

◆ 环球揽萃 ◆

DOI:10.3969/j.issn.1009-1831.2021.06.019

美国PJM电力现货市场环境下的需求响应机制分析与启示

蒋 燕¹,陈雨果²,孙宇军²,李秀峰¹,高道春¹,周 涵¹,吴 洋¹

(1. 云南电力调度控制中心,昆明 650011;2. 北京清能互联科技有限公司,北京 100084)

Analysis and enlightenment of demand response mechanism under PJM electricity spot market

JIANG Yan¹, CHEN Yuguo², SUN Yujun², LI Xiufeng¹, GAO Daochun¹, ZHOU Han¹, WU Yang¹

(1. Yunnan Electric Power Dispatching and Control Center, Kunming 650011, China; 2. Beijing Tsintergy Technology Co., Ltd., Beijing 100084, China)

摘要:需求响应参与电力市场交易,既有利于发挥其在电力资源优化配置的效果,促进需求响应项目的可持续开展,也能改善市场价格形成机制,降低电力市场运行风险。总结了美国PJM现货市场环境下的需求响应机制与方法,论述了需求响应参与日前、实时电能量市场,备用和调频辅助服务市场的交易组织过程,重点分析了现货电能量市场中的需求响应机制设计原理;最后,结合我国电力现货市场的实际情况,分析需求响应机制对市场交易和调度运行的影响,提出了通过市场化手段促进需求响应项目实施的建议。

关键词:需求响应;现货市场;电能量市场;辅助服务;市场机制

Abstract:The participation of demand response(DR) in electricity market trading can enhance the optimal allocation of electricity resources, promote the DR programs implemented sustainably, improve the price mechanism of electricity market, and reduce the risk of electricity market operation. The DR approaches and mechanism under PJM electricity spot market are concluded. The process of DR participating in day-ahead and real-time electricity market, ancillary service market is described, and the principles related with DR approaches and mechanism in electricity spot market is also analyzed. Finally, based on the spot market in our country, the influence of DR mechanism to market transaction and dispatching is analyzed and suggestions for DR program implementation is proposed as well.

Key words:demand response; spot market; electricity market; ancillary service; market mechanism

0 引言

我国开展试运行的电力现货试点主要是以“用户侧报量不报价”的模式起步,在后续的市场建设中,逐步引入双边报量报价模式,推动电能量与辅助服务市场的联合运营,引导储能和需求响应(demand response, DR)参与市场竞争^[1-2]。

2012年,我国启动了第一批需求侧管理试点城市建设^[3],在江苏等省份形成了常态化的DR机制。随着现货市场建设的推进,如何利用市场机制发挥用户侧的积极性,提高资源优化配置效果,是业内关注的重点问题^[4-5]。

美国PJM市场对世界范围内的电力市场建设和运营具有重要的参考意义。PJM市场中以负荷削减服务提供商(curtailement service provider, CSP)为代表的市场主体,将DR资源引入了批发市场交易^[6]。文献[7]、文献[8]从紧急型DR和经济型DR的角度,分析了DR项目类型及其运营情况。结合PJM市场规

则,本文针对这两种类型的DR参与日前、实时交易组织过程,以及市场机制的原理展开分析。最后,结合我国实际情况提出DR参与市场化交易的建议。

1 DR参与PJM市场交易的范围

PJM电力市场体系包含了中长期、日前、实时市场交易。现货电能量市场采用全电量竞价的模式,中长期和日前电能量的交易结果带有差价合约属性,现货阶段主要涉及电能量和辅助服务交易。PJM的DR主要分为紧急型响应和经济型响应两大类,其子类参与交易的范畴如表1所示^[6,9]。

表1 PJM需求响应参与市场交易的范畴

Talbe 1 Trading range of DR in PJM market

| | DR子类 | 市场交易范畴 |
|-------|--------|-------------------|
| 紧急型响应 | 单一容量型 | 容量市场交易 |
| | 单一电能量型 | 日前、实时电能量交易 |
| | 复合型 | 容量市场、日前/实时电能量交易 |
| 经济型响应 | 单一电能量型 | 日前、实时电能量交易 |
| | 单一调节型 | 调频市场交易 |
| | 复合型 | 日前/实时电能量和备用辅助服务交易 |

收稿日期:2021-09-18;修回日期:2021-10-13

基金项目:云南电网有限责任公司科技项目(056000KK52180006)

2 电能量市场的DR机制及原理分析

2.1 电能量市场中的基线负荷管理

PJM 市场规则中,明确列出了基于对称时段修正的3种典型日计算方法(The 3 day type with SAA)作为推荐的计算方法^[9-10],其步骤包括样本选择、初始基线计算、基线修正。

考虑到DR用户的多样性,PJM还提供了多种可选的用户基线负荷(customer baseline load, CBL)方法^[9,11],其与The 3 day type with SAA的区别如表2所示。

表2 参与电能量市场交易的DR基线计算方法
Table 2 Baseline calculation methods for DR participating in energy market

| 类别 | 计算方法 | 与The 3 day type with SAA的区别 |
|----|-------------------------|---|
| 1 | The 7 day type with SAA | 对周一至周日每天进行初始分类。 |
| 2 | The 3 day type with WSA | 分析负荷与气温的相关系数,根据实际气温与基线样本的平均气温的差值,计算CBL的修正量。 |
| 3 | Max base load | 各响应时段平均负荷的最低值作为全部时段的CBL。 |
| 4 | Same day 3+2 | 响应开始前2至3 h,以及响应结束后2至3 h,共5 h的负荷平均值作为CBL。 |
| 5 | Match day | 从基线样本日中选取相似性最高的3 h,对应时段的负荷平均值作为CBL。 |

由图2可知,第1类方法在计算过程中细化了响应日的分类,适用于不同工作日之间负荷存在较大差别的用户;第2类方法主要用于温度敏感用户;第3类方法对不同样本日的同一时段负荷分别求平均值,然后取最小值作为全部时段的CBL,实际上是惩罚性的计算方法;第4类和第5类为匹配法,主要用于特殊日期或样本数量较少的场景。PJM还考核DR用户在非事件日内的实际负荷与CBL的偏差,根据相对均方根误差来判别CBL的合理性。

2.2 DR参与电能量交易的竞价机制分析

2.2.1 DR参与现货电能量市场的报价

在PJM日前、实时市场报价阶段,CSP代理DR资源提交“削减电量-价格”曲线。DR的报价方式与发电主体相似,该曲线最多可分10段,市场主体可以选择阶梯型或斜率型两种方式予以提交。未中标的容量,可以在实时市场中竞价。日前报价结束至实时运行前65 min,只允许修改申报的最大、最小容量,不允许修改价格。

DR在日前中标的容量需要物理执行,因此DR资源的日前中标结果不具有差价合约属性。日前未中标的DR容量,才可以继续在实时市场中竞价。

2.2.2 净效益测试的原理分析

PJM将DR纳入电能量市场的重要目的是扩大全社会净效益。一般而言,在供电容量存在缺口、市场价格较高的场景下,才需要引入DR来替代发电资源;否则,仍优先保障发电资源的利用,以减少全社会净效益的损失。因此,PJM设置了净效益测试(net benefit test, NBT)^[10,12]。根据一次能源的价格走势以及机组的历史报价,计算得到净效益价格(net benefit price, NBP)。在补偿环节,仅对节点边际电价(locational marginal price, LMP)高于NBP的时段,参照LMP作为单位补偿标准予以结算^[13]。

PJM将NBP定义为:在对数坐标上,将全部发电侧市场主体的报价拟合得到“容量-价格”曲线;然后计算曲线上各点的斜率,该斜率等于1的点对应的发电侧报价即为NBP。为更好地理解NBP的物理含义,本节分析了供给曲线的斜率与“发电侧报价的弹性系数”具有对应关系,推导过程如下:

令 y_0 表示发电报价曲线 $y(x)$ 上某一点的价格, Δy_0 表示价格增量; x_0 表示曲线上该点对应的申报容量,MW; Δx_0 表示容量增量。由此得到点 (x_0, y_0) 处的价格弹性系数为

$$\xi(x_0, y_0) = \lim_{\Delta x_0 \rightarrow 0} \frac{\Delta y_0 / y_0}{\Delta x_0 / x_0} = y'(x_0) \frac{x_0}{y_0} \quad (1)$$

将机组的申报价格 y 和申报容量 x 在对数坐标中表示,有

$$\bar{y} = \ln y \quad (2)$$

$$\bar{x} = \ln x \quad (3)$$

对数坐标上“容量-价格”曲线的斜率 k ,即为函数 \bar{y} 对自变量 \bar{x} 的倒数

$$k = \frac{d\bar{y}}{d\bar{x}} = \frac{d(\ln y)}{d(\ln x)} = y'(x) \frac{x}{y} \quad (4)$$

比较式(4)与式(1)可知,发电侧报价曲线在对数坐标上的斜率 k ,就是“价格弹性系数”。因此,净效益平衡点反映的物理含义是:超出NBP以后的报价段,由于弹性系数 >1 ,表明继续增加发电的容量供给变得不再经济,引入DR资源来替代部分发电资源。NBP计算流程如图1所示。

NBT机制保障了对DR激励的有效性,而不是在任何时段都对DR中标的电量予以LMP补偿,引导DR主体参考NBP价格进行合理报价,更有利于的提高全社会净效益。

2.2.3 DR参与现货电能量交易组织流程

DR参与现货电能量市场的交易组织流程具体如图2所示。市场申报阶段,参考运营机构发布的NBP,DR与发电机组一同提交分段报价曲线;竞价阶段,运行含DR报价的出清计算程序,输出市场主

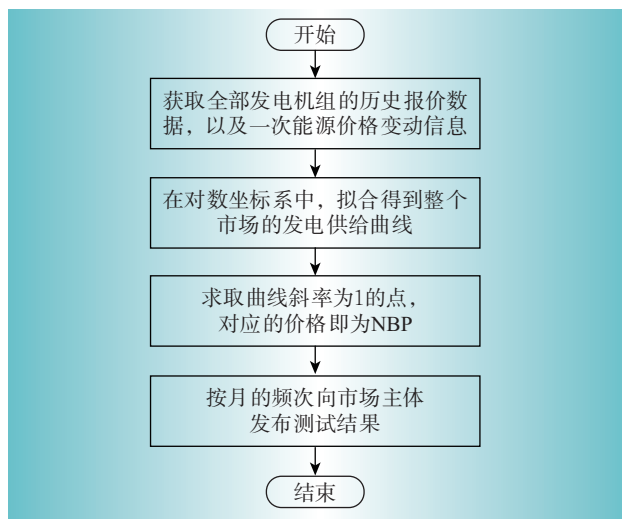


图1 净效益测试的流程

Fig. 1 Net benefit test process

体的中标量价; DR主体应在一定范围内, 按照中标结果来执行响应, 并接受考核与结算。

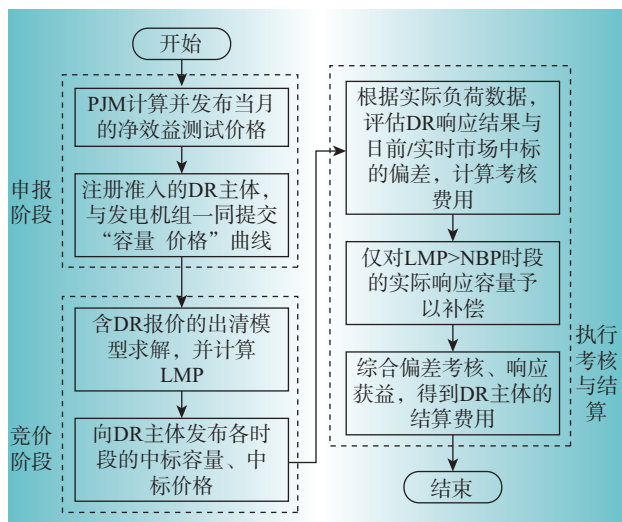


图2 DR参与现货电能交易的组织流程

Fig. 2 Organizing process of DR participating in spot energy market trading

2.3 DR参与电能交易的结算机制分析

参与电能现货市场的DR用户, 要尽量保证实际响应容量满足中标结果的要求。事后执行偏差在中标量 $\pm 20\%$ 以内的部分, 仍按照现货出清价格作结算; 但超出的部分需要进行偏差考核^[13], 执行偏差产生的考核费用称为DR主体的平衡运行备用费。

在结算环节对DR进行偏差考核, 是为了反向激励DR主体按照中标容量来执行响应行为。若不设置上述惩罚机制, 大量现货市场中标的DR容量在实际运行中未执行时, 会导致有功缺额的风险增加, 需转由其它发电侧的资源来提供运行备用, 间接抬高了运行成本。类似的, 在我国部分省区的现货市场中, 中标机组在实际运行中也需要接受非计

划停运的考核。

3 DR参与备用、调频的机制分析

3.1 备用辅助服务市场的DR机制

3.1.1 DR参与备用辅助服务交易的类型

满足电能量交易准入条件的DR, 若计量时间间隔为1 min且准确度偏差不超过2%, 可同时参与日内的备用交易。PJM备用体系中的同步备用包括两类^[14], 参与备用交易的DR资源被视作T2类同步运行备用, DR应在日前14:15申报最大、最小响应容量和价格。DR参与备用辅助服务交易的出清环节与PJM市场的日内出清计算过程相结合^[9,15]。

3.1.2 DR提供备用辅助服务的认证方法

同步备用调节的时效性比电能量市场的要求更高, 结合负荷削减、维持、反弹等特征和调节速率的要求, PJM将DR提供的同步运行备用分为两个环节进行认证^[15]:

(1) 负荷削减过程的有效容量认证

开始时的负荷值与第10 min结束时的负荷值之差, 作为削减过程的有效响应容量。考虑到单一时刻计量偏差的影响, 将削减过程的响应容量计算为

$$D_{\text{start}} = \max(L_0, L_1, L_2) - \min(L_9, L_{10}, L_{11}) \quad (5)$$

式中: D_{start} 为响应削减过程的有效容量; L_0 为响应开始时刻的实际负荷; L_1 至 L_{11} 分别为响应期间对应时段的实际负荷。

(2) 响应维持过程的有效容量认证

若后续响应时段内不发生明显的负荷反弹, 则视作响应维持过程。有效响应容量为

$$D_{\text{keep}} = \max(L_0, L_1, L_2) - \frac{\sum_{i \in T} \max(\min(L_9, L_{10}, L_{11}), L_i)}{N_T} \quad (6)$$

式中: T 为响应维持过程的时段集合; N_T 为响应维持的时长(按分钟计); L_i 为第 i 分钟内的实际负荷。式(6)表明, 如果前10 min内负荷不能完成既定目标的削减, 后续时间内继续减小负荷而产生更多的削减容量, 将不会被认为是有效的削减。

此外, 针对循环控制、恢复调整时间较长的负荷, PJM提供了另一种响应容量的认证方法^[15], 其响应容量应等于事件结束时的负荷与事件开始前10 min内最低的负荷之差。

3.2 调频辅助服务市场的DR机制

参与调频辅助服务交易的DR资源, 需要满足PJM市场的传统/慢速响应性能或动态/快速调频响应性能的要求。DR调频资源只需要具备精确的负荷响应记录条件即可, 无需通过CBL测试。

运行日前 14:15, DR 主体提交调频辅助服务的容量和里程报价, 可调上、下限等信息。在实时市场出清环节, 包括 DR 在内的调频市场中标主体, 会在运行前 30 min 接到调频服务的通知, 市场出清价格以 5 min 的频度更新。

在结算环节, 根据 DR 实际响应结果计算相关度、延迟度和响应精度, 调频性能指标为上述 3 项指标的加权平均值。调频性能指标高于 0.25 的 DR 调频资源才能根据调频市场出清价获取补偿^[15]。

4 我国现货市场环境下的 DR 的应用启示

结合本文分析和我国现货市场建设的实际情况, 总结得到以下启示:

(1) 目前“用户侧报量不报价”的电能量竞价模式下, 建议在出清环节考虑价格弹性的影响并增加可靠性机组组合测试。

现货试点省份在起步阶段大多采用了“用户侧报量不报价”的模式。随着市场化交易的推进, 用户对于市场价格的弹性将逐步体现, 若日前出清得到的 LMP 相对平时发生较大的变动, 可能引起部分用电行为调整。

因此, 刚性需求条件下得到的日前发电计划, 可能与实时阶段的电网运行条件产生一定的冲突, 需要细致的分析现货市场条件下用户的价格弹性。在完成日前市场出清后, 通过可靠性机组组合测试来提高日前发电计划与实时运行条件的匹配程度。

(2) 逐步将 DR 纳入电能量市场竞争, 利用市场机制提高电能的优化配置水平, 增强供需调节能力、降低价格风险。

通过负荷集成商(售电公司)聚合可调节负荷资源, 以 DR 主体的形式参与现货电能量竞价, 该模式对现有规则和现货市场技术支持系统改动相对较小, 有望快速缓解部分地区供电紧张的局面, 也能发挥 DR 市场化机制的作用。

具体而言, 由负荷集成商提交“价格-响应容量”曲线, 纳入日前现货市场出清过程。调度机构根据次日各时段的供需紧张程度, 设定系统正备用低于某一阈值时, 触发 DR 参与电能量市场的竞争。根据出清结果确定 DR 中标容量和 LMP, 并对实际执行容量按照 LMP 予以补偿。待现货市场运营进入成熟阶段, 借鉴 PJM 市场方法引入 NBT 机制, 进一步提高全社会净效益。

DR 参与现货电能量市场的机制, 既有助于缓解电力供需矛盾, 通过现货市场结算来解决 DR 补偿来源的问题; 也有助于降低市场价格风险, 逐步培养

用户侧主体的竞价意识, 推动现货交易稳步开展。

(3) 构建 DR 参与的调峰辅助服务市场机制, 制定适配 DR 资源参与备用、调频的评价方法, 充分发挥用户侧灵活性资源的调节能力。

与国外市场情况不同, 我国市场化交易的辅助服务品种包括调峰、备用和调频, 部分现货试点地区的辅助服务交易与电能量交易相互独立开展。

结合我国实际情况, 引导负荷集成商聚合 DR 资源, 在低谷时段提供负荷上调服务, 与调峰市场的机组一同竞争, 对已建成的调峰市场影响较小, 有利于提高系统运行的经济性, 为后续推动 DR 参与其它辅助服务交易的奠定基础。

还可借鉴 PJM 市场经验, 制定与备用、调频适配的 DR 认证方法, 为挖掘 DR 参与调频、备用的潜力提供评价标准。该标准应满足不同类型辅助服务调节性能的要求, 也要兼顾 DR 可能产生的响应时滞、响应波动和反弹等实际特性。

(4) 提供多种适配性的 CBL 计算方法, 并通过非事件日的偏差考核、CBL 滚动修正等手段, 提高 CBL 的可靠性。

建议提供多种适配的 CBL 计算方法, 并由参与 DR 的用户根据实际来选择, 以此提高 CBL 计算的准确性。例如, 针对周期性的生产负荷, 提供类似于 The 3 day type with SAA 的计算方法, 但是典型日的分类数目, 由用户的生产周期以及同一周期内各日的相似程度而定。

若 DR 主体在非事件时段的实际负荷与 CBL 存在较大偏差, 应在响应负荷认证面予以扣减, 激励用户侧聚集更为优质的 DR 资源。此外, 还可以借鉴成熟市场的 CBL 的动态修正机制, 周期性地(例如 3 个月以上)向用户提供修改 CBL 方法的机会, 以适应用户负荷结构和用电行为的调整, 提高 CBL 的准确性。

5 结束语

本文梳理了 PJM 现货市场环境下的 DR 参与电能量、备用和调频辅助服务的流程与方法, 并重点分析了现货电能量市场环境下 DR 机制的设计原理, 对于现货市场条件下的 DR 机制设计和 DR 项目实施具有借鉴意义。最后, 从 DR 参与电能量和辅助服务的机制设计、CBL 的管理等方面总结了应用启示, 以期为 DR 市场化机制的研究和应用提供参考。随着新型电力系统的建设和碳市场的发展, DR 机制如何应用于低碳能源市场是值得进一步研究的方向。D

参考文献:

- [1] 陈启鑫,房曦晨,郭鸿业,等. 电力现货市场建设进展与关键问题[J]. 电力系统自动化,2021,45(6):3-15.
CHEN Qixin, FANG Xichen, GUO Hongye, et al. Progress and key issues for construction of electricity spot market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6):3-15.
- [2] 莫若慧,余加喜,毛李帆,等. 海南电力现货市场的机制设计比对及建设路径探讨[J]. 广西电力,2019,42(10):1-6,18.
MO Ruohui, YU Jiayi, MAO Lifan, et al. Comparison of the mechanism design and discussion of the development route of electricity spot market in hainan province [J]. Guangxi Electric Power, 2019, 42(10):1-6, 18.
- [3] 张玮. 电力需求响应在城市综合试点中的应用探索[J]. 电力需求侧管理,2013,15(5):23-26.
ZHANG Wei. Application and exploration of demand response in urban comprehensive pilot [J]. Power DSM, 2013, 15(5):23-26.
- [4] 沈运帷,李扬,高赐威,等. 需求响应在电力辅助服务市场中的应用[J]. 电力系统自动化,2017,41(22):151-161.
SHEN Yunwei, LI Yang, GAO Ciwei, et al. Application of demand response in ancillary service market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22):151-161.
- [5] 杨威,曾智健,陈皓勇,等. 广东电力市场需求侧响应交易机制研究[J]. 广东电力,2017,30(5):25-34,68.
YANG Wei, ZENG Zhijian, CHEN Haoyong, et al. Research on demand response trading mechanism in guangdong electricity market [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(5):25-34, 68.
- [6] PJM Demand Side Response Operations. 2019 Demand Response Operations Markets Activity Report[R]. Audubon:PJM Interconnection, 2019.
- [7] 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(上)[J]. 电力需求侧管理,2014,16(6):60-64.
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 DSM, 2014, 16(6):60-64.
- [8] 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 DSM, 2015, 17(1):62-64.
- [9] PJM Day-Ahead and Real-Time Market Operations. PJM manual 11: energy & ancillary services market operations[R]. Audubon:PJM Interconnection, 2017.
- [10] PJM Interconnection, LCC. PJM demand response in economic energy market [R]. Audubon:PJM Interconnection, 2019.
- [11] PJM Interconnection, LCC. Empirical analysis of baseline methods[R]. Audubon:PJM Interconnection, 2011.
- [12] PJM Interconnection, LCC. Net benefit test results [R]. Audubon:PJM Interconnection, 2019.
- [13] PJM Interconnection, LCC. Analysis of economic DR participation in the PJM wholesale energy market after the implementation of order 745[R]. Audubon:PJM Interconnection, 2013.
- [14] 何永秀,陈倩,费云志,等. 国外典型辅助服务市场产品研究及对中国的启示[J]. 电网技术,2018,42(9):2 915-2 922.
HE Yongxiu, CHEN Qian, FEI Yunzhi, et al. Typical foreign ancillary service market products and enlightenment to China [J]. Power System Technology, 2018, 42(9):2 915-2 922.
- [15] PJM Interconnection, LCC. Demand response ancillary services[R]. Audubon:PJM Interconnection, 2019.

(责任编辑 水 鹤)

广告索引

| | |
|---------------------------|----------------------------------|
| 国网吉林综合能源服务有限公司…………… (封二) | 工业领域电力需求侧管理促进中心…………… (广01) |
| 国网黑龙江综合能源服务有限公司…………… (封三) | 国网(江苏)电力需求侧管理指导中心有限公司…………… (广02) |
| 中国电力科学研究院有限公司…………… (封底) | 国网重庆综合能源服务有限公司…………… (广03) |