

电力市场竞价博弈实验方案设计与结果分析

胡朝阳, 许 婧, 甘德强, 韩祯祥

(浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 竞价博弈实验在检验和发展电力市场理论方面具有重要意义。文中设计了一个模拟的电力市场环境, 运用 Nash 均衡理论, 对不同类型发电商的报价策略进行了研究, 得出了一些有价值的结论。特别地, 文中对竞价博弈实验的方案设计进行了详述, 针对实验暴露出来的问题提出了改进方案, 并在随后的实验中加以检验。实验结果表明, 文中提出的实验方案是基本合理的。

关键词: 电力市场; 竞价博弈实验; Nash 均衡

中图分类号: TM73; F123.9

0 引言

在开放的电力市场环境下, 发电商的报价策略和电力市场竞价博弈的均衡结果不仅是相关发电商关心的热点问题, 也是学术界研究的热点问题之一。由于世界范围内电力市场的发展历史只有 10 余年, 很多关系到电力市场稳定、高效运行的问题尚没有定论, 仍处在不断的研究探索之中。比如, 各发电商的标书在事后是否应该公布, 最高限价的调整对发电商的报价有何影响等, 这些问题的解决能够有力地促进电力市场的健康发展, 同时也是电力监管机构制定监管规则的重要依据。

近年来, 国内外学者运用非合作博弈理论对电力市场竞价博弈问题进行了深入研究, 取得了不少理论成果。然而, 基于经济学的理论推导结果有时与实际的市场表现并不一致, 甚至可能相差甚远^[1]。例如, 经济学家早已在理论上完美地证明了统一清算价格鼓励发电商按照边际成本报价, 减少了发电商投机申报高价的可能性, 最终将导致电价呈现不断下降的趋势。英国电力市场最初是采用统一清算价格体系的, 然而数年的实施结果却令经济学家们大失所望, 电价不但没有下降, 反而缓慢攀升。2 年前, 英国电力市场改为按照中标发电商的实际报价结算 (pay as bid), 理论上分析, 这种结算方式将鼓励发电商的投机行为, 刺激电价上升。遗憾的是, 事实又一次与理论分析相反, 新结算方式实施以后, 英国电力市场的电价一路走低, 不但小发电商纷纷破产倒闭, 即使像核电这样的大型发电商都快支撑不下去, 以至于政府不得不考虑出台扶持措施。我们从这个事例中得出的经验教训是, 一种给定形式拍卖的实际表现很难从理论上预测。尽管理论分析非

常重要, 但是解决电力市场问题单纯依靠理论分析是不够的, 理论结果只有通过市场实践的检验才能行之有效。实验经济学的出现正是为了发现经济学理论与市场实践之间可能出现的偏差, 它是检验经济学理论在实际应用中是否有效的强有力工具, 已经发展成为经济学中的一门独立学科, 其重要性日益为人们所重视。具体说来, 在电力市场应用方面, 实验经济学精心设计各个实验环节, 尽可能模拟实际的市场环境, 通过实验对象之间的实际博弈结果, 来验证各种理论分析结果的有效性。

目前, 实验经济学在国外电力市场的应用研究已进行了多年, 专门的实验工具软件也已开发出来^[1,2], 而国内尚未开展这方面的工作。文献[3]报道了一个课堂模拟实验的实例, 其突出特点是, 参与学生可以利用两个辅助工具——电价预测软件和针对预测电价的最优反应策略软件来帮助确定报价策略 (事实上, 目前国内很多参与市场竞价的发电商都不具备这些优化工具); 其次, 该实验实际上只进行一轮, 就开始分析实验结果 (前面几次实验是为了让参与学生熟悉实验环境), 显然, 实验结果的稳定性和可靠性难以保证; 再次, 根据本文的研究经验, 该实验只取 1 名优胜者的奖励方案存在很大缺陷。

众所周知, 电力市场的运营模式必须与国情相适应, 不存在一种通用的最优模式。同样, 适合国外电力市场的实验经济学方法也不一定适合国内电力市场, 因此, 发展有自己特色的考虑中国电力市场状况的实验经济学理论和方法具有非常重要的意义。

1 第 1 次竞价博弈实验

1.1 方案设计

1.1.1 实验目的、对象和时间

该实验的目的是研究统一清算价格体系下的几

个热点问题:①发电商在高峰负荷和低谷负荷的报价策略分别有哪些特点?②边际成本相同和边际成本不同两种情况下,发电商的报价策略有何不同?③最高限价的提升是否鼓励发电商申报高价?④事后是否公布所有发电商的标书,对发电商的报价策略有何影响?⑤奖励方案所起的激励作用是否与实际市场情况相符?

该实验共有 24 名同学参加。实验前,这些同学已经学习了 3 个月的电力市场基础知识,对电力市场的运营方式有了初步了解,具备进行电力市场竞价博弈实验所需的基本能力。

实验时间为 2003 年 5 月 14 日 9:00~11:00,地点为浙江大学电机工程楼多功能教室。

1.1.2 实验模拟的市场环境

考虑到国内进行试点的电力市场均为省级电力市场,实行竞价上网的发电商数目不是很多,因此在实验中设定 6 个发电商参与竞价。为了使模拟的电力市场更具有实际代表意义,将 6 个发电商按照装机容量的大小分为 3 类,每类拥有 2 个发电商,其中,大发电商装机容量为 3 GW,中发电商装机容量为 2 GW,小发电商装机容量为 1 GW(以上设定参考了浙江电力市场的实际数据,并根据具体实验要求做了适当的修改)。为此,我们把实验对象分为 6 组(每组 4 人),分别代表一个发电商进行报价。

由于模拟的电力市场总装机容量为 12 GW,因此设计的竞价负荷不能超过这个数字(否则,市场将供不应求,统一清算价格一定位于最高限价,失去了竞价博弈实验的意义)。我们设计了以下 4 个时段的竞价负荷(2 个高峰负荷和 2 个低谷负荷):11 GW,10 GW,8 GW,6 GW。分析可知,在第 1 个竞价负荷下,大发电商和中发电商都拥有把统一清算价格抬到最高限价的市场力;在第 2 个竞价负荷下,只有大发电商拥有这种市场力;而在最后两个竞价负荷下,没有一个发电商拥有这种市场力。我们规定,在每轮竞价中发电商必须申报这 4 个负荷的价格,系统将对每个时段的报价从小到大排序,最后一个被接纳的发电商报价即为系统的统一清算价格。如果两个发电商的报价相同并且共同设定了统一清算价格,那么系统最后剩余负荷将按这两个发电商装机容量大小的比例进行分配。

竞价轮数也是我们需要考虑的重要问题,因为时间有限,轮数太多将导致发电商研究报价策略的时间不足,容易造成实验结果的偏差;而轮数太少将不能测试所有的实验项目,并且难以保证实验的公平性,所以我们决定共进行 6 轮竞价。这 6 轮竞价分为 2 个部分,每个部分 3 轮。在第 1 部分的实验中,所有发电商的边际成本相同,均为 200 元/MW。

在第 2 部分的实验中,发电商的边际成本各不相同,大发电商的边际成本最低(100 元/MW),小发电商的边际成本最高(300 元/MW),中发电商的边际成本则介于两者之间(200 元/MW),这是符合市场实际情况的。另外,两部分实验还有一个明显的区别:在第 1 部分的实验中,所有发电商的报价均保密处理;在第 2 部分的实验中,每轮竞价结束后当场公布所有发电商的报价。为了测试最高限价对发电商报价策略的影响,我们在每个部分实验的第 3 轮都将最高限价从 800 元/MW 提高到 1 200 元/MW。

实验是否公平直接影响实验对象的参与积极性,并在一定程度上影响实验的成败。为了最大限度地保证公平性,我们决定在实验中采用“角色轮换”制。每组代表的发电商类型在每个部分 3 轮竞价中轮换一遍,即每组都有机会分别代表大发电商、中发电商和小发电商进行报价。具体的轮换顺序事先确定,总共 6 套轮换方案,并在报价单中进行了详细说明。为了充分体现公平性,各组最终采用哪套轮换方案由抽签决定。我们认为,在每个部分的第 3 轮代表大发电商的小组可能占有一定的优势,当然,这种潜在的优势能否发挥出来完全取决于提高最高限价对统一清算价格的影响(因为从直觉上判断,提高最高限价可能会导致统一清算价格的上升,而大发电商此时在装机容量上占有优势)。以上措施的采用在很大程度上保证了实验的基本公平。事实上,由于竞价轮数有限,我们无法让实验做到绝对公平。

各组在每轮竞价中的盈利计算公式为:

$$\text{竞价盈利} = \sum_{i=1}^4 (\text{统一清算价格} - \text{边际成本}) \times \text{中标容量}$$

式中: i 表示 4 个不同竞价负荷。

每轮竞价结束后,当场计算不同竞价负荷下的统一清算价格,公布各组盈利情况。目的是让同学们从上一轮的竞价结果中吸取经验教训,提高以后各轮的报价水平。最后,按各组 6 轮总盈利高低进行排序,确定最终奖项的得主。为了便于计算,我们规定所有报价的个位数必须为 0。

“串通报价”扰乱了正常的市场秩序,在实际电力市场运营中属于违法行为,处于市场管理部门的严厉监管之下。同样,为了防止“串通报价”行为的出现,我们规定,组内可以自由讨论,但严禁组与组之间串通报价。具体地说,如果任意 2 组在一轮报价中有 2 个或 2 个以上相同报价,即被视为违规,将被取消获奖资格(零价、最高限价和边际成本可以重复)。经过计算,在不串通的情况下,任意 2 组在一轮报价中有 2 个相同报价的概率为 0.253%,因此,

制定这样的规则不但有必要,而且存在客观依据。

1.1.3 奖励方案

奖项的设置和奖金的额度对于充分调动实验对象的积极性、激励实验对象全力投入具有不可替代的作用。奖项设置太少,获奖可能性太小,会打击实验对象的参与热情;而奖项设置太多,又存在普奖之嫌,难以保证实验对象认真投入。奖金的额度以及各奖项之间的差距设计也是一个值得仔细考虑的问题。为此,我们确定了以下奖励方案:共设 3 个奖项,第 1 名为 150 元,第 2 名为 100 元,第 3 名为 50 元(指每组收益)。事实证明,这个奖励方案所起的激励作用还是较强的。

1.2 结果分析

1.2.1 第 1 部分(边际成本相同,标书保密)

第 1 部分各轮的统一清算价格及盈利分别如表 1、表 2 所示。

表 1 第 1 部分各轮的统一清算价格
Table 1 Market clearing prices of each auction in section one

竞价负荷/GW	统一清算价格/(元·MW ⁻¹)		
	第 1 轮	第 2 轮	第 3 轮
11	780	590	200
10	200	300	200
8	210	200	10
6	200	200	0

表 2 第 1 部分各轮的各组盈利
Table 2 Profits of each team in each auction of section one

竞价轮次	盈利/万元					
	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组
第 1 轮	175	177	58	118	59	59
第 2 轮	98	98	49	49	147	88
第 3 轮	0	-39	-137	0	-78	-38

从整体上看,第 1 部分的统一清算价格逐步走低,特别是第 3 轮低谷负荷的统一清算价格竟然接近 0,究其原因,主要是前两轮申报高价的行为受到了惩罚。发电商一旦申报高价成为边际机组,其中标容量必然减少甚至为 0,导致其盈利水平低于同类型发电商。虽然最终奖励的依据是盈利的绝对数量,但是其实质是发电商的相对排名,因此,发电商首先考虑的不是最大化自己的盈利,而是保证自己的盈利不低于其他发电商。在这种竞价思路下,所有发电商都不愿意申报高价,相反却指望其他发电商抬高统一清算价格。无疑,这种行为的结果将会导致统一清算价格偏低。可以看出,取前 3 名优胜者的奖励方案所起的激励作用与电力市场的实际情况不符,需要加以改进。

分析发电商的具体报价策略,总体上遵循了理性思维。所有发电商,无论大小,其报价均随着竞价

负荷的降低而减小;另一方面,发电商的装机容量越大,其报价也相对越高。较典型的例子出现在第 2 轮,小发电商对所有竞价负荷申报零价,中发电商则一律申报边际成本,只有大发电商的报价高于边际成本。这样,高峰负荷的报价博弈其实是在两个大发电商之间进行。事后调查发现,发电商在确定报价时,重点研究同类型发电商的报价策略,而对其他类型发电商的报价策略考虑较少。此外,在第 3 轮,最高限价提高后,没有发现发电商报价随之提高。

1.2.2 第 2 部分(边际成本不同,标书公布)

第 2 部分各轮的统一清算价格及盈利分别如表 3、表 4 所示。

表 3 第 2 部分各轮的统一清算价格
Table 3 Market clearing prices of each auction in section two

竞价负荷/GW	统一清算价格/(元·MW ⁻¹)		
	第 1 轮	第 2 轮	第 3 轮
11	300	790	1 200
10	200	550	1 200
8	200	200	200
6	190	190	200

表 4 第 2 部分各轮的各组盈利
Table 4 Profits of each team in each auction of section two

竞价轮次	盈利/万元					
	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组
第 1 轮	147	147	20	20	0	0
第 2 轮	188	188	74	74	240	399
第 3 轮	180	180	390	694	400	400

在第 2 部分,大发电商的边际成本最低,中发电商次之,小发电商最高。在这种劣势下,小发电商只有 1 个理智选择,即对所有竞价负荷申报边际成本。不过,我们多次发现一个出乎意料的现象:小发电商在低谷负荷申报高价,有时甚至申报最高限价。仔细分析并结合事后调查,认为这是小发电商有意采用的战术策略。由于在第 2 部分所有标书都现场公布,因此其他发电商的报价策略成为各发电商进行下一轮报价重点考虑的因素。而在低谷负荷下,小发电商中标的可能性极小,于是干脆放弃中标机会,故意乱报价格,扰乱竞争对手对自己真实报价策略的研究,以期在后面竞价博弈中获得更大的盈利。

中发电商和大发电商在低谷负荷的报价呈现一定的规律性,大发电商的报价一般高于自己的边际成本,低于中发电商的边际成本;类似地,中发电商的报价一般高于自己的边际成本,低于小发电商的边际成本。有些发电商的报价经常略高于自己的边际成本,这是因为申报边际价格即使中标,其盈利仍然为 0,所以不如稍微提高报价合算;另一方面,在高峰负荷下,大发电商和中发电商都存在申报高价

的行为,这说明一旦有机会,发电商就有可能利用市场力来抬高电价。

在第3轮的高峰负荷,统一清算价格为提高后的最高限价,似乎说明提高最高限价鼓励发电商申报高价。然而,经过对标书的分析发现,最高限价的出现是第3组代表的大发电商申报高价所致,而其他发电商的报价行为均比较温和。第3组由于在前面5轮的竞价博弈中盈利水平最低,进入前3名已基本无望,因此开始非理性报价,企图搅乱发电商的盈利排名。事实上,第3组这种搅局行为的最大受益者是在该轮同样代表大发电商的第4组,使得第4组的总盈利一举超过第6组,成为本次博弈实验的第1名。由此,所设实验奖励方案的不合理性再次得到证实。

1.2.3 实验结论和经验教训

通过这次模拟电力市场竞价行为的博弈实验,可以得出以下结论:①小发电商没有市场力,报价一般在边际成本附近;而中发电商和大发电商在高峰负荷下有可能利用其市场力申报高价。②边际成本相同和边际成本不同情况下,发电商的报价策略存在较大区别,相同类型发电商的报价策略具有较大的相似性。③标书公布情况下,小发电商在低谷负荷可能故意胡乱报价,以扰乱竞争对手对其报价策略的研究。

博弈实验的方案设计暴露出来的主要问题有:①取前3名的奖励方案是不可取的,需要发展与市场实际情况相符的奖励方案。②测试项目太多,而实验轮数有限,导致实验结论的可靠性不高。例如,提高最高限价后并未发现发电商的报价随之提高,而且由于测试轮数只有2轮且这2轮报价的市场环境不同,所得结论没有通用性。另外,测试项目过多也使实验的公平性难以保证。③允许发电商报价低于边际成本有可能引发发电商之间的恶性竞争,导致发电商的正常成本难以回收(如第1部分第3轮出现的情况),因此,这条实验规则应进行修改。

2 第2次竞价博弈实验

为了研究非合作博弈理论特别是 Nash 均衡理论在电力市场竞价博弈中的应用,同时对第1次竞价博弈实验的不足之处加以改进,我们在事隔3个星期后进行了第2次竞价博弈实验。这次实验主要针对第1次实验暴露出的问题修改了实验规则,目的是使实验环境更加符合实际,实验规则更加公平有效。实验规则的修改之处如下:①奖励方案改为按各组最终盈利的大小比例分配总额为300元的奖金(这样修改的用意在于杜绝搅局行为的出现,因为根据新的奖励方案,搅局行为首先意味自己的利益

受损);②在所有轮数中最高限价保持不变,均为800元/MW;③规定各组的报价不得低于所代表发电商的边际成本。另外,基于竞价博弈的 Nash 均衡理论^[4,5],我们事先计算出边际成本相同和边际成本不同两种情形下市场统一清算价格的 Nash 均衡点(计算方法及相应的引理见附录A),以便对比研究 Nash 均衡点电价与实际清算价格之间的关系,验证利用 Nash 均衡理论指导发电商报价的可行性和有效性。

2.1 第1部分(边际成本相同,标书保密)结果分析

第1部分各轮的统一清算价格及其 Nash 均衡点分别如表5、表6所示。

表5 第1部分各轮的统一清算价格
Table 5 Market clearing prices of each auction in section one

竞价负荷/GW	统一清算价格/(元·MW ⁻¹)		
	第1轮	第2轮	第3轮
11	700	780	400
10	600	590	200
8	200	210	200
6	200	200	200

表6 边际成本相同情形下的 Nash 均衡点
Table 6 Nash equilibrium points in the case of same marginal costs

竞价负荷/GW	报价/(元·MW ⁻¹)			Nash 均衡点/ (元·MW ⁻¹)
	小发电商	中发电商	大发电商	
6	200	200	200	200
8	200	200	200	200
10	200	200	800	800
11	200	200	800	800
	200	800	200	800

注意,在每个竞价负荷下的 Nash 均衡点并不一定是惟一的,但是这些 Nash 均衡点代表的统一清算价格却是相同的。Nash 均衡描述了一种稳定状态,处于 Nash 均衡的所有发电商的最优策略都是保持原有报价不变,因为任何偏离 Nash 均衡点的报价都会使得偏离者的盈利减少。

这里特别强调,竞价博弈在达到 Nash 均衡后,发电商的报价策略一般不会改变,但在实际的竞价博弈中,不一定都能达到 Nash 均衡。因为只要有一个发电商不执行 Nash 均衡确定的报价,整个 Nash 均衡状态就可能被破坏,此时按照 Nash 均衡报价的发电商的利益就有可能受损。换句话说,达到 Nash 均衡的前提条件是全体市场成员必须理性行为,一旦出现非理性行为,其他市场成员的利益可能受损。因此,按照 Nash 均衡确定报价是存在实际风险的。另一方面,发电商之间的相互算计心理也有可能影响 Nash 均衡的形成。例如,在10 GW

竞价负荷下,只要有一个大发电商申报800元/MW就能够达到Nash均衡(见表6),然而两个大发电商谁也不愿意这样做,理由非常简单,这样行为的结果是中标容量减少导致盈利减少,而最大的受益者却是对方。因此,两个大发电商的优化目标都是尽可能准确估算对方的报价,然后自己申报一个稍低的价格。显然,在这种情况下是不可能达到Nash均衡的。

对比表5和表6容易发现,在低谷竞价负荷下,Nash均衡点电价与统一清算价格基本相同,而在高峰竞价负荷下,两者存在较大差距。这与上面的分析结果是一致的。再对照表1和表6,我们可以得出同样的结论(第3轮出现恶性竞争,其结果除外)。

2.2 第2部分(边际成本不同,标书公布)结果分析

第2部分各轮的统一清算价格及其Nash均衡点分别如表7、表8所示。

表7 第2部分各轮的统一清算价格
Table 7 Market clearing prices of each auction in section two

竞价负荷/GW	统一清算价格/(元·MW ⁻¹)		
	第1轮	第2轮	第3轮
11	780	800	300
10	300	290	290
8	200	200	200
6	100	190	180

表8 边际成本不同情形下的Nash均衡点
Table 8 Nash equilibrium points in the case of various marginal costs

竞价负荷/GW	报价/(元·MW ⁻¹)			Nash均衡点/(元·MW ⁻¹)
	小发电商	中发电商	大发电商	
6	300	200	199.99	199.99
8	300	200	100	200
10	300	200	800	800
11	300	200	800	800
	300	800	100	800

在边际成本不同的情形下,不同类型发电商的报价策略区别相当大。小发电商既无市场力,又无边际成本的优势,因此选择在任何竞价负荷下均申报边际成本是比较明智的。中发电商在低谷竞价负荷下申报边际成本,而在高峰竞价负荷下报价应该稍低于小发电商的边际成本,这样做能够保证自己在高峰竞价负荷下全部容量中标,既避免了申报高价的市场风险,又可以享受大发电商抬高电价带来的好处。大发电商在低谷竞价负荷下报价稍低于中发电商的边际成本是最优策略,本来在高峰竞价负荷时段把电价抬到最高限价也是最佳选择,但是由于存在两个大发电商,两者都想报价比对方稍低,因此两个大发电商之间的博弈结果将决定高峰竞价负荷下的统一清算价格。发电商的实际报价证实了以

上分析结果。

再来研究Nash均衡点电价与统一清算价格间的关系。需说明的是,由于实验规定报价的个位数必须为0,因此在6GW竞价负荷下的Nash均衡点电价实际应为190元/MW。理论的Nash均衡点电价199.99元/MW表示电价无限接近200元/MW(Nash准均衡概念),但不能等于200元/MW,因为如果大发电商申报200元/MW,那么他将与中发电商按装机容量比例分摊竞价负荷,这显然是大发电商不愿意接受的结果,也就肯定不是Nash均衡点。同样,我们发现,除个别点外,在低谷竞价负荷下,Nash均衡点电价与统一清算价格基本相同,而在高峰竞价负荷下,两者的差距较大(包括与第1次实验结果的对比)。

2.3 实验结论和经验教训

a. 在低谷竞价负荷下,Nash均衡点电价与统一清算价格基本相同,而在高峰竞价负荷下,两者存在较大差距。

b. 如果市场拥有2个或2个以上大发电商,那么即使单个大发电商的市场力非常大,大发电商之间的博弈也会极大地限制这种市场力的使用,从而使统一清算价格保持在比较合理的水平。

c. 在报价策略中运用Nash均衡理论将有助于发电商获得更大的盈利。

3 结论

通过两次竞价博弈实验,我们发现,奖励方案对实验结果起着关键作用。事实上,奖励方案直接影响实验对象的竞价策略和报价行为,从而间接决定了实验结果的好坏。因此,一个合理的符合实际情况的奖励方案对于取得比较理想的实验结果至关重要。应该指出,修改后的第2次博弈实验的奖励方案虽然消除了搅局行为,在一定程度上更接近市场实际情况,但是与市场实际情况还是相差很大。从本质上分析,主要是因为现在的奖励方案属于常和博弈,即实验对象总的收益是固定的(300元),而在实际的电力市场中,发电商总的收益是可变的,属于变和博弈。正是这个原因,在前者情形下,发电商并不愿意申报高价,因为申报高价虽然能够增加自己的盈利,但给竞争对手带来的盈利更大,使得自己的相对收益反而减少;而在后者情形下,发电商追求的目标是绝对盈利,因此只要能够增加自己的盈利,他并不介意充当好人把电价抬高。这也很好地解释了为什么在两次竞价博弈实验中均未出现串通报价行为的原因。因为串通报价的发电商在提高自己盈利的同时会给未参与串通报价的发电商带来更大的好处,反而使得串通报价的发电商的相对收益减少,因

此在常和博弈中进行串通报价是得不偿失的;反之,在现实的变和博弈中,发电商进行串通报价的动机和可能性都大为增加。

我们认为,竞价博弈实验比较理想的奖励方案应该属于变和博弈,即奖励金额不能固定,这样带来的最大挑战是如何控制实验的成本。为此,以第2次竞价博弈实验为例,我们计算出每组在两部分实验中最大可能的盈利为2 960万元(1 440万元+1 520万元),相应地规定这个最大盈利的奖金为100元,折算出0.034元/万元,然后按照这个标准对各组盈利进行奖励,盈利多少,奖励多少。这样处理之后,使得实验成为变和博弈,与市场实际情况基本一致,同时也成功地控制了实验成本(理论上,最大可能的奖金额度为600元)。根据我们的经验,这个奖励方案将是行之有效的。

博弈实验出现的另外一个问题是有些发电商的报价经常略高于自己的边际成本,原因前面已经分析过。但是这种行为不符合市场实际情况,事实上,边际成本一般包括发电商期望的正常利润和发电生产成本,只是不包括额外利润而已,因此发电商以边际成本中标其实还是有利可图的。为此,必须鼓励实验对象在这种情况下申报边际成本,保持与市场实际情况一致。我们认为,对发电商申报边际成本进行小额奖励是解决这个问题的可行办法。无论是否中标,只要发电商申报边际成本,就能够获得一定的盈利。当然,这个盈利标准必须定得很低,以免影响正常的竞价博弈行为。

鉴于竞价博弈实验在检验和发展电力市场理论方面的重要意义,将本文所做工作进一步深化,开发一套专门用于实验的计算机系统是十分必要的。这个系统的硬件基础为10余台计算机组成的局域网,软件系统由报价系统、结算系统和辅助工具等几部分构成,能够模拟各种市场实际环境,考虑各种与市场博弈密切相关的实际问题,如发电机特性、潮流约束等。在这个系统中,实验对象所处的环境相当接近实际情况,由此得出的实验结果应该具有很高的可信度。我们认为,有了这个系统的支持,很多存在争议的电力市场问题,如最高限价的设置、监管措施对发电商报价的影响等,都可以在一个模拟的真实环境下进行研究和验证,为解决电力市场问题提供一条新途径,具有积极的理论和现实意义。

参 考 文 献

- 1 Ethier R, Zimmerman R, Mount T, et al. A Uniform Price Auction with Locational Price Adjustments for Competitive Electricity Markets. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1999, 21(2): 103~110
- 2 Zimmerman R D, Thomas R J, Gan D, et al. A Web-based

Platform for Experimental Investigation of Electric Power Auctions. Decision Support Systems, 1999, 24(3~4): 193~205

- 3 Contreras J, Conejo A J, de la Torre S, et al. Power Engineering Lab: Electricity Market Simulator. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 223~228
- 4 Gan Deqiang, Xu Jing, Shen Chen. Equilibrium Points in Power and Reserve Auction Games. In: Proceedings of 35th Southeastern Symposium on System Theory. Piscataway (NJ): IEEE, 2003. 278~282
- 5 甘德强,王建全,胡朝阳(Gan Deqiang, Wang Jianquan, Hu Zhaoyang). 联营电力市场的博弈分析:单时段情形(Auction Games in Pool-based Electricity Markets: Single-period Case). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2003, 23(6): 71~76

附录 A

Nash 均衡点的计算和价格竞争引理

A1 边际成本相同的情形

以竞价负荷10 GW为例,Nash均衡点的统一清算价格为 $\rho^*=800$ 元/MW,此时边际发电商是任意一个大发电商,申报最高限价,其他发电商申报边际成本。

证明:任意一个大发电商申报最高限价,获利为60万元;如果其报价在200元/MW与800元/MW之间,获利将减少;如果他申报边际成本,获利为0,所以他没有动机偏离现在的报价。其他发电商的全部容量中标并且统一清算价格为可能的最高价,已经获得了最大收益,因此他们也没有动机改变报价。因此 $\rho^*=800$ 元/MW是一个Nash均衡点。

再来分析一个大发电商作为边际发电商这种情况是否惟一。考虑以下情况:①由大发电商以外的一个发电商作为边际发电商。显然,在10 GW竞价负荷下,这种情况是不可能存在的(非边际发电商的中标容量已经可以满足负荷)。②由几个发电商同时设定统一清算价格。根据文献[5]中的价格竞争引理,此时不存在Nash均衡,所以在10 GW竞价负荷下如果存在Nash均衡,只能由一个大发电商做边际发电商,所有Nash均衡点的统一清算价格均为 $\rho^*=800$ 元/MW。

A2 边际成本不同的情形

以竞价负荷10 GW为例,考虑以下3种情况:

a. 任意一个大发电商做边际发电商,申报最高限价,其他发电商申报边际成本。此时,边际发电商获利为70万元,其他发电商满发。此时存在Nash均衡,均衡点的统一清算价格为 $\rho^*=800$ 元/MW。

b. 任意一个中发电商做边际发电商,其他发电商申报边际成本,有以下几种情况:①中发电商报价200元/MW,获利为0,有动机改变报价策略;②中

发电商报价 299.99 元/MW, 获利为 19.998 万元, 而此时大发电商获利为 59.997 万元, 小于 70 万元, 因此, 大发电商有动机改变报价策略; ③中发电商报价 300 元/MW, 获利为 10 万元, 低于情况②, 有动机改变报价策略; ④中发电商的报价高于 300 元/MW, 获利为 0, 有动机改变报价策略。

因此, 中发电商做边际发电商的情况下不存在 Nash 均衡。

c. 任意一个小发电商做边际发电商通常是不可能的。

所以, 在 10 GW 竞价负荷下如果存在 Nash 均衡, 只能由一个大发电商做边际发电商, 所有 Nash 均衡点的统一清算价格均为 $\rho^* = 800$ 元/MW。

A3 价格竞争引理

考虑一种出力调度情况 (P^*, ρ^*) , P^* 指参与竞价的系统负荷, ρ^* 指统一清算价格, $\hat{L}$ 指剩余负荷 (系统负荷减去非边际机组的中标容量), $\bar{P}_i$ 指各边际机组的出力上限。如果 ρ^* 由 n 个博弈者所拥有的发电机同时确定, 满足 $\hat{L} < \sum_{i=1}^n \bar{P}_i$, 那么这种情况不是均衡状态。证明如下。

a. 当机组边际成本相同 (都为 c) 时, 价格竞争引理的证明详见文献[5]中的引理。需要补充的一点是此时统一清算价格 $\rho^* > c$ 。因为在弱容量约束下, $\rho^* = c$ 有可能是市场的均衡点。

b. 当机组边际成本不同时, 证明类似。不失一般性, 考虑以下情形: 发电机 1 (由博弈者 C 所有, 边际成本为 c_1) 和发电机 2 (由博弈者 D 所有, 边际成本为 c_2) 共同确定统一清算价格, 机组的边际成本满足 $c_1 < c_2$, 且由博弈者 C 和博弈者 D 共同确定的统一清算价格 $\rho^* \geq c_2$, 那么供应商 C 的利润为:

$$\dot{\pi} = \sum_{j \in C, p_j < \rho^*} (\rho^* - c_j) \bar{P}_j + (\rho^* - c_1) \hat{L} \frac{\bar{P}_1}{\bar{P}_1 + \bar{P}_2} \quad (A1)$$

$j \in C, p_j < \rho^*$ 指供应商 C 中标的下边际 (infra-

marginal) 发电机, 因此, 式 (A1) 等号右边第 1 项表示供应商 C 的非边际发电机获得的利润, 这一项可以是 0。注意, $\hat{L}$ 可以大于也可以小于 $\bar{P}_1$ 。

假设发电机 1 的报价降为 $\rho^* - \eta$, 这里 η 是一个小正数。首先考虑 $\hat{L} \leq \bar{P}_1$, 则新的统一清算价格变成 $\rho^* - \eta$, 博弈者 C 的利润为:

$$\ddot{\pi} = \sum_{j \in C, p_j < \rho^*} (\rho^* - \eta - c_j) \bar{P}_j + (\rho^* - \eta - c_1) \hat{L}$$

$\dot{\pi}$ 和 $\ddot{\pi}$ 的差异如下:

$$\ddot{\pi} - \dot{\pi} = -\eta \left(\hat{L} + \sum_{j \in C, p_j < \rho^*} \bar{P}_j \right) + (\rho^* - c_1) \hat{L} \frac{\bar{P}_2}{\bar{P}_1 + \bar{P}_2}$$

因为 $(\hat{L} + \sum_{j \in C, p_j < \rho^*} \bar{P}_j) > 0$, 且 $(\rho^* - c_1) \hat{L} \cdot \bar{P}_2 / (\bar{P}_1 + \bar{P}_2) > 0$, 因此供应商 C 总能找到一个 (有可能很小) $\eta > 0$, 使得 $\ddot{\pi} - \dot{\pi} > 0$ 。

现在考虑 $\hat{L} > \bar{P}_1$, 新的统一清算价格保持不变, C 的利润如下:

$$\ddot{\pi} = \sum_{j \in C, p_j < \rho^*} (\rho^* - c_j) \bar{P}_j + (\rho^* - c_1) \bar{P}_1$$

$\dot{\pi}$ 和 $\ddot{\pi}$ 的差异如下:

$$\ddot{\pi} - \dot{\pi} = (\rho^* - c_1) \bar{P}_1 \frac{\bar{P}_1 + \bar{P}_2 - \hat{L}}{\bar{P}_1 + \bar{P}_2} > 0$$

以上表示供应商 C 有动机改变发电机 1 的报价, 使其偏离 ρ^* 。如果 C 有多个发电机参与拍卖, 显然可以得到相同的结论。

同样的讨论适用于博弈者 D。

胡朝阳 (1973—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力市场。E-mail: hzy@ec.cednet.gov.cn

许婧 (1973—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力市场。

甘德强 (1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定和电力市场。

DESIGN AND ANALYSIS OF AUCTION EXPERIMENT FOR ELECTRICITY MARKET

Hu Zhaoyang, Xu Jing, Gan Deqiang, Han Zhenxiang

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Auction experiment is useful in examining and developing electricity market theory. A simulation environment of auction game is designed, in which bidding strategies of various generators are discussed, and some useful conclusions are drawn. Especially, the design of auction experiment is discussed in detail. Two auction experiments are designed and conducted to test a game-theoretic result introduced by the authors recently. The experiment results show that the presented experiment is reasonable and effective.

Key words: electricity market; auction experiment; Nash equilibrium