对于每一个发电公司在各时段的双边合同电量则用各时段总的双边合同电量乘以各发电公司在用电市场中的市场份额近似表示. 2001 年各发电公司在用电市场中的份额分别是: ENDESA 公司 39%; Iberdrola. S.A. 公司 43%; UEFSA 公司 13%; HDCSA 公司 5%^[10].

5.2 实证比较分析

根据 5.1 中所给出的发电参数及电力需求数据, 通过计算可以得到电力市场分别采用现有的 MCP 机制和新机制的竞价结果. 下面具体从发电公司报价、现货市场成交电量和市场的社会福利三个方面, 对新机制与现有 MCP 机制的竞价结果进行比较分析.

1) 代表性发电公司的报价系数变化分析

在西班牙电力市场中, ENDESA 公司拥有的发电容量最大, 占总容量的 45.98%, 那么该公司拥有比较大

表 1 各发电公司的容量及边际成本系数

发电公司	容量 (MW)	容量份额	边际成本系数
ENDESA	19 872	45.98%	3×10^{-7}
Iberdr.S.A.	16 407	37.96%	3.3×10^{-7}
UEFSA	5 254	12.16%	8×10^{-7}
HDCSA	1 686	3.90%	18.2×10^{-7}

注: 边际成本系数是在电量单位为 KWh, 边际成本单位为 cEuro/KWh 的量纲下给出的.

表 2 各时段电力市场需求参数数据

	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6	时段 7	时段 8
M / N	22.72	23.36	17.54	18.04	19.68	19.20	22.43	23.66
1 / N ($\times 10^{-7}$)	9.80	11.40	8.78	9.60	11.13	11.05	13.49	14.34
双边合同电量	3 378	2 668	2 342	2 092	2 110	1 415	1 131	365
	时段 9	时段 10	时段 11	时段 12	时段 13	时段 14	时段 15	时段 16
M / N	27.51	22.54	23.59	23.36	19.48	22.39	19.77	25.01
1 / N ($\times 10^{-7}$)	16.80	13.20	12.40	11.42	9.09	10.62	9.31	12.63
双边合同电量	221	1 017	1 884	2 801	3 362	3 672	3 410	3 117
	时段 17	时段 18	时段 19	时段 20	时段 21	时段 22	时段 23	时段 24
M / N	27.61	25.03	22.82	18.62	21.85	22.95	20.31	21.67
1 / N ($\times 10^{-7}$)	14.43	12.84	9.83	7.33	8.71	9.03	8.16	8.87
双边合同电量	2 688	3 256	3 423	3 596	4 115	4 527	4 126	4 050

注: 各时段参数是在电价单位为 cEuro/KWh, 电量单位为 KWh 的量纲下得出的, 双边合同电量的单位为 MWh.

的市场力, 在竞价过程中可能有抬高报价的行为. 以 ENDESA 公司为代表来分析不同机制下各时段发电公司报价系数的变化情况. 在具体比较中, 给定发电公司 ENDESA 的报价系数 a_i 为真实成本价, 即 $a_i = \beta_i q_i^0$, 主要来比较代表性发电公司报价曲线的斜率, 即报价系数 b_i 的值.

图 6 直观地描述出不同机制下 ENDESA 公司的报价系数 b_i 随时段变化的情况.

从图 6 中可以明显地看出, 在 MCP 机制下 ENDESA 公司的报价系数明显高于其真实边际成本系数, 其报价系数在 4.7×10^{-7} 左右, 高出真实边际成本系数近 60%, 说明在现有的 MCP 机制下 ENDESA 公司可以实施其市场力行为报高价, 从而降低市场效率. 在新机制下 ENDESA 公司的报价在 3.15×10^{-7} 左右, 仅高出真实边际成本系数 5%, 说明在新机制下 ENDESA 公司的市场力行为并不明显, 实证分析结果证明了新机制对市场力行为具有很强的抑制作用.

在新机制下, 拥有市场力的发电公司的市场报价接近于其真实边际成本, 说明新机制通过根据参与者的市场福利贡献决定这些参与者的转移收入, 能够在某种程度上起到抑制市场力的作用, 这也是在电力市场竞价机制设计中一个好的竞价机制应该具备的功能.

2) 不同机制下现货市场成交电量的比较分析

在现有的 MCP 机制下, 由于容量大的发电公司可以实施市场力行为抬高报价, 这使得在市场需求相同的情况下现货市场的成交电量偏少. 新机制比较好地抑制了发电公司在竞价过程中抬高报价的市场力行为的实施, 使得现货市场成交电量比较高. 图 7 中描述了各时段新机制和 MCP 机制下现货市场的成交电量以及西班牙现货市场的实际成交电量.

从图 7 中可以清楚地看出, 在新机制下各时段的成交电量均大于 MCP 机制下的成交电量, 而且也大于西班牙电力市场的实际成交电量. MCP 机制下的平均成交电量为 17350 MWh, 新机制下的平均成交电量为 18020 MWh, 高于 MCP 机制近 4%, 说明新机制与 MCP 机制相比能够促进现货市场的电能交易. 计算出的 MCP 机制下的成交电量小于西班牙电力市场的实际成交电量, 其原因是西班牙电力市场中容量电费与电量电费是分开支付的, 也就是说市场中竞价的只是电量电价部分, 而容量电价另外支付, 这样会使现货市场中发电公司的报价相对较低, 从而成交电量高于计算出的 MCP 机制下的成交电量.

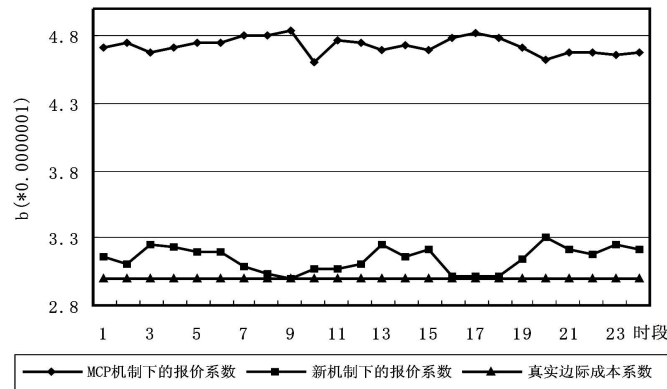


图 6 ENDESA 公司的报价系数随时段变化的曲线

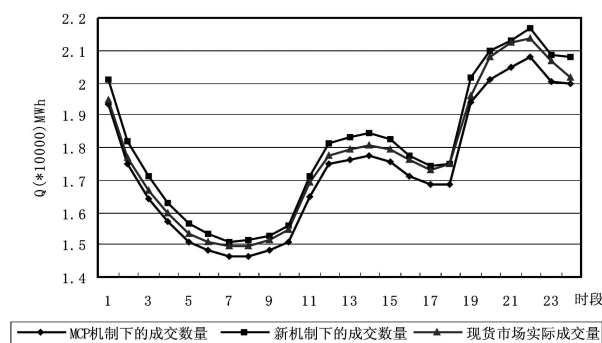


图 7 不同机制下各时段现货市场的成交电量

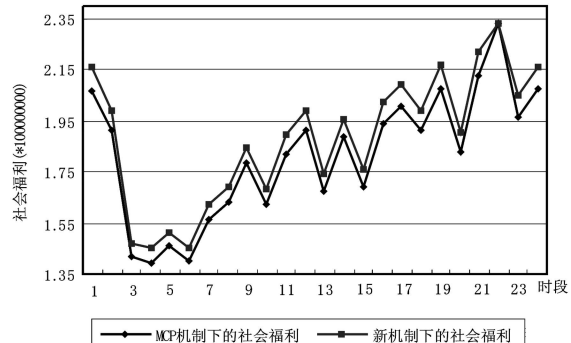


图 8 不同机制下各时段现货市场的社会福利

3) 不同机制下现货市场社会福利的比较分析

图 8 中描述了不同机制下各时段现货市场的实际社会福利, 所计算出的社会福利是在电量单位为 KWh 时得出的. 从图 8 中明显地看出, 新机制下的社会福利高于现有 MCP 机制下现货市场的社会福利. 在 MCP 机制下现货市场的平均社会福利为 18.1×10^7 , 而新机制下的平均社会福利为 18.8×10^7 , 高于 MCP 机制近 5%.

从图 6-8 的比较中可以得出: 新机制下现货市场成交电量和社会福利均大于现有的 MCP 机制下的对应值. 这是新机制通过抑制拥有市场力的发电公司运用其市场力操纵市场报高价的结果. 在新机制下发电公司的报价接近于其真实边际成本, 并未实施市场力行为. 与现有的 MCP 机制相比, 新机制下现货市场的供给曲线比较平坦, 从而使得在需求相同的情况下市场的成交电量比较大, 这样整个市场的社会福利也比较高.

6 结论

本文以社会福利最大化为目标, 运用 VCG 机制的思想设计电力市场的双边竞价机制. 在所设计的机制中, 是以各参与者对市场的社会福利贡献来进行市场收益分配和结算的, 也就是说只有福利贡献大于零的参与者竞价成功, 且其支付由电量收入和转移收益两个部分构成: 电量收入是按照参与者实际报价计算得到的; 转移收益的分配是根据市场参与者的福利贡献率进行的. 将新机制与 MCP 机制进行理论比较分析表明: 新机制可以抑制市场力行为的实施, 从而提高市场的社会福利.

以西班牙电力市场的实际数据为基础, 将新机制与现有的 MCP 机制进行实证比较分析, 结果说明了新机制的某些优势: 1) 在新机制下, 拥有市场力的发电公司的市场报价接近于真实边际成本, 说明新机制通过根据参与者对现货市场的社会福利贡献决定这些参与者的转移收入, 能够在某种程度上起到抑制市场力的作用. 2) 新机制下现货市场成交电量和社会福利均大于 MCP 机制下的成交电量和社会福利, 这是新机制有效抑制市场力的结果.

参考文献

- [1] Nicolaisen J, Petrov V, Tesfatsion L. Market power and efficiency in a computational electricity market with discriminatory double-auction pricing[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2001, 5(5): 504-523.
- [2] 王先甲, 殷红. 一种激励相容的电力市场双边拍卖机制[J]. *电力系统自动化*, 2004, 28(18): 7-15.
Wang X J, Yin H. An incentive compatible double auction mechanism in electricity market[J]. *Automation of Power Systems*, 2004, 28(18): 7-15.
- [3] 谢俊, 陈星莺, 廖迎春, 等. 激励性输配分开电力市场竞价机制的建模[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(23): 25-31.
Xie J, Chen X Y, Liao Y C, et al. Research on modeling the incentive bidding mechanism transmission and distribution separated electricity markets[J]. *Proceeding of the CSEE*, 2006, 26(23): 25-31.
- [4] Block C, Neumann D, Weinhardt C. A market mechanism for energy allocation in micro-CHP grids[C]//*Proceedings of the 41st Hawaii International Conference on System Sciences*, 2008, 1-11.
- [5] Zou X Y, Ren Y L. Bargain model of bilateral electricity contract between generation company and power consumer[J]. *Systems Engineering*, 2007, 22(1): 28-33.
- [6] Hobbs B F, Rothkopf M H, Hyde L C, et al. Evaluation of a truthful revelation auction in the context of energy markets with nonconcave benefits[J]. *Journal of Regulatory Economics*, 2000, 18(1): 5-32.
- [7] 李涛. 华北区域电力市场运营模式的探讨[J]. *现代电力*, 2004, 21(3): 24-27.
Li T. Study on the market models of north China power market[J]. *Modern Electric Power*, 2004, 21(3): 24-27.
- [8] Wolak F A. Identification and estimation of cost function using observed bid data: An application to electricity markets[R]. NBER Working Paper 8191, March 2001.
- [9] Kai-Uwe K, Matilde P M. Bilateral market power and vertical integration in the spanish electricity spot market[R]. CEMFI Working Paper 0414, September 2004.
- [10] Natalia F. An overview of the spanish electricity industry[J]. *Universidad Carlos III de Madrid and CEPR*, May, 2005.