

基于需求侧竞价的安徽省激励型电力 需求响应机制研究及应用

郝 洁,高赐威

(东南大学 电气工程学院,南京 210096)

Research and application of incentive power demand response mechanism in Anhui
province based on demand side bidding

HAO Jie,GAO Ciwei

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

摘要:为适应安徽省电力供需新形势发展和国家整体能源调整定位,从激励型需求响应角度研究对应策略。在区分削峰式和填谷式前提下,从激励型需求响应机制、组织方式、启动条件、补偿标准、资金来源几个角度,对安徽省激励型需求响应进行相关设计。根据安徽实际情况和电力供需数据,得出具有实际指导价值的结论。在对补偿标准进行分析时,利用相关试点补偿标准对比法、调峰市场补偿标准分析法、补偿标准上限计算模型进行深度分析。在安徽省激励型需求响应实践设计部分,结合实际数据进行各部分的设计及模型算例应用。

关键词:激励型需求响应;响应机制;组织方式;补偿标准;资金来源

Abstract: In order to adapt to the development of new situation of electricity supply and demand in Anhui province and the national overall energy adjustment orientation, the corresponding strategies are studied from the perspective of incentive demand response. On the premise of distinguishing peak clipping and valley filling, the incentive demand response of Anhui province is designed from the incentive demand response mechanism, organizational mode, starting conditions, compensation standards, sources of funds. According to the actual situation, electricity supply and demand data of Anhui province, the conclusion with practical guiding value is drawn. In the analysis of compensation standards, the comparative method of relevant pilot provinces and cities compensation standards, the compensation standard analysis method of peak-shifting market and the calculation model of the upper limit of compensation standards are used for depth analysis. In the practical design part of Anhui province's incentive demand response, combined with the actual data, the design of each part and the application of model examples are carried out.

Key words: the incentive demand response; demand response mechanism; organizational mode; compensation standards; sources of funds

0 引言

电力需求响应(demand response, DR)通过电价或激励等信号,引导负荷侧资源移峰填谷优化电力供需平衡,提高源网荷互动水平,所以在国内外得到广泛认同和应用。随着我国清洁低碳新能源体系的建设,电力需求响应被赋予新能源消纳及为用户提供多样化增值服务的新使命,并面临从紧急态向常态化转变。

新一轮电力体制改革将需求侧资源提高到与电源侧资源几乎同等重要的地位,需求响应业务^[1]、行为研究^[2]、各类型用户用电需求响应潜力分析^[3]、需求响应技术^[4]等方面不断增强。随着江苏、上海、

山东等地激励型需求响应的成功尝试,需求侧竞价模式^[5]作为一种市场化机制因其更能激发电力用户参与积极性而广受关注,并提出需求侧能量共享^[6]概念。欧洲、美国、新加坡等国的电力市场中需求响应项目种类繁多,国外先进发展经验为需求响应在国内市场的发展提供借鉴。

安徽省电力供需已发生深刻变化,出现电源侧煤电装机放缓、新能源大规模并网,电网侧进入特高压交直流混联时代,负荷特性变差等情况,安徽电力发展面临新形势。

本文针对安徽面临的电力发展新形势,将电力需求响应理论与其具体实际相结合,先分析安徽省实施激励型需求响应的契机,再结合需求响应理论研究适合的实施机制,并设计实施方案,为其开展需求响应工作提供理论和实践支撑。

收稿日期:2020-10-22;修回日期:2020-12-12

基金项目:国家自然科学基金青年项目(52007030)

1 安徽省开展激励型需求响应契机

在电力供需方面,能源结构转型的重点是严控煤炭消耗,结合2015年和2018年的电源装机及全社会最大负荷情况如表1所示。所以煤电装机增幅仅20.23%,不仅远低于光伏装机的8倍及风电的81.85%,也小于全社会最大负荷增幅29.52%。

表1 电力负荷供需情况对比

Table 1 Comparison of power supply and load demand

类型	负荷/万kW		增幅/%	
	2015年	2018年	增量	
煤电(不含皖电东送)	3 091.1	3 716.5	625.4	20.23
光伏	120.8	1 117.7	996.8	825.25
风电	135.5	246.4	110.8	81.85
全社会最大负荷	3 150.0	4 080.0	930.0	29.52

电源结构调整过快给电网安全稳定运行带来了明显的挑战。在风电、光伏大发的月份,会在并非负荷低谷时段午间形成新的火电机组出力低谷,由此造成调峰问题。在夏季晚高峰时段,风电出力不确定、光伏无出力的情况下,造成局部用电缺口问题,随着中长期负荷增长需求而稳定出力的电源尚未落实。

在电力需求方面,安徽“十三五”前3年期间全社会最大负荷年均增长率为9%,年平均日负荷率却下降,夏季最大峰谷差拉大。

面对电力供需新形势,特别是出现的午间低谷调峰困难及夏季晚高峰问题,实施激励型需求响应是符合实际的解决思路。同时,江苏、上海、山东等地成功开展激励型需求响应积累的丰富经验,为安徽提供很好的学习样本。

2 安徽省激励型需求响应机制研究

2.1 激励型需求响应机制设计

以“需求响应优先,有序用电保底”原则组织激励型需求响应,其机制设计结构如图1所示。

用户筛选方面,设置主体参与条件,确保形成上年度最大负荷5%负荷量的储备库,并按照提前通知时间进行分档;在组织方式上,统筹安排响应实施;在启动条件上,按实际需求适时启动需求响应;在补偿标准上,考虑用户参与积极性及资金池容量;在资金来源上,考虑资金充裕度及稳定性。最后,通过实际实施效果调整启动条件、补偿标准等条件。本文以这几个方面为主要研究方向,设计适应安徽电力供需新形势的激励型需求响应机制方案。

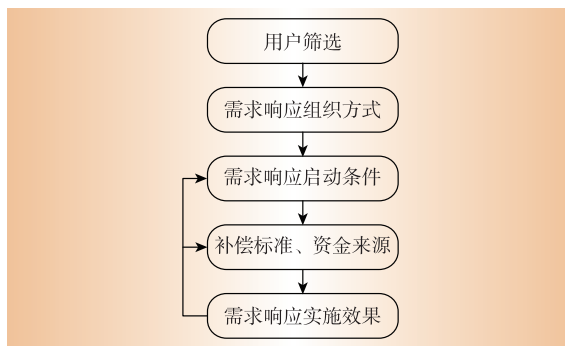


图1 激励型需求响应机制设计结构

Fig.1 Structure of incentive demand response mechanism design

2.2 激励型需求响应机制分析

激励型需求响应按照功能可分为削峰式需求响应和填谷式需求响应。鉴于功能有区别,分别讨论削峰式和填谷式需求响应机制,最终目的均是保障电网安全稳定运行。

2.2.1 需求响应组织方式

目前可行性较高的需求响应组织方式主要为年度集中申报,按需响应。响应模式分为需求侧竞价模式和约定补偿模式,需求侧竞价又可分为设置补偿标准上限和不设补偿标准上限两种方式。

需求侧竞价由计划参与的负荷集成商及用户自主申报参与的负荷量和所需激励价格。在同等条件下,优先选择申报激励价格低、负荷量大的负荷集成商和用户参与响应。需求侧竞价能更好激发参与用户积极性,特别是参与用户越来越多时,竞价模式能够降低补偿成本,更容易与电力市场接轨。

2.2.2 需求响应启动条件设计

(1) 削峰式需求响应

在电网出现备用容量不足、各因素造成的电力供应缺口,电力系统峰谷差过大,以及其他不确定因素造成的电力供需失衡时需要减少用电负荷。

(2) 填谷式需求响应

电力系统峰谷差过大,或风光等可再生能源间歇性、波动性上网引起调峰需求,以及其他不确定因素造成的电力供需失衡时需要增加用电负荷。

2.2.3 补偿标准建模

2.2.3.1 削峰式需求响应

采用相关试点补偿标准对比法,及采用增加顶峰电源计算补偿标准上限,完成相关研究。

(1) 相关试点补偿标准对比法

参考与本省经济水平和产业结构相似地区的平均补偿水平,计算如下

$$p_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \quad (1)$$

式中: p_i 为参考地区补偿标准; N 为参考地区总数。

(2) 补偿标准上限计算模型

增加顶峰电源以代替削减电力负荷,从电源侧解决电力供需平衡问题,则顶峰电源的发电成本可作为削峰式 DR 的补偿标准上限。长期来看,补偿标准高于此上限时,建设顶峰电源更加经济。顶峰电源在负荷高峰时能增加电能供应,应具备灵活、启动快等特点,选择抽水蓄能电站为顶峰电源。

抽水蓄能电站的成本为

$$C_{c,f} = C_{f,ves} + C_{f,ele} + C_{c,r} \quad (2)$$

式中: $C_{f,ves}$ 为投资功率成本; $C_{f,ele}$ 为发电的度电成本; $C_{c,r}$ 为容量费用。

投资成本计算为

$$C_{f,ves} = C_p \cdot P_f \quad (3)$$

式中: C_p 为单位功率投资成本,元/kW; P_f 为电源功率, kW。

以投资期内总发电量计算发电的度电成本,即

$$C_{f,ele} = p_{ele} \sum_{i=1}^n Q_{f,n} \quad (4)$$

式中: p_{ele} 为电价,元/kWh; $Q_{f,n}$ 为年发电量, kWh; n 为统计年数。

容量费用计算为

$$C_{c,r} = p_{c,r} \cdot C_p \quad (5)$$

式中: $p_{c,r}$ 为容量电价。

所以,新增抽水蓄能电站平均度电成本可作为削峰式 DR 补偿标准上限,即

$$C_{im} = \frac{C_{c,f}}{Q_f} = \frac{C_p \cdot P_f + p_{ele} \sum_{i=1}^n Q_{f,n} + p_{c,r} \cdot C_p}{\sum_{i=1}^n Q_{f,n}} \quad (6)$$

式中: Q_f 为累计发电量。

2.2.3.2 填谷式需求响应

采用相关试点补偿标准对比法、调峰市场补偿标准分析法,及采用增加调峰电源计算补偿标准上限,完成相关研究。

(1) 相关试点补偿标准对比法

参考与本省经济水平和产业结构相似地区的平均补偿水平,计算如下

$$p_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \quad (7)$$

式中: p_i 为参考地区补偿标准; N 为参考地区总数。

(2) 调峰市场补偿标准分析法

根据开展地区具体的调峰市场交易运行规则,火电机组的报价上限可作为填谷式 DR 补偿标准的一种参考。则补偿标准计算式为

$$C_{g,f} = \sum_{i=1}^D \frac{P_b}{1000} \quad (8)$$

式中: p_b 为燃煤机组调峰报价上限,元/MWh; D 为报价档位数。

鉴于源侧调峰成本普遍较低,所求的补偿标准也较低,但仍不失一种负荷侧参与调峰的补偿标准参考。

(3) 补偿标准上限计算模型

增加调峰电源代替增加负荷用电,从电源侧解决电力供需平衡问题。则调峰电源的用电成本可作为填谷式 DR 的补偿标准上限。长期来看,补偿标准高于此上限时,建设调峰电源更加经济。从经济性角度考虑,抽水蓄能的储能成本是目前不同类型储能中最低的,所以选择抽水蓄能电站为调峰电源。

抽水蓄能电站的成本为

$$C_{c,g} = C_{g,ves} + C_{g,ele} + C_{g,r} \quad (9)$$

式中: $C_{g,ves}$ 为投资功率成本; $C_{g,ele}$ 为调峰的度电成本; $C_{g,r}$ 为容量电费。

投资成本计算为

$$C_{g,ves} = C_p \cdot P_g \quad (10)$$

式中: C_p 为单位功率投资成本,元/kW; P_g 为用电功率, kW。

以投资期内总用电量计算调峰度电成本,即

$$C_{g,ele} = p_{g,ele} \sum_{i=1}^n Q_{g,n} \quad (11)$$

式中: $p_{g,ele}$ 为电价,元/kWh; $Q_{g,n}$ 为年用电量, kWh; n 为统计年数。

容量费用计算为

$$C_{g,r} = p_{g,r} \cdot C_p \quad (12)$$

式中: $p_{g,r}$ 为容量电价。

所以,新增抽水蓄能电站平均度电成本可作为填谷式 DR 补偿标准上限,即

$$C_{gm} = \frac{C_{c,g}}{Q_g} = \frac{C_p \cdot P_g + p_{g,ele} \sum_{i=1}^n Q_{g,n} + p_{g,r} \cdot C_p}{\sum_{i=1}^n Q_{g,n}} \quad (13)$$

式中: Q_g 为累计用电量。

2.2.4 资金来源

按照“谁受益,谁付费”原则,且电力公司在需求响应工作中保持收支平衡,将削峰式和填谷式需求响应资金来源进行区别分析。

削峰式需求响应:削峰需求是因用电负荷过多,电力供不应求导致。所以对在削峰式需求响应期间继续保持用电的电力用户收取资金,以补偿此时段牺牲用电需求的电力用户。

填谷式需求响应:填谷需求是因电源侧负荷率过低,电力供过于求导致。鉴于目前执行的新能源优先上网政策,从填谷时段各类电源企业上网电量

征收资金,并增大新能源发电企业度电资金增收系数,以补偿此时段增加用电负荷的用户。

另外,为使资金使用更加规范,设置专款专用支撑政策,确保每笔支出服务于需求响应工作。

3 安徽省激励型需求响应实践设计

3.1 组织方式选择

参考各试点激励型需求响应工作经验,并结合安徽电力供需实际情况,适宜选择年度集中申报按需实施,并设定报价上限的需求侧竞价模式。

3.2 补偿标准计算

以安徽省“十四五”整个5年为计算周期,利用所提建模方法计算补偿标准,各建模方法运用如下。

3.2.1 削峰式需求响应

(1) 相关试点补偿标准对比法

试点中除江苏补偿价格较高外,河南、山东、浙江、天津和上海总体较为接近,约定需求响应补偿情况如表2、表3所示。由式(1)求得,采用电量补偿标准时,求得约定需求响应的补偿标准为2.8元/kWh;采用容量补偿标准时,求得约定需求响应的补偿标准为25.6元/(kW·年)。实时需求响应补偿标准一般为约定式的3倍。

表2 试点削峰式需求响应电量补偿标准折算
Table 2 The electricity compensation standard of peak-clipping DR in some areas

地区	补偿标准/(元·kWh ⁻¹)	折算说明
河南	4.5	均化处理邀约响应时长
山东	2.3	按年邀约8次,并均化提前通知时间系数
浙江	2.0	无
天津	2.1	按年邀约4次,每次响应时长1.5 h
上海	3.0	按需求响应年累计时长10 h

表3 试点削峰式需求响应容量补偿标准折算
Table 3 The capacity compensation standard of peak-clipping DR in some areas

地区	年补偿标准/(元·kW ⁻¹)	折算说明
河南	30.0	年邀约4次,均化处理邀约响应时长
山东	30.0	无
天津	12.5	均化处理提前通知时间系数影响
上海	30.0	无

(2) 补偿标准上限计算模型

根据安徽负荷增长情况,预计2025年全社会最大负荷达6 500万kW,以年最大负荷97%以上的

尖峰负荷195万kW为目标,通过新建200万kW的抽水蓄能电站满足尖峰负荷需求。2016年—2018年抽水蓄能电站年均发电量约为24亿kWh,若“十四五”新建抽蓄承担50%发电任务,则2021年—2025年累计发电量为60亿kWh。设置各参数如下:单位功率投资成本7 000元/kW;发电成本0.25元/kWh;年容量电价760元/kW;新建容量200 kW;发电量60亿kWh。运用式(6)求得计算结果可以看出,补偿标准上限宜设置为2.8元/kWh。

3.2.2 填谷式需求响应

(1) 相关试点补偿标准对比法

选择山东、浙江、天津和上海为参考试点地区,约定需求响应补偿情况如表4、表5所示。由式(7)求得,采用电量补偿标准时,求得约定需求响应的补偿标准为1.6元/kWh;采用容量补偿标准时,参考天津和上海,求得约定需求响应的补偿标准为7.8元/(kW·年)。实时需求响应补偿标准一般为约定式的3倍。

表4 试点填谷式需求响应电量补偿标准折算
Table 4 The electricity compensation standard of valley-filling DR in some areas

地区	补偿标准/(元·kWh ⁻¹)	折算说明
山东	2.3	按年邀约8次,均化提前通知时间系数
浙江	1.2	无
天津	1.6	按年邀约4次,每次响应时长1.5 h
上海	1.2	按需求响应年累计时长10 h

表5 试点填谷式需求响应容量补偿标准折算
Table 5 The capacity compensation standard of valley-filling DR in some areas

地区	年补偿标准/(元·kW ⁻¹)	折算说明
山东	30.0	无
天津	8.0	均化处理提前通知时间系数
上海	7.7	按提前24 h通知;响应时长取0.8计算。

(2) 调峰市场补偿标准分析法

根据安徽调峰市场交易运行规则,煤电机组参与调峰时的报价上限如表6所示,电源侧调峰补偿标准在0.1~1.0元/kWh范围,由式(7)求得电量补偿标准为0.5元/kWh;启停调峰报价上限如表7所示,求得容量补偿标准为1.1元/(kW·次)。

(3) 补偿标准上限计算模型

依然通过新建200万kW的抽水蓄能电站满足调峰需求。依据削峰时发电60亿kWh,根据抽水蓄能75%的电转换效率,则2021年—2025年累计用电量80亿kWh。设置各参数如下:单位功率投资成本7 000元/kW;发电成本0.062元/kWh;年容量电价

表6 安徽省深度调峰交易分档报价上限
Table 6 Depth peak trading offer in Anhui province

报价档位	机组负荷率/%	报价上限(含税)/(元·MWh ⁻¹)
第一档	[45,50)	100
第二档	[40,45)	200
第三档	[35,40)	400
第四档	[30,35)	600
第五档	(0,30)	1 000

表7 安徽省应急停机调峰交易报价上限
Table 7 Emergency shutdown peak regulation trading offer in Anhui province

机组额定容量	报价上限 万元/(台·次)
10万—25万kW级	30
30万kW级	40
60万kW级	50
100万kW级	60

760元/kW;新建容量400 kW;发电量80亿kWh。运用式(6)求得计算结果为,补偿标准上限宜设置为2元/kWh。

3.3 资金来源探讨

安徽削峰式DR资金来源:依据削峰式DR资金来源分析,设置“削峰临时电价”,此电价应高于此时段所定销售电价50%,以对削峰响应时段用电的全体用户(或工商业用户)进行资金收取。这既是对现有电价体系的补充,又具有灵活性以电价调节电力供需。

安徽填谷式DR资金来源:分析安徽目前的填谷需求原因,一方面节假日用电负荷较低,另一方面新能源优先上网政策挤压火电出力空间,所以暂可由填谷时段各类电源企业按上网电量平均分摊填谷需求响应补偿资金。

若理论资金来源存在困难,可根据实际情况如纳入输配电价、跨省区可再生能源电力现货交易市场结余等途径扩展资金来源。

4 结束语

在安徽电力发展新形势下,运用市场机制和经济杠杆,设计符合安徽实际情况的激励型需求响应机制,调节负荷侧资源时空价值,进一步提升安徽电网的调节能力。

对于安徽省激励型需求形影机制设计,在组织方式上,选择年度集中申报,按需响应,并选择设定报价上限的需求侧竞价模式;通过相关试点补偿标准对比法、调峰市场补偿标准分析法、补偿标准上限计算模型3种方法计算削峰填谷的补偿标准;区

分削峰式和填谷式资金来源,削峰式选择高于此时段所定销售电价50%的削峰临时电价,填谷式选择填谷时段各类电源企业按上网电量平均分摊填谷需求响应补偿资金。各切入角度得出的结论对安徽实施激励型需求响应具有指导意义。D

参考文献:

- [1] 张晶,张松涛,陈宋宋,等.智能电网需求响应互动业务信息建模[J].供用电,2019,36(3):68-75.
ZHANG Jing, ZHANG Songtao, CHEN Songsong, et al. Information modelling of demand response interactive business for smart grid [J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(3):68-75.
- [2] 陈宇沁,曹晓冬,王俊,等.综合能源系统综合需求响应行为研究[J].电力工程技术,2020,39(6):89-97.
CHEN Yuqin, CAO Xiaodong, WANG Jun, et al. Integrated demand response behavior of integrated energy system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6):89-97.
- [3] 韩啸,张潮海.基于物理-数据融合的楼宇用电需求响应潜力分析[J].供用电,2020,37(8):10-15.
HAN Xiao, ZHANG Chaohai. Demand response potential analysis of buildings based on physical-data fusion method [J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(8):10-15.
- [4] 黄豫,邵冲,郝洁,等.能源互联网环境下的多能需求响应技术[J].电力需求侧管理,2020,22(5):2-6,18.
HUANG Yu, SHAO Chong, HAO Jie, et al. Multi-energy demand response technology in energy Internet environment [J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(5):2-6, 18.
- [5] 陈雨果,张轩,罗钢,等.用户报量不报价模式下电力现货市场需求响应机制与方法[J].电力系统自动化,2019,43(9):179-186.
CHEN Yuguo, ZHANG Xuan, LUO Gang, et al. Demand response mechanism and approach of electricity spot market in bidding mode without price on user side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9):179-186.
- [6] 陈玥,刘锋,魏韡,等.需求侧能量共享:概念、机制与展望[J].电力系统自动化,2021,45(2):1-11.
CHEN Yue, LIU Feng, WEI Wei, et al. Energy sharing at demand side: concept, mechanism and prospect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2):1-11.

作者简介:

郝洁(1989),女,江苏南京人,硕士研究生,工程师,从事需求响应、电力市场相关工作;

高赐威(1977),男,江苏南京人,博士,博士生导师,主要从事电力需求侧管理、电力规划、电力市场等研究。

(责任编辑 赵雨昕)