

引入投资决策的电力容量市场均衡分析

张妍¹, 陈启鑫¹, 郭鸿业¹, 王 一², 卢 恩²

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084;

2. 广东电力交易中心有限责任公司, 广东省广州市 510030)

摘要: 针对纯能量市场难以解决发电机组的固定成本回收问题, 国外电力市场已开展了建立容量市场的实践, 以市场化机制形成对机组补偿的价格信号, 保障发电容量充裕性。文中从容量市场机制设计的角度出发, 在考虑市场成员策略行为的前提下, 对引入投资决策的电力容量市场进行了建模与均衡分析。首先, 描述了容量市场的基本机理, 针对容量市场的投资决策问题建立双层均衡模型, 上层模型为寡头主体的最优决策模型, 下层模型为容量市场出清模型; 其次, 利用最优性条件将双层模型转化为单层模型, 运用分段线性化等方法实现模型线性化, 得到混合整数线性规划问题; 最后, 基于中国某省的实际数据进行算例分析, 深入探究了市场主体的策略行为, 揭示了寡头主体抬价时的过度投资行为及其影响因素, 提出限制项目竞标自由度的策略行为规制方法并验证了该方法的有效性。

关键词: 容量市场; 市场均衡; 投资决策; 策略行为; 机制设计

0 引言

20世纪末以来, 许多国家开始了电力工业领域的市场化改革, 电力生产、传输、消费的各个环节逐渐分离, 发电企业面临激烈的市场竞争^[1]。在能量市场中, 为了防止市场主体滥用市场力, 往往会引入严格的市场力监控程序或设置价格上限^[2], 以促使发电企业基于边际成本开展竞争, 这就使得机组的固定成本难以通过纯能量市场得到回收^[3], 需要建立电力容量市场对机组进行补偿, 以促进机组投资, 保障发电容量充裕性^[4-6]。目前, 美国宾夕法尼亚-新泽西-马里兰州、美国新英格兰、美国纽约^[7]、英国^[8]等国家或地区的电力市场均已建立了容量市场。

合理、高效的市场机制设计是市场有序运行的基础, 不少学者对容量市场的机制设计问题展开了研究。文献[9-10]模拟了容量市场机制下市场主体的动态行为, 分析了不同的容量需求曲线设计对于市场的影响; 文献[11]通过多代理仿真分析, 对远期容量市场和年度容量市场2种容量市场机制的实施情况进行了对比; 文献[12-14]对区域联合电力市场的容量市场设计问题进行了建模研究, 以分析地区

间市场机制协调的效果。然而, 现有文献对于容量市场的研究大多基于一个理想化的假设, 即容量市场是一个完全竞争的市场, 这种假设往往与实际情况不符。仅有少数文献考虑了市场主体在容量市场中的策略行为: 文献[15]利用双方博弈模型探究了系统运营商制定的容量需求和市场成员策略行为之间的关系; 文献[16]考察了容量市场中市场成员行使策略行为的可行性, 并对其可能造成的影响进行了实证研究。上述文献对容量市场的策略行为进行了有益的探索, 但未能从市场均衡的角度进行量化分析, 尤其没有考虑容量市场的策略行为与市场主体的投资策略之间的联系。事实上, 容量市场作为一个长期市场, 其市场均衡将形成指导电源投资的价格信号, 与投资行为紧密相关。因此, 在电力市场长期健康发展的愿景下, 有必要对考虑投资决策的容量市场均衡进行深入研究。

中国正处于电力市场化改革的关键时点, 在各个省区电力市场中, 较为普遍地存在发电侧寡头的现象, 尤其是最大的发电集团, 往往呈现出单寡头的市场结构, 如浙江、广东等第一批现货市场试点省份, 浙江省最大的发电集团在省内装机占比超过50%, 广东省最大的发电集团在省内装机占比也接近30%, 而次位发电集团的市场份额不足15%, 远低于最大发电企业^[17]。为此, 本文重点研究了在发电单寡头市场中引入投资决策的容量市场均衡。首

收稿日期: 2020-05-15; 修回日期: 2020-06-16。
上网日期: 2020-08-11。
国家自然科学基金资助项目(U1966204)。

先,对容量市场的基本机理进行了描述,建立了寡头主体的最优决策模型和容量市场出清模型,构建双层均衡模型;然后,利用最优性条件、分段线性化等方法对模型进行转化求解;最后,利用国内某省的实际算例对容量市场机制下市场主体的报价和投资策略进行了分析,并基于容量市场的策略行为特性提出了相应的策略行为规制方法。

1 容量市场概述

容量市场的卖方为容量供应商,包括所有可提供容量支持的存量机组、可在交付年完成建设的待建机组,如燃煤、燃气、资源综合利用、核电等机组类型。容量市场的最终买方为用户,但一般由容量市场运营方代替用户作为容量市场买方参与市场购买未来某一交付年所需容量。在容量市场拍卖前,容量市场运营方对容量交付年所需的目标容量进行预测,生成容量需求曲线参与拍卖,最终产生的容量费用按照一定的规则由用户分摊。

容量市场交易一般提前交付年几年开展,包括确定容量需求曲线、资格审查、一级市场拍卖、二级市场拍卖、容量交付和容量费用结算等流程。在容量市场拍卖中,容量供应商单边报量报价,形成容量供给曲线,容量市场运营方根据特定规则形成容量需求曲线,2条曲线相交得到容量市场出清结果。以英国为例,英国容量市场需求曲线分为3段,由容量价格上限、目标容量、目标容量容差、参考机组成本缺额4个关键参数决定。其中,目标容量容差为容量波动范围,以减少市场操纵风险;参考机组成本缺额为选定参考机组的成本缺额,即参考机组的待回收成本^[8]。容量市场的出清曲线如图1所示。

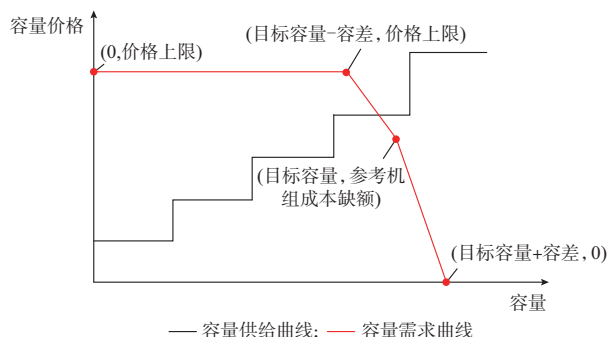


图1 容量市场出清曲线
Fig. 1 Capacity market clearing curves

2 引入投资决策的寡头容量市场均衡模型

在寡头容量市场中,寡头主体通过调整自身报价控制市场出清价格,从而影响容量市场均衡。当寡头主体容量报高价时,容量出清价格将会被抬

高。相应地,由于容量需求曲线存在一定的弹性,抬价后容量需求减少,抬价主体出清容量减少,收益减少。此外,高价格将会吸引更多的待建容量进入市场,增加了容量供给,影响了容量市场均衡。寡头主体抬价增加了单位容量收益,但又导致需求容量减少、供给增加,此时,寡头主体应当如何投资报价以实现自身收益的最大,寡头容量市场如何均衡,需要通过建模定量分析。

寡头容量市场均衡可用一个双层带均衡约束的数学规划问题(mathematical program with equilibrium constraints, MPEC)进行模拟,上层为寡头主体的最优决策模型,下层为容量市场出清模型。上下层模型通过市场成员报价和容量市场出清结果相互耦合,上层模型得到市场成员报价对下层模型市场出清结果产生影响,下层模型得到各机组出清容量和容量市场出清价格,影响了上层模型的市场成员决策。本文分析主要针对单寡头容量市场,对于多寡头的容量市场均衡,可由本模型进一步拓展,将多个MPEC模型联立,构成带均衡约束的均衡问题(equilibrium problem with equilibrium constraints, EPEC)进行求解,如文献[18]所示。

2.1 市场模型假设

本文所建立的容量市场均衡模型满足以下假设。

1)所研究市场为寡头垄断市场,市场中仅有一个寡头主体,为市场价格制定者,其他主体为市场中的价格接受者,按实际成本进行报价。寡头主体和其他主体构成市场中的所有主体。

2)市场中存在若干待建项目,可由市场中的主体自由竞争获取待建项目进行投资建设。在开放的投资项目竞标中,通过投资获益更大的市场主体在竞标中更具有竞争优势。在寡头市场中,寡头主体具有较大的市场份额,能够通过策略定价行为获取更多收益,因此在投标中占据优势。

3)待建项目为整体投资,将由一个主体进行全额或主导投资,对于在实际市场中存在的共同投资现象,认定其主导的决策主体,如最大股东为项目实际运行方参与市场交易。

4)在容量市场拍卖中,所有存量机组和待建项目同台竞价,进行无差别竞争。

5)容量市场拍卖提前容量交付年5年进行,所有容量交易均在一次拍卖中进行,不考虑二级市场和多次拍卖的影响。

6)容量市场拍卖仅允许常规燃煤、燃气、核电和资源综合利用等机组参与,暂不考虑可再生能源、储能、需求侧响应等特殊容量供给类型参与容量市场。

2.2 寡头主体最优决策模型

2.2.1 目标函数

在市场中,市场成员需要对投资项目和机组容量市场报价进行决策,寡头主体的决策目标即为所拥有的存量机组和待建机组总收益之和最大。假设市场中共有存量机组 N 台,待建机组 M 台,定义集合 Ψ 为已有的 N 台机组中属于寡头主体 j^0 的机组组成的集合,则寡头主体最优决策模型的目标函数如式(1)所示。

$$\max \sum_{n \in \Psi} I_n^E + \sum_m I_m^{NM} \quad (1)$$

式中: I_n^E 为存量机组 n 的总收益; I_m^{NM} 为寡头主体从待建机组 m 中获得的收益。 I_n^E 和 I_m^{NM} 的计算分别如式(2)、式(3)所示。

$$I_n^E = \lambda^C P_n^E - C_n^E P_{n, \max}^E \quad (2)$$

$$I_m^{NM} = \lambda^C P_m^{NM} - C_m^N P_m^{IM} \quad (3)$$

式中: λ^C 为容量市场出清价格; P_n^E 为存量机组 n 在容量市场的出清容量; P_m^{NM} 为寡头主体对于待建机组 m 的出清容量; C_n^E 为存量机组 n 的单位容量成本缺额; C_m^N 为待建机组 m 的单位容量成本缺额,由于存量机组已经回收了部分投资成本,因此其成本缺额往往要低于待建机组; $P_{n, \max}^E$ 为存量机组 n 的装机容量; P_m^{IM} 为寡头主体对于待建机组 m 的投资容量。

2.2.2 投资约束

对于待建机组 m ,根据假设最多仅能有一个主体中标投资,则有

$$\theta_m^M + \theta_m^T \leq 1 \quad (4)$$

式中: 0-1 变量 θ_m^M 为市场中的寡头主体对于待建机组 m 的投资决策变量; 0-1 变量 θ_m^T 为市场其他主体对于待建机组 m 的投资决策变量。

对于寡头主体,其投资决策以总体利益最大为目标,不受其他约束。而对于其他主体而言,由于体量较小,其投资与否与单个机组收益有关,若机组成本缺额高于容量市场出清价格,则不予投资,其投资约束如式(5)所示。

$$\theta_m^T = \begin{cases} 0 & \lambda^C < C_m^N \\ 1 & \lambda^C \geq C_m^N, \theta_m^M = 0 \end{cases} \quad (5)$$

定义寡头主体和其他主体对于待建机组 m 的投资容量分别为 P_m^{IM} 和 P_m^{IT} ,满足如下关系:

$$P_m^{IM} = P_{m, \max}^N \theta_m^M \quad (6)$$

$$P_m^{IT} = P_{m, \max}^N \theta_m^T \quad (7)$$

式中: $P_{m, \max}^N$ 为待建机组 m 的可供给最大容量。

寡头主体对于待建机组 m 的出清容量 P_m^{NM} 满足:

$$P_m^{NM} = P_m^N \theta_m^M \quad (8)$$

式中: P_m^N 为待建机组 m 在容量市场的出清容量。

2.2.3 报价约束

对于属于寡头主体的存量机组 n ,其报价不受约束。对于属于其他主体的存量机组 n ,其报价 α_n^E 即为真实成本,存量机组参与容量市场的成本为 0^[19],如式(9)所示。

$$\alpha_n^E = 0 \quad n \notin \Psi \quad (9)$$

对于待建机组 m ,其报价 α_m^N 则根据投资主体的不同分为以下 3 种情形:若投资主体为寡头主体,则其报价以寡头主体总收益最大为目标,报价不受约束;若投资主体为其他主体,则其报价为待建机组的成本缺额;若无主体投资,则其退出市场,体现为报价为一足够大的值 K ,确保其无法在容量市场出清,如式(10)所示。

$$\alpha_m^N = \begin{cases} C_m^N & \theta_m^T = 1 \\ K & \theta_m^M = 0, \theta_m^T = 0 \end{cases} \quad (10)$$

2.3 容量市场出清模型

2.3.1 目标函数

容量市场出清模型的目标函数为总剩余最大,如式(11)所示。为便于模型处理,将容量需求曲线分为 D 段阶梯报价曲线进行近似。

$$\max \left(\sum_d \lambda_d^C D_d^C - \left(\sum_n \alpha_n^E P_n^E + \sum_m \alpha_m^N P_m^N \right) \right) \quad (11)$$

式中: λ_d^C 为容量需求曲线第 d 段的容量需求报价; D_d^C 为容量需求曲线第 d 段的出清容量。

2.3.2 容量平衡约束

存量机组出清容量与待建机组出清容量之和应等于需求侧出清容量,如式(12)所示。

$$\sum_n P_n^E + \sum_m P_m^N = \sum_d D_d^C: \lambda^C \quad (12)$$

约束后的变量代表该条约束对应的对偶变量,容量平衡约束的对偶变量即为容量市场边际统一出清价格 λ^C 。

2.3.3 出清容量约束

对于存量机组 n ,其出清容量上下限约束如式(13)所示;对于待建机组 m ,其出清容量受投资容量的影响,如式(14)所示。其中 $\mu_{n, \min}^E, \mu_{n, \max}^E$ 和 $\mu_{m, \min}^N, \mu_{m, \max}^N$ 为约束对应的对偶变量。

$$0 \leq P_n^E \leq P_{n, \max}^E: \mu_{n, \min}^E, \mu_{n, \max}^E \quad (13)$$

$$0 \leq P_m^N \leq P_m^{IM} + P_m^{IT}: \mu_{m, \min}^N, \mu_{m, \max}^N \quad (14)$$

对于容量需求曲线的分段 d ,其出清容量约束如下所示:

$$0 \leq D_d^C \leq D_{d, \max}^C: \eta_{d, \min}^C, \eta_{d, \max}^C \quad (15)$$

式中: $D_{d, \max}^C$ 为需求曲线第 d 段的需求容量; $\eta_{d, \min}^C$ 和 $\eta_{d, \max}^C$ 为约束对应的对偶变量。

3 双层模型转化求解

3.1 模型转化

利用最优性条件可将下层容量市场出清模型转化为等价的约束条件,如式(12)至式(22)所示^[20]。

$$\sum_n \alpha_n^E P_n^E + \sum_m \alpha_m^N P_m^N - \sum_d \lambda_d^C D_d^C - \left[-\sum_n \mu_{n,\max}^E P_{n,\max}^E - \sum_d \eta_{d,\max}^C D_{d,\max}^C - \sum_m \mu_{m,\max}^N (P_m^{IM} + P_m^{IT}) \right] = 0 \quad (16)$$

$$\alpha_n^E - \lambda^C + \mu_{n,\max}^E - \mu_{n,\min}^E = 0 \quad (17)$$

$$\alpha_m^N - \lambda^C + \mu_{m,\max}^N - \mu_{m,\min}^N = 0 \quad (18)$$

$$\lambda^C - \lambda_d^C + \eta_{d,\max}^C - \eta_{d,\min}^C = 0 \quad (19)$$

$$\mu_{n,\max}^E, \mu_{n,\min}^E \geq 0 \quad (20)$$

$$\mu_{m,\max}^N, \mu_{m,\min}^N \geq 0 \quad (21)$$

$$\eta_{d,\max}^C, \eta_{d,\min}^C \geq 0 \quad (22)$$

约束条件中,式(12)至式(15)为原下层模型的约束条件,式(17)至式(22)为原下层模型的对偶问题的约束条件,其中式(16)利用了强对偶定理,当原问题和对偶问题的目标函数相等时取到最优解。由此,可得到以式(1)为目标函数,以及式(2)至式(10)、式(12)至式(22)为约束条件的引入投资决策的容量市场单层均衡模型。

3.2 模型线性化

模型中包含以下非线性项:①式(2)中的 $\lambda^C P_n^E$ 和式(3)中的 $\lambda^C P_m^N$;②式(8)中的 $P_m^N \theta_m^M$;③式(16)中的 $\alpha_n^E P_n^E$, $\alpha_m^N P_m^N$ 和 $\mu_{m,\max}^N (P_m^{IM} + P_m^{IT})$ 。

对于式(2)、式(3)中的非线性项,可利用分段线性化的方法进行线性化,具体见文献[21]。

式(8)中非线性项为连续变量和二元变量相乘,可将约束(8)转化为式(23)、式(24)。

$$P_m^N - M(1 - \theta_m^M) \leq P_m^{NM} \leq P_m^N + M(1 - \theta_m^M) \quad (23)$$

$$-M\theta_m^M \leq P_m^{NM} \leq M\theta_m^M \quad (24)$$

式中: M 为一足够大的常数,起到松弛约束的作用。

式(16)可等价转换为式(25)至式(30)^[22]。

$$0 \leq P_{n,\max}^E - P_n^E \perp \mu_{n,\max}^E \geq 0 \quad (25)$$

$$0 \leq (P_m^{IM} + P_m^{IT}) - P_m^N \perp \mu_{m,\max}^N \geq 0 \quad (26)$$

$$0 \leq P_n^E \perp \mu_{n,\min}^E \geq 0 \quad (27)$$

$$0 \leq P_m^N \perp \mu_{m,\min}^N \geq 0 \quad (28)$$

$$0 \leq D_{d,\max}^C - D_d^C \perp \eta_{d,\max}^C \geq 0 \quad (29)$$

$$0 \leq D_d^C \perp \eta_{d,\min}^C \geq 0 \quad (30)$$

模型线性化得到的互补松弛约束可用文献[23]所述方式进行线性化。

4 算例分析

4.1 算例数据

算例以国内某省实际数据为基础,容量供给商包括常规燃煤机组、资源综合利用机组、燃气机组、核电机组四大类机组,各类型机组容量占比如图2所示。其中,存量机组86.71 GW,待建机组53.81 GW,总计140.52 GW。其中,存量机组所属主体已经确定;而待建机组尚未确定投资主体,可由市场中的主体自由竞争获取待建机组进行投资建设。最大主体拥有存量机组23.06 GW,占已有总容量的27%。为了降低运算复杂度,在不影响运算结果分析的基础上,本文将属于同一主体的相似机组进行了合并,作为一个容量供应项目参与投标,以减少交易单元数量。简化后的算例中共包含68个容量供应项目,其中,已有项目53个,待建项目15个。算例中机组成本缺额的计算过程见附录A。

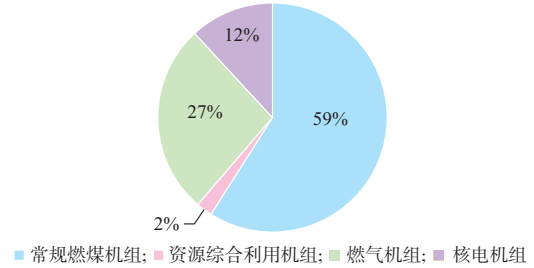


图2 各类型机组容量占比
Fig. 2 Capacity ratio of each type of unit

容量需求曲线包含参考机组成本缺额、容量价格上限、目标容量、目标容量容差4个关键参数。本算例取参考机组成本缺额为40万元/MW;基准场景的容量价格上限取为需求曲线参考机组成本缺额的1.5倍;容量市场的目标容量为132 GW;目标容量容差设为目标容量的6%。

4.2 结果分析

算例应用本文所建立的引入投资决策的容量市场均衡模型,对基准场景与策略场景下市场主体的投资行为、报价行为进行对比分析。基准场景中不包括策略性报价行为,所有机组按实际成本报价,容量市场按照成本高低进行出清和待建项目投资,此场景为理论上的理想场景,反映了稀缺容量的真实成本。策略场景中,寡头主体以自身收益最大为目标进行投资以及存量机组、确定投资的待建机组报价;其他主体由于市场份额较小,无法通过控制市场价格提高收益,因此其最优策略即为按真实成本报价,其他主体的存量机组由于已经投建,参与容量市场的实际成本为0,所以报0价,其他主体确定投资的待建机组按成本缺额报价。

4.2.1 报价行为分析

首先对基准场景与策略场景下容量市场出清结果进行对比,容量市场出清曲线如图3所示。

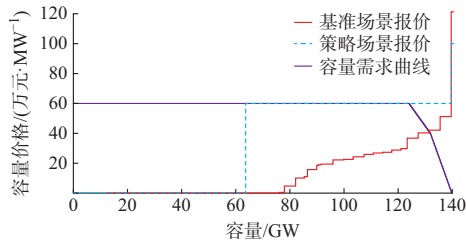


图3 策略前后容量市场出清曲线
Fig.3 Capacity market clearing curves without and with strategy

容量市场出清结果如表1所示。可以看到,市场成员的策略行为大大改变了容量市场的出清结果,增加了用户的容量支付成本。图3中报价为60万元/MW部分的蓝色线段即为寡头主体的报价

段,容量市场中的寡头主体通过牺牲部分出清容量报高价以控制市场出清结果,将市场出清价格抬高到了60万元/MW。此时,用户需要多支付37%的容量费用,却只得到了更少的出清容量。

表1 策略前后容量市场出清结果
Table 1 Capacity market clearing results without and with strategy

场景	出清价格/ (万元·MW ⁻¹)	出清容量/MW	总容量费用/ 亿元
基准场景	41.20	131 473	541.67
策略场景	60.00	124 080	744.48

4.2.2 投资行为分析

表2展示了2种场景下市场主体对15个待建项目的投资结果,其中1代表主体对该项目进行投资,0代表不投资。基准场景中不考虑策略行为,因此对于待建项目的投资主体不进行划分。

表2 策略前后市场主体的投资结果
Table 2 Investment results of market players without and with strategy

项目编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
基准场景投资	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0
策略场景寡头主体投资	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
策略场景其他主体投资	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

对比基准场景与策略场景的投资项目总量可以发现,策略场景市场主体在抬价过程中存在过度投资行为。策略场景的投资项目数为14个,相较于基准场景多投资了3号和13号项目,而由表1可知策略场景的出清容量要少于基准场景,即多投资的项目并不能得到容量市场出清,反而增加了投资成本,造成了过度投资。此外,该部分容量由于没有在容量市场得到出清,没有履行容量支持义务,仍然可能造成能量市场的电力供应短缺。

对比策略场景中不同投资主体的投资项目数可见,在自由竞标场景下,在投标中占据优势的寡头主体将会抢占所有的可投资资源,排挤竞争对手,使其他主体无法获得待建项目。这一结果同样在图3中得到了体现,由于其他主体没有投资待建机组,而寡头主体将其投资的待建机组报价抬高到市场出清价格,导致图3策略场景的报价结果中没有按照成本缺额报价的机组。因此,应当警惕寡头主体利用各种资源抢占投资项目,制造市场进入壁垒,加剧市场的垄断性。需要注意的是,本文中的模型假设本身具有一定的“极端性”,在现实的市场中,基于资金等因素的考虑,寡头主体可能并不会如本文中如此极端,但该结果揭示了寡头主体的一种行为趋势,需

要在机制设计和市场分析中加以考虑。
接下来对寡头主体抬价时过度投资的原因进行分析。容量市场出清价格的抬高,会吸引更多的待建项目进入市场,造成了过度投资。但若寡头主体不进行投资,则其他主体将会以成本缺额对此部分待建项目进行投资报价,挤占了寡头主体其他项目的出清容量。因此,寡头主体将会直接抢占此部分项目,将其抬价到出清价格,即使投资项目因无法出清而亏损,但由于不再挤占寡头主体的其他项目出清容量,寡头主体收益仍要高于不进行投资的场景。

4.2.3 策略行为影响分析

表3展示了2种场景下的寡头主体成本和收益。由上述分析可知,寡头主体将会抢占投资项目,故此处将基准场景投资项目收益归为寡头主体投资项目收益。

表3 策略前后寡头主体的成本和收益情况
Table 3 Costs and profits of oligarch without and with strategy

场景	寡头主体 总投资成本/ 亿元	寡头主体总 缺额成本/ 亿元	寡头主体容 量市场收益/ 亿元	寡头主体总 收益/亿元
基准场景	311.76	90.94	279.41	188.47
策略场景	394.40	128.90	362.55	233.66

由表3可见,策略行为使得寡头主体的总收益增加。尽管寡头主体的过度投资增加了其总体投资成本,导致总缺额成本增加,但是过度投资也使得寡头主体得以抬高容量市场价格,其容量市场收益同样增加,最终策略场景的寡头主体总收益仍高于基准场景,这一结果也解释了寡头主体的抬价行为动机。

表4对策略报价前后市场主体和用户的成本及收益情况进行了展示。

表4 策略前后市场主体和用户的成本和收益情况
Table 4 Costs and profits of market players and users without and with strategy

场景	其他主体总收益/亿元	用户容量费用/亿元	机组总体亏损比例/%
基准场景	312.44	541.67	1.74
策略场景	328.34	744.48	12.73

由表4可知,由于寡头主体抬高了容量市场出清价格,其他主体“搭便车”使得总收益增加;但容量价格的抬高却大大增加了用户的容量成本。此外,策略行为也恶化了电力市场的运营环境:一方面,抬价使得出清容量减少,得到补偿的机组容量减少,而主体的过度投资行为又使得相当一部分无法得到出清的机组投资亏损,导致机组的总体亏损比例增加,减弱了容量市场进行机组成本补偿的作用;另一方面,策略行为也使得寡头主体的市场份额由存量机组的27%扩大到了策略投资后的54%,进一步增强了寡头主体的市场力,需要市场机制设计者和市场运营者加以关注。

4.3 策略行为影响因素分析

本节对待建项目对于寡头主体策略行为的影响进行了探究。假设在原来15个待建项目的基础上,新增5个待建项目,表5展示了新增待建项目分别为成本缺额低于基准场景出清价格的低成本项目、成本缺额略高于基准场景出清价格的中等成本项目,以及成本缺额远高于基准场景出清价格的高成本项目3种情况下容量市场的出清价格和投资情况。

表5 新增不同成本待建项目的市场出清结果
Table 5 Market clearing results of new pending projects at different costs

新增待建项目成本	基准场景出清价格/(万元·MW ⁻¹)	策略场景出清价格/(万元·MW ⁻¹)	基准场景投资数	策略场景投资数
低成本	35.93	60.00	13	19
中等成本	41.20	42.12	12	12
高成本	41.20	51.18	12	13

由表5可知,待建项目的数量和成本缺额将会对寡头主体的策略行为产生影响。待建项目的数量较多时,寡头主体的抬价和过度投资冲动较小,但其作用效果与新增待建项目的成本相关。若新增项目成本低于基准场景出清价格,则对于策略行为影响较小;但若新增项目成本高于基准场景出清价格时,其成本在一定程度上决定了市场出清结果,成本缺额越高,策略场景出清价格越高,投资数量越多。

5 规制场景分析

由上述分析可知,容量市场中寡头主体通过过度投资进行抬价。因此,若对寡头主体的投资行为加以约束,能够有效抑制市场主体的策略行为。本章考虑通过限制项目竞标自由度的方式规制市场主体的策略行为,并对该规制场景的有效性进行了考察。规制场景规定所有待建项目中,有一部分待建项目仅可由其他主体决定是否投资,寡头主体无法投资,除去该部分待建项目后剩余的待建项目由所有主体自由竞标。本算例中仅开放5个待建项目供市场主体自由竞标,约占可投资总容量的30%,剩余10个项目仅其他主体可投资。

得到容量市场出清曲线如附录B图B1所示,容量市场出清结果如表B1所示,市场主体投资结果如表B2所示。可以看到,该规制手段能够有效抑制寡头主体的策略抬价和策略投资行为。对项目可竞标主体进行一定限制后,容量市场出清价格有所回落,寡头主体的过度投资行为得到抑制。同时,在此场景下其他主体进行了待建项目的投资,缓解了寡头主体阻碍其他主体进入市场的问题。

附录B图B2展示了市场出清价格和投资结果随寡头主体投资容量限制的变化情况。可以看到,随着对于寡头主体投资限制的逐渐增加,市场出清价格逐渐下降,寡头主体投资项目数量逐渐减少,其他主体投资项目数量逐渐增加。因此,可通过调节寡头主体不可投资份额,控制市场的出清价格,改变市场主体的投资项目分配。

本文所提出的限制项目竞标自由度的策略行为规制方法向容量市场机制设计者提供了一种市场力规制思路,能够有效抑制容量市场中的策略行为。由于不同地区电力市场所处环境不同,在具体实践中,需要对寡头主体采取何种程度的限制,如何对寡头主体的投资份额进行约束,则需要根据市场的实际情况确定。

6 结语

本文建立了引入投资决策的寡头容量市场双层

均衡模型,利用国内某省实际数据,对寡头容量市场主体的策略行为进行了深入分析。分析表明,容量市场中市场主体的策略抬价行为往往伴随着寡头主体的过度投资,造成用户容量成本增加、机组亏损比例增加、寡头主体垄断势力增大等问题,需要在机制设计和市场运营的过程中加以关注,待建机组的数量和成本缺额将会影响寡头主体的策略行为。基于上述结论,本文提出了限制项目竞标自由度的策略行为规制手段,并利用算例验证了该规制手段的有效性。本文的研究有助于容量市场设计者在进行长远规划和容量市场设计时厘清市场策略行为对于容量投资的影响,所提出的策略行为规制方法有效抑制了容量市场的策略行为,为中国容量市场的建设提供了有益参考。

在后续的研究中,将进一步考虑容量市场和其他市场的耦合关系,探究多市场耦合背景下的市场均衡。

本文得到广东电力交易中心科技项目(GDKJXM20172986)的资助,谨此致谢!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 夏清,黎灿兵,江健健,等.国外电力市场的监管方法、指标与手段[J].电网技术,2003,27(3):1-4.
XIA Qing, LI Canbing, JIANG Jianjian, et al. Electricity market surveillance summary [J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 1-4.
- [2] GUO Hongye, CHEN Qixin, XIA Qing, et al. Market power mitigation clearing mechanism based on constrained bidding capacities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4817-4827.
- [3] 鲁刚,文福拴,薛禹胜,等.电力市场环境下的发电容量充裕性:(一)单一能量市场情形[J].电力系统自动化,2008,32(20):5-10.
LU Gang, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. State-of-the-art of studies on generation capacity adequacy in electricity market environment: Part one energy-only market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 5-10.
- [4] CRAMTON P, OCKENFELS A, STOFT S. Capacity market fundamentals [J]. Economics of Energy & Environmental Policy, 2013, 2(2): 27-46.
- [5] 郭乐,张丹丹.几种基于可靠性指标的容量支持机制电力市场分析[J].华电技术,2019,41(11):12-17.
GUO Le, ZHANG Dandan. Analysis on several capacity support mechanisms in electric market based on reliability index [J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 12-17.
- [6] 喻芸,荆朝霞,陈雨果,等.电力市场环境下典型发电容量充裕性机制及对我国的启示[J].电网技术,2019,43(8):2734-2742.
YU Yun, JING Zhaoxia, CHEN Yuguo, et al. Typical generation resource adequacy mechanism in electricity market and enlightenment to China [J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2734-2742.
- [7] PORTER K, STARR K, MILLS A. Variable generation and electricity markets [EB/OL]. [2020-03-30]. https://www.researchgate.net/publication/284550575_Variable_Generation_and_Electricity_Markets.
- [8] 侯孚睿,王秀丽,锁涛,等.英国电力容量市场设计及其对中国电力市场改革的启示[J].电力系统自动化,2015,39(24):1-7.
HOU Furui, WANG Xiuli, SUO Tao, et al. Capacity market design in the United Kingdom and revelation to China's electricity market reform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 1-7.
- [9] HOBBS B F, HU M C, INON J G, et al. A dynamic analysis of a demand curve-based capacity market proposal: the PJM reliability pricing model [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 39(24): 1-7.
- [10] HU M C, HOBBS B F. Dynamic analysis of demand curve adjustment and learning in response to generation capacity cost dynamics in the PJM capacity market [C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 20-24, 2008, Pittsburgh, USA: 6p.
- [11] BHAGWAT P C, MARCHESELLI A, RICHSTEIN J C, et al. An analysis of a forward capacity market with long-term contracts [J]. Energy Policy, 2017, 111: 255-267.
- [12] MEYER R, GORE O. Cross-border effects of capacity mechanisms: do uncoordinated market design changes contradict the goals of the European market integration? [J]. Energy economics, 2015, 51: 9-20.
- [13] CEPEDA M. Assessing cross-border integration of capacity mechanisms in coupled electricity markets [J]. Energy Policy, 2018, 119: 28-40.
- [14] GORE O, VANADZINA E, VILJAINEN S. Linking the energy-only market and the energy-plus-capacity market [J]. Utilities Policy, 2016, 38: 52-61.
- [15] JOUNG M, BALDICK R, KIM J. Strategic behavior in electricity capacity markets [C]// Hawaii International Conference on System Sciences, January 5-8, 2009, Big Island, USA: 6p.
- [16] TEIRILÄ J, RITZ R A. Strategic behavior in a capacity market? The New Irish electricity market design [J]. The Energy Journal, 2019, 40: 105-126.
- [17] 陈政,张翔,马子明,等.引导电力供需长期有效均衡的容量市场设计 [J/OL]. 中国电力 [2020-04-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20190905.1134.008.html>.
CHEN Zheng, ZHANG Xiang, MA Ziming, et al. A capacity market design guiding the long-term effective balance of power supply and demand [J/OL]. Electric Power [2020-04-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20190905.1134.008.html>.
- [18] GUO Hongye, CHEN Qixin, XIA Qing, et al. Electricity wholesale market equilibrium analysis integrating individual risk-averse features of generation companies [J]. Applied Energy,

- 2019, 252.
- [19] CRETÍ A, FABRA N. Supply security and short-run capacity markets for electricity [J]. *Energy Economics*, 2007, 29(2): 259-276.
- [20] RUIZ C, CONEJO A J, SMEERS Y. Equilibria in an oligopolistic electricity pool with stepwise offer curves [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 27(2): 752-761.
- [21] GUO Hongye, CHEN Qixin, XIA Qing, et al. Modeling strategic behaviors of renewable energy with joint consideration on energy and tradable green certificate markets[J/OL]. *IEEE Transactions on Power Systems* [2020-04-06]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8897020>.
- [22] MOTTO A L, ARROYO J M, GALIANA F D. A mixed-integer LP procedure for the analysis of electric grid security under disruptive threat [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(3): 1357-1365.
- [23] FORTUNY-AMAT J, MCCARL B. A representation and economic interpretation of a two-level programming problem [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1981, 32(9): 783-792.
- 张妍(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力市场。E-mail:zhangyanthu0731@163.com
- 陈启鑫(1982—),男,通信作者,副教授,主要研究方向:电力市场、低碳电力技术、电力调度、能源互联网、大数据技术等。E-mail:qxchen@tsinghua.edu.cn
- 郭鸿业(1993—),男,博士研究生,主要研究方向:电力市场、机器学习、均衡分析、机制设计等。
- (编辑 章黎)

Equilibrium Analysis of Power Capacity Market Incorporating Investment Decision

ZHANG Yan¹, CHEN Qixin¹, GUO Hongye¹, WANG Yi², LU En²

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Guangdong Power Exchange Center Co., Ltd., Guangzhou 510030, China)

Abstract: In view of the difficulty in solving the fixed cost recovery problem of generating units in the energy-only market, the overseas power markets have launched the practice of establishing capacity markets, forming price signals for unit compensation with a market-based mechanism to ensure the sufficiency of generating capacity. From the perspective of capacity market mechanism design, this paper conducts modeling and equilibrium analysis of the power capacity market with investment decision on the premise of considering the strategic behavior of market members. Firstly, the basic mechanism of capacity markets is described, and a two-layer equilibrium model is established for the investment decision problem of capacity markets. The upper model is the optimal decision model of the oligarch and the lower model is the capacity market clearing model. Secondly, the two-layer model is transformed into a single-layer model by using the optimality condition. While the model is linearized by piecewise linearization, the mixed-integer linear programming problem is obtained. Finally, based on the actual data of one province in China, this paper makes a case study of the strategic behavior of market players, reveals the excessive investment behavior and its influencing factors of the oligarch during bidding period, proposes a strategic behavior regulation method based on limiting the freedom of project bidding, and verifies the effectiveness of this method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1966204).

Key words: capacity market; market equilibrium; investment decision; strategic behavior; mechanism design

