

基于PJM容量市场的需求响应优化策略研究

江海龙,董晨景,李永波,程鸿鹄,杨娜,刘丽
(安徽电力交易中心有限公司,合肥 230011)

摘要:随着清洁能源的推广,容量充裕性在电网中发挥着更重要的作用。然而,容量市场机制在国内并没有得到充分的发展。通过分析国内外容量市场的研究现状,确定容量充裕性的定义和规则,参考PJM实践经验建立容量市场的出清模型。为了发挥需求响应在市场中的优势,考虑容量市场的特点,设计容量市场中需求响应的竞价策略。

关键词:容量市场;电力市场;电力经济;需求响应;竞价策略

Research on demand response modeling strategy in PJM capacity market

JIANG Hailong, DONG Chenjin, LI Yongbo, CHENG Honghu, YANG Na, LIU Li
(Anhui Electric Power Trading Center Co., Ltd., Hefei 230011, China)

Abstract: With the promotion of clean energy, capacity adequacy is playing a more important role in the grid. However, the capacity market mechanism has not been fully developed in China. By analysing the current status of capacity market research at home and abroad, the definition and rules of capacity adequacy are determined, and the clearing model of capacity market is established with reference to foreign practical experience of PJM. In order to play the advantages of demand response in the market, the characteristics of the capacity market is considered and a bidding strategy for demand response in the capacity market is designed.

Key words: capacity market; electricity market; electricity economy; demand response; bidding strategy

0 引言

随着电力市场化的兴起,电力系统可靠运行的责任由垄断的电力企业转向竞争的市场,原本垄断的电力企业所担负的电力可靠性义务被打散^[1]。原先的电网作为垄断企业,需要制定电力计划,并对其负责。市场化后,电力系统统一规划的缺失和电力市场化带来的其他未知因素引起了人们对电网可靠性的担忧。因此,需要设计合适的市场机制和参与策略来激励和引导电力市场成员。需求响应参与容量市场能够提高市场竞争力,促进市场良性发展^[2]。本文参考美国PJM市场设计了市场机制,并提出需求响应参与容量市场的收益模型与策略。通过对某地典型工作日的需求响应模拟,评估了模型的性能,模型参数与资源响应结果呈线性关系,合理设置参数能够提升响应收益。

1 国外容量市场机制及经验

近年来,我国部分省份煤电机组容量利用率低,导致收益下降。为保障电力系统容量充裕性及燃煤

机组的合理收益,全国多省份陆续出台了电力可靠性相关的支持政策,确保容量充裕性其中重要的一环。

在欧美,许多国家提出了容量市场作为保障容量宽裕度的措施。容量市场是一种经济激励机制,使机组能够获得能量市场和辅助服务市场以外的稳定收入,从而鼓励机组建设,保障系统的容量充裕性与灵活性^[3-4]。容量市场在国际上广泛实践,但在市场机制设计与核心制度安排方面大相径庭。总体上按照有无集中代理购买划分为集中式和分散式两类,但与传统单一电能量市场中的概念涵义不同。目前以英国、美PJM和纽约等集中式模式占主流,法国等分散式模式较少。建立容量市场,确立容量补偿机制,能够确保发电充裕度和系统运行安全,有利于电力市场长期的可持续发展。

国外电力市场中已有的容量市场实践中,美国PJM区域电力市场和英国容量市场的设计较为完备,对于我国容量机制的发展具有更好的借鉴意义。

1.1 PJM容量市场

自1927年运行以来,PJM的独立系统运营商(independent system operator, ISO)对各个市场成员提出相应的容量义务要求,以保证供电可靠性,若市场成员提供的容量不足,则需要支付罚款。该规定导致了容量灰色市场的形成,当市场中存在净过剩产能时,市场成员竞相将容量出售给容量暂时短缺的成员。对于新的市场参与者而言,较小的体量

限制了其提供容量的能力,普遍只能在灰色市场中购买容量义务,成本的增加影响了新能源机组的发展与市场良性竞争。

针对竞争和进入壁垒问题,1999年,PJM创立了容量市场,即容量信用市场(capacity credit market, CCM)。CCM中,负荷服务实体(load serving entity, LSE)通过日前、月度和多月市场上的交易来购买容量,以实现自己的容量义务^[5]。

经过几年的实践,CCM暴露出许多问题,其缺乏市场权力限制规则,导致了事实上容量所有权的高度集中,市场力的匮乏导致每日容量的边际成本实际上为零,从2005年开始,出清价格趋近于零。在CCM运行期间,PJM保障了可靠性,拥有充足的容量裕度,然而,该机制是不可持续的,在合理性、竞争性和可靠性等方面亟需市场机制的创新改革。

2007年,PJM开发并实施了一种全新的容量市场机制,即可靠性定价机制(reliability pricing model, RPM)。RPM机制能够很好地解决市场可持续性的问题,通过市场信号激励新容量储备的建设。RPM将容量定义为市场产品,且承认其物理属性。PJM的RPM机制是当前最复杂、最完善的容量机制,国际能源署将其列为容量机制设计的典范^[6]。

PJM容量市场的交易流程包括容量公示、申请交易、资格审查、提交报价、出清结算、追加竞拍6个阶段。

1.2 英国容量市场

英国容量市场同样采用集中出清模式,由英国国家电网公司(national grid company, NGC)负责集中代理购买,所有容量资源均有资格参与市场,包括储能和需求响应。市场采用拍卖方式,由监管机构确定总容量需求及曲线,符合资格的机组必须进行报价,市场出清决定中标量价,据此NGC向容量提供商支付容量费用且分摊给所有供电商,并统筹考虑与发电补贴与支持政策的协同^[7-8]。英国容量市场每年进行两次容量拍卖:

(1) 四年拍卖(T-4):T-4是英国容量市场的主要拍卖形式,针对四年内交付所需的大部分容量进行拍卖。大多数市场参与者都希望尽快进入T-4,以获取价格信息并以此提高收益。

(2) 一年拍卖(T-1):T-1是在每个交付年度之前进行的补充拍卖,通常由未能参与当年T-4拍卖的机组参与。

2 容量市场设计

2.1 需求曲线

参考美国PJM容量市场,设计容量需求曲线如

图1所示。容量需求曲线和出价排序的交叉点表示了最终的拍卖价格。

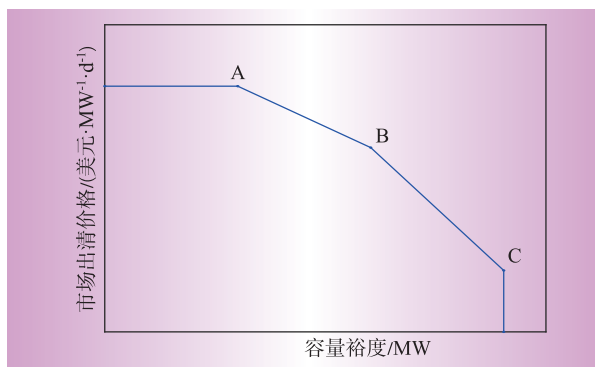


图1 容量市场需求曲线

Fig. 1 Demand curve in capacity market

图1中,横坐标代表了市场中需要的宽裕度容量,纵坐标代表了容量市场此时的出清价格。曲线的各个参数具有关键意义,包括平线价格数值、转折点坐标和曲线倾斜度。这些参数取决于当地的市场条件:发电技术、容量供应过剩和发电的固定成本等。

容量市场运行时,需要根据市场中的机组、负荷指标生成相应需求曲线。A、B、C 3个坐标点与指标的具体关联如表1所示。

表1 需求曲线坐标值

Table 1 Demand curve coordinates

坐标	容量价格/(美元·MW ⁻¹ ·d ⁻¹)	容量/MW
A	$(1.5 C_{\text{net_CONE}})/(1-E)$	$R(I_{\text{RM}}-3\%)/I_{\text{RM}}-L_r$
B	$(1 C_{\text{net_CONE}})/(1-E)$	$R(I_{\text{RM}}+1\%)/I_{\text{RM}}-L_r$
C	$(0.2 C_{\text{net_CONE}})/(1-E)$	$R(I_{\text{RM}}+3\%)/I_{\text{RM}}-L_r$

表1中, $C_{\text{net_CONE}}$ 为新进入机组净成本,对应的是机组在电量市场和辅助服务市场不能回收、需要在容量市场回收的成本,以确保机组的收益能够覆盖其所有成本; R 为可靠性需求指标,代表了为满足可靠性指标所需的自然容量; I_{RM} 是为满足可靠性指标所设定的装机容量裕度,对应峰值负荷的百分数,PJM取值一般为1.15; E 为机组的等效停机率,基于5年历史数据计算而来,拍卖前公开; L_r 为预测的可中断负荷的容量。

在市场中,出清价格的波动会影响容量裕度,进而影响市场的稳定程度。市场价格同时也受容量裕度的限制,存在上下限。如图1所示,价格处在B点时,系统中具有1.01倍的容量裕度,是市场中的理想情况,此时,机组报价为新建机组净成本,系统容量满足可靠性指标且略有盈余。价格处在A点时,对应着0.97倍容量裕度,A点设计为容量价格上限,以防止出现价格尖峰。C点代表了容量产能严

重过剩,此时,为抑制投资,市场价格降为零。

2.2 市场出清模型

(1) 目标函数

市场采用集中出清的方式进行电量和容量交易,机组自主参与市场和申报,本文以社会福利最大化为目标建立出清模型。

假设有 n 个用电企业 L 和 m 个发电企业 G 参与集中撮合交易。用电企业 L_i 申报的电量和价格为 Q_{Li} 和 P_{Li} ,发电企业 G_j 申报的电量和价格为 Q_{Gj} 和 P_{Gj} 。电能量市场中的目标函数为

$$\max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (P_{Li} - P_{Gj}) Q_{ij} \quad (1)$$

式中: Q_{ij} 为用电企业 i 与发电企业 j 的成交电量。

容量市场中的目标函数为

$$\max \left[\sum_{j=1}^m (\alpha P^C Q_j^C) \right] \quad (2)$$

式中: α 为容量价格调整系数,随着系统裕度的变化而变化; P^C 为容量市场出清价格; Q_j^C 为发电企业 j 在容量市场中的成交电量。

2.3 约束条件

(1) 价差约束,价差大于等于零才能成交

$$P_{Li} - P_{Gj} \geq 0 \quad (3)$$

(2) 成交电量约束,成交电量小于等于用电、发电企业申报电量

$$\begin{cases} Q_{ij} \leq Q_{Li} \\ Q_{ij} \leq Q_{Gi} \end{cases} \quad (4)$$

(3) 安全约束,潮流不能越限

$$f_i \leq f_i^{\max} \quad (5)$$

式中: f_i 为电网中的实际功率; $f_i^{\max}$ 为电网功率额定值。

(4) 容量市场限价约束

$$\begin{cases} P_{\min} \leq P_{Li} \leq P_{\max} \\ P_{\min} \leq P_{Gj} \leq P_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{\min}$ 为容量价格下限; $P_{\max}$ 为容量价格上限。

(5) 发电企业申报容量约束

$$0 \leq Q_{Gj} \leq Q_{Gj,\max} \quad (7)$$

式中: $Q_{Gj,\max}$ 为发电企业容量申报上限。

3 需求响应竞价策略

需求响应作为保障电力系统供需平衡的重要手段。随着电力市场化改革的深入,研究电力需求响应与电力市场耦合机制已具备基础条件^[9-10]。引导需求响应参与容量市场可使响应资源获利渠道多元化,充分挖掘调动需求响应资源,促进需求响

应发展。因此,本节设计需求响应参与容量市场的竞价策略。

3.1 容量市场中需求响应产品设计

参考 PJM 的规则,不同 DR 项目在容量市场中的可响应中断次数、响应时间、最大可中断时间等方面存在差异。设计产品如下表2所示。

表2 需求响应产品设计
Table 2 Demand-responsive product design

项目类型	有限需求响应	夏季需求拓展	年度需求响应	基本需求响应
响应期	6月—9月 工作日 时段	6月—10月 及次年5月 全天	该年任意 一天	7月—9月 全天
响应时段	12:00— 20:00	10:00— 22:00	6月—10月、 次年5月: 10:00—22:00; 11月—次年 4月:06:00— 21:00	10:00— 22:00
最长中断时间/h	6	10	6月—10月、 次年5月:12; 11月—次年 4月:15	10
最大中断次数	10	无限	无限	无限

3.2 需求响应经济模型设计

(1) 需求价格弹性

需求价格弹性是指市场商品需求量对于价格变动做出反应的敏感程度,其公式为式(8)

$$E = \frac{dQ}{Q} \frac{P}{dP} \quad (8)$$

式中: Q 为商品的需求量; P 为商品价格。

根据式(6), j 时段价格变动对 i 时段需求量的影响可定义为

$$E(i,j) = \frac{dQ(i)}{Q(i)} \frac{P(j)}{dP(j)} \quad (9)$$

(2) 单时段弹性负荷建模

假设需求响应在容量市场中竞标得容量为 $\Delta Q(i)$, 在 i 时段,响应资源实际用电量为

$$Q(i) = \Delta Q(i) + Q_0(i) \quad (10)$$

式中: $Q_0(i)$ 为需求量的初始值。

若响应资源按合同履行,在 i 时段内提供容量储备,市场将支付容量费用 $C(i)$, 公式为式(11)

$$C(i) = A(i) \Delta Q(i) = A(i) [Q(i) - Q_0(i)] \quad (11)$$

式中: $A(i)$ 为容量市场在 i 时段的出清价格,又称激励系数。

若已经中标的响应资源没有按照合同履行,将

面临罚款。假设资源在 i 时段实际提供的容量为 $Q'(i)$, 其受到的总罚款为

$$P_{EN}(i) = B(i) \{Q'(i) - [Q(i) - Q_0(i)]\} \quad (12)$$

式中: $B(i)$ 为市场规定的惩罚系数。

假设 $R(i)$ 为响应资源在 i 时段内使用电能 $Q(i)$ 生产获得的收益, 那么需求响应在 i 时段总收益如式(13)

$$S = R(i) - Q(i)P(i) + C(i) - P_{EN}(i) \quad (13)$$

令 $\frac{\partial S}{\partial Q(i)}$ 等于零, 可得响应资源收益最大的条件

$$\frac{\partial S}{\partial Q(i)} = P(i) + A(i) + B(i) \quad (14)$$

$R(i)$ 为响应资源生产获得收益, 最常用的模型为二次效益函数

$$R(i) = R_0(i) + P_0(i) [Q(i) - Q_0(i)] \left\{ 1 + \frac{Q(i) - Q_0(i)}{2E(i)Q_0(i)} \right\} \quad (15)$$

通过对式(15)进行微分并将结果带入式(14), 可得

$$P(i) + A(i) + B(i) = P_0(i) \left\{ 1 + \frac{Q(i) - Q_0(i)}{E(i)Q_0(i)} \right\} \quad (16)$$

综上, 需求响应资源在 i 时段的需求量 $Q(i)$ 可表示为

$$Q(i) = Q_0(i) \left\{ 1 + E(i, i) \frac{P(i) - P_0(i) + A(i) + B(i)}{P_0(i)} \right\} \quad (17)$$

(3) 多时段弹性负荷建模

假设该模型以 24 h 为一个收益计算周期, 根据式(17), 可得需求响应资源在 i 时段的需求量 $Q(i)$ 为

$$Q(i) = Q_0(i) \left\{ 1 + \sum_{j=1}^{24} E(i, j) \frac{P(j) - P_0(j) + A(j) + B(j)}{P_0(j)} \right\} \quad (18)$$

(4) 响应负荷经济模型

通过结合式(17)和(18), 得到需求响应负荷经济模型如下

$$Q(i) = Q_0(i) \left\{ 1 + E(i, i) \frac{P(i) - P_0(i) + A(i) + B(i)}{P_0(i)} + \sum_{j=1}^{24} E(i, j) \frac{P(j) - P_0(j) + A(j) + B(j)}{P_0(j)} \right\} \quad (19)$$

(5) 约束条件

需求响应资源运行时, 响应资源的中标容量需小于资源申报的最大可调节容量

$$\Delta Q(i) \leq Q_{\max} \quad (20)$$

激励系数的设置应满足容量市场中的限价要求, 惩罚系数需为正数

$$\begin{cases} A_{\min} \leq A(i) \leq A_{\max} \\ B(i) \geq 0 \end{cases} \quad (21)$$

4 算例分析

为了评估提取模型的性能, 使用了某地工作日负荷数据作为基础参考数据。图2为某地典型负荷曲线。负荷曲线分为3个不同的时期, 即低负荷期(00:00 am—09:00 am)、非高峰期(09:00 am—07:00 pm)和高峰期(07:00 pm—12:00 pm)。

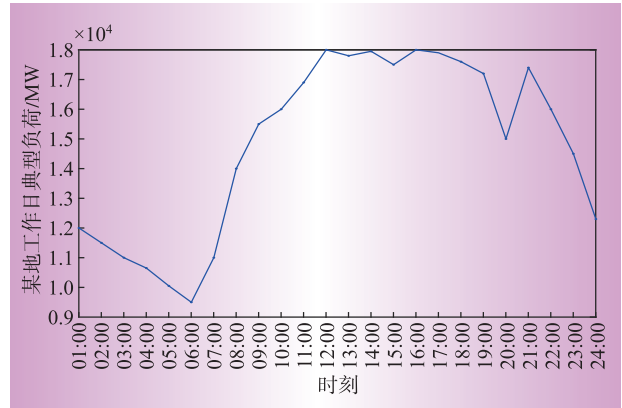


图2 某地工作日典型负荷曲线

Fig. 2 Load curve for working days in a certain place

设计以下3种场景模拟。

场景1: $A(i) = 150$, $B(i) = 0$;

场景2: $A(i) = 75$, $B(i) = 75$;

场景3: $A(i) = 150$, $B(i) = 150$ 。

需求响应资源响应结果如图3所示。

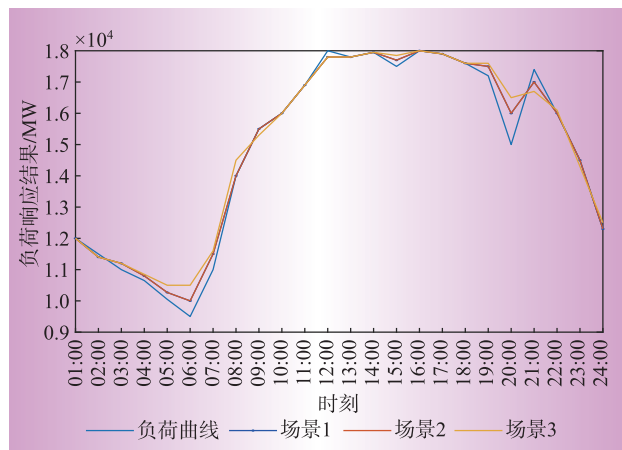


图3 需求侧资源响应结果

Fig. 3 Results of demand-side resource response

场景1、2、3中需求响应资源均在系统宽裕度降低时及时作出反应。在低负荷时段, 需求响应资源增加用电量, 使实时用电量提升; 在高峰时段, 需求响应资源减少运行负荷, 使得实时用电量降低。

场景1中,激励系数 $A(i)$ 为150元/kWh,惩罚系数 $B(i)$ 为0,系统对需求侧资源的响应进行激励,但不对其消极响应行为进行处罚。从响应结果可以看出,在高峰时段,峰值减少了500 MW。场景2中,激励系数 $A(i)$ 为75元/kWh,惩罚系数 $B(i)$ 为75元/kWh,系统对响应进行激励,同时也处罚资源的消极响应行为。在高峰、低谷时段,响应资源的响应结果与场景1相同。场景1和2的曲线重叠,这说明容量市场中的激励和惩罚对补充容量有相同的效果,它们的总和决定了释出容量和负荷的最终值。

场景3中,奖励和惩罚的参数均增加了一倍,为150元/kWh。曲线显示,资源响应的效果更加明显,在高峰时段,峰值减少了1 000 MW。因此,激励、惩罚的参数与需求侧资源的响应结果呈线性关系。通过增加奖励和惩罚的总额,将能够鼓励更多需求侧资源参与到容量市场中。

5 结束语

本文研究了基于PJM的容量市场需求响应优化策略。构建了电力市场环境容量市场的基础模型,设计需求曲线、约束和交易流程。根据需求响应的特点,设计了容量市场中的激励机制和违约惩罚机制,基于需求价格弹性理论建立需求响应资源在容量市场中的收益模型。本模型兼顾市场经济环境和电网物理约束,考虑到容量市场的特殊机制,为需求响应资源参与电力市场多项服务提升综合收益提供依据。在后续研究中,如何增加与其他市场的联动方式、考虑市场与传统响应项目的协调,使策略设计更贴合实际场景,值得进一步探讨。

参考文献:

- [1] 姜勇,李婷婷,王蓓蓓,等. 美国需求响应参与PJM批发电力市场运行及对我国的启示(下)[J]. 电力需求侧管理,2015,17(1):62-64.
JIANG Yong, LI Tingting, WANG Beibei, et al. The demand response to participate in the PJM wholesale electricity market operation and enlightenment to our country[J]. Power Demand Side Management, 2015, 17(1):62-64.
- [2] 蒋燕,陈雨果,孙宇军,等. 美国PJM电力现货市场环境下需求响应机制分析与启示[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(6):96-100.
JIANG Yan, CHEN Yuguo, SUN Yujun, et al. Analysis and enlightenment of demand response mechanism under PJM electricity spot market[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(6):96-100.
- [3] 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.
- [4] 陈政. 面向新型电力系统的容量补偿机制设计[J]. 中国电力企业管理,2022(10):46-49.
CHEN Zheng. Design of capacity compensation mechanisms for new power systems [J]. China Power Enterprise Management, 2022(10):46-49.
- [5] ITO M, TAKANO A, SHINJI T, et al. Electricity adjustment for capacity market auction by a district heating and cooling system [J]. Applied Energy, 2017, 206: 623-633.
- [6] 梁青,许诺,童建中. 美国PJM容量市场的新模式及其对华东电力市场的启示[J]. 华东电力,2009,37(7):1 148-1 152.
LIANG Qing, XU Nuo, TONG Jianzhong. New modes of PJM capacity markets and lessons for east China electricity market [J]. East China Electric Power, 2009, 37(7):1 148-1 152.
- [7] 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.
- [8] 张粒子,唐成鹏. 英国容量市场模式在中国的适用性分析[J]. 电力建设,2016,37(3):124-128.
ZHANG Lizi, TANG Chengpeng. Applicability analysis of british capacity market mode in China [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(3):124-128.
- [9] 王宝,叶斌,朱刘柱,等. 市场环境下我国电力需求响应实践与探索[J]. 电力需求侧管理,2021,23(5):91-95.
WANG Bao, YE Bin, ZHU Liuzhu, et al. Practice and exploration of China's power demand response in electricity market [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(5):91-95.
- [10] 刘军会,刘鑫,李虎军,等. 国外需求响应市场化实施模式及启示[J]. 电力需求侧管理,2021,23(2):95-100.
LIU Junhui, LIU Xin, LI Hujun, et al. Marketization implementation mode and enlightenment of foreign demand response participating in electricity [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(2):95-100.

作者简介:

江海龙(1985),男,安徽合肥人,硕士,高级工程师,研究方向为电力市场。

(责任编辑 郝 逊)