

需求侧资源参与电力市场机制及典型案例实践综述

宋莉¹, 刘敦楠^{2*}, 庞博¹, 梁赫霄¹, 王玲湘², 李增彬¹, 刘杰³

(1. 北京电力交易中心有限公司, 北京市 西城区 100031;

2. 华北电力大学经济与管理学院, 北京市 昌平区 102206;

3. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京市 海淀区 100192)

Mechanism of Demand-side Resource Participation in the Electricity Market and Typical Case Practice Review

SONG Li¹, LIU Dunnan^{2*}, PANG Bo¹, LIANG Hexiao¹, WANG Lingxiang², LI Zengbin¹, LIU Jie³

(1. Beijing Power Exchange Center, Xicheng District, Beijing 100031, China;

2. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;

3. Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd., Haidian District, Beijing 100192, China)

Abstract: With the development of power market reform, the participation of demand-side resources in the power market will promote a high proportion of renewable energy access, promote the development of a competitive retail power market, and provide a more effective guarantee for the economic and reliable operation of the power system. First, this study analyzes the development path of demand-side resources participating in the power market. Then, based on the typical cases of electricity demand-side market participants, the market mechanism and typical cases of demand-side resources participating in the auxiliary services market, renewable energy trading, and medium- and long-term electricity markets are summarized and analyzed. Finally, based on the development bottleneck of current demand-side resources in market rules, market competitiveness, user behavior, and optimal scheduling technology, some suggestions are put forward to provide important support for power market development and renewable energy consumption.

Keywords: demand-side resources; flexible load; electricity market; renewable energy consumption

摘要: 随着电力市场改革的不断深入, 需求侧资源参与电力市场将促进高比例新能源接入并推动竞争型零售电力市场发展, 为电力系统的经济可靠运行提供更有力的保障。首先分析了需求侧资源参与电力市场的发展路径; 进而, 依托电

力需求侧市场主体参与电力市场的典型案例, 对需求侧资源参与辅助服务市场、新能源交易和电力中长期市场的市场机制和典型案例进行整理与分析; 最后, 基于现阶段需求侧资源在市场规则、市场竞争力、用户行为和优化调度技术等方面的发展瓶颈提出针对性建议, 为电力市场的发展和新能源消纳提供了重要支撑。

关键词: 需求侧资源; 灵活性负荷; 电力市场; 新能源消纳

0 引言

电力市场化改革需要进一步提高资源利用效率、放开电力市场、促进电能动态平衡、推动新能源消纳^[1]。随着电力市场建设工作的不断推进, 辅助服务市场^[2]、需求响应市场^[3]、现货市场^[4]等试点相继建立, 为建设竞争性电力市场提供了条件。随着供给侧资源配置优化难度不断加大, 需求侧资源利用与优化配置成为推动电力市场发展和促进高比例新能源消纳的重要手段^[5-6]。

不少学者对需求侧资源参与电力市场的参与模式、效益联动机制^[7]进行了研究。闫华光等提出电力需求侧能效管理与需求响应系统建设方案^[8]; Fei Wang等研究了需求响应参与辅助服务平衡电功率提高电力系统可靠性新方案, 并指出其在技术、经济、环境方面具有优越性^[2]; 代业明等研究了用户在智能电网实时定价模式下的响应模式^[9]; 张晶等设计了自动需求响应技术和评估方案^[10]; Torsten Broecker等采用

基金项目: 北京电力交易中心管理咨询项目(交易机构独立规范运作下的优质服务提升研究); 国家社科基金重大项目(19ZDA081)。

Management Consulting Program of Beijing Power Exchange Center; National Social Science Foundation of China (19ZDA081).

需求响应辅助平衡风电波动性以促进新能源消纳^[11]。然而,相关研究成果并没有考虑政策制度的发展变化以及电力市场化改革下的负荷聚合资源利用效果^[12-14]。新形势下,需求侧资源参与电力市场具有更多的市场模式,其创新性方案的提出将有利于市场主体抢占先机,提高其市场竞争力^[15-16]。

在考虑需求侧主体参与电力市场的过程中,不仅需要考虑关键技术^[17-19]和市场策略^[20-23],也需要结合实际实施情况进行探讨和分析。本文首先研究了需求侧电力市场的发展阶段,分析传统需求侧体制到现阶段的多样化市场模式,从政策成熟度和技术成熟度展开分析;研究需求侧资源参与辅助服务市场、新能源交易和兼顾现货的中长期市场模式,并结合相关试点的典型案例分析;最后总结了现阶段需求侧资源参与电力市场面临的挑战,并提出发展建议。

1 需求侧资源参与电力市场的发展路径

1.1 电力市场改革中需求侧发展进程

自1978年第一次电力体制改革以来,中国电力市场交易机制不断完善,同时也提出了一系列针对需求侧负荷调节的电价制度^[24-25],主要包括峰谷电价、季节性电价、阶梯性电价等。峰谷电价依据历史负荷情况设计,并未反映出供需的真实情况,也不具备灵活调整机制,导致高峰漂移等情况时常出现。究其原因,需求侧并未与市场进行充分互动及充分协调内部资源,真正意义上的需求侧市场并未建成。

随着电力市场改革的不断推进,中国陆续出现新型的需求侧负荷调节机制,包括需求响应、调峰辅助服务等。在需求侧参与这些市场交易的过程中,供需双侧通过物理上电力协同控制和经济上金融互补,可以最大限度地挖掘需求侧负荷调节潜力^[26-28],为需求侧以多种形式参与电力市场提供条件。

随着国家政策的推进和市场的发展,新阶段电力市场将面临不一样的发展背景,运营过程中不仅是需求侧或供给侧的单侧调整,而更强调供需互动。在“双碳”目标的实现过程中,考虑高比例新能源接入,需求侧资源参与市场对于提高电力系统可调节能力、增强系统稳定性、促进电力市场进一步发展具有重要意义。

1.2 需求侧资源参与市场的典型案例情况

中国能源革命要求重视供需互动、优化资源配置、促进新能源消纳、构建安全清洁高效的能源体

系。为推动电力市场发展,中国多个地区已经开展了相关典型案例的建设与实践,如京津冀的电动汽车参与调峰市场、上海虚拟电厂主动调节参与需求响应、宁夏通过源网荷储互动消纳新能源、江苏通过新能源与用户偏差替代促进新能源消纳等。图1展示了北京电力交易中心电力物联网典型工程案例的主要开展区域,本文基于这些典型案例实践情况对各类交易模式开展分析。

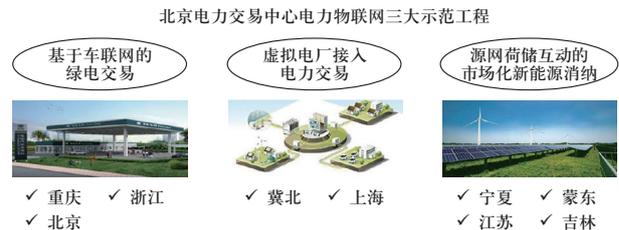


图1 北京电力交易中心典型案例

Fig. 1 Demonstration projects of Beijing Power Exchange Center

1.3 需求侧多样化市场模式

电力需求侧用户应在综合考虑多种市场参与条件和效益的情况下,合理配置资源以获得最大市场效益。除需求响应和辅助服务市场交易,用户可以利用需求侧资源的灵活性和供需互动灵活性充分挖掘市场潜力。本文考虑面向供需灵活互动的电力市场,总结了6种需求侧资源参与电力市场的模式,其特点、效益来源、能力实现方式和适用条件如表1所示。值得注意的是,不同的需求侧资源参与模式需要考虑政策与技术的成熟度,不同模式对于政策和技术的要求如图2所示。

表1 需求侧资源参与电力市场交易的模式

Table 1 Participation modes of demand-side resources in power market

模式	特点	效益来源	能力实现方式	适用条件
参与辅助服务调峰	易起步,有市场基础	电厂分摊	调节	调峰能力不足、峰谷差较大的区域
参与需求响应市场	补偿价格高,收益可观,0.9~16元/kWh	政府补贴	调节	
低谷弃电的曲线追踪	曲线追踪	弃电降价、分时电价	调节、存储	新能源富余地区,用户灵活性较高、消纳富余新能源
新能源与用户偏差替代	抑制波动性,减少偏差	新能源补贴	存储	
分布式能源、储能灵活性应用	时间价值,增值服务模式	分时价差	存储	现货交易地区

续表

模式	特点	效益来源	能力实现方式	适用条件
兼顾现货的带曲线中长期电力交易	构建灵活互动的价值体系	电量价值+电力价值	调节、存储	未来电力市场

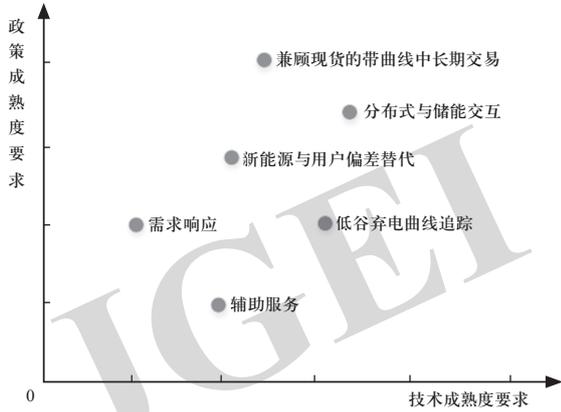


图2 市场模式的政策与技术成熟度分析

Fig. 2 Policy and technology maturity analysis of market modes

客观评价需求侧市场新模式的地区技术差异和政策差异，并因地制宜地开展创新项目示范工程，是影响需求侧市场建设效果的关键。针对需求侧参与辅助服务，西北、东北、华北、华东等多个地区已经出台了需求侧参与辅助服务的相关文件，相关政策已经较为成熟，主要发展瓶颈在于需求侧资源的实时优化调度、负荷预测、负荷管理等技术问题。针对需求侧参与需求响应，中国已经有不少地区开展了需求响应的试点实践，相关响应技术已经较为成熟，但还需要进一步讨论需求响应的补贴力度、发放主体等政策问题。需求侧参与低谷弃电曲线追踪的过程中，一方面需要建立规范的市场交易制度，另一方面需要需求侧的实时负荷追踪消纳，目前无论是交易模式还是响应模式都在探索过程中。新能源与用户偏差替代主要通过新能源与用户签订金融合同实现，交易对政策成熟度要求较高。兼顾现货的电力中长期曲线交易是中国正在建设的电力市场，政策成熟度正在积极推进，技术成熟度主要面临市场竞价、出清、安全校核、考核结算等技术难点。

2 需求侧资源参与辅助服务市场

2.1 参与调峰辅助服务

2.1.1 调峰辅助服务市场情况分析

在政策方面，各地相继出台电力辅助服务市场交

易规则，鼓励需求侧资源参与电力辅助服务交易^[26]。由新能源厂商支付补偿费用，需求侧聚合商获得辅助服务补偿费用，各地区的辅助服务市场交易价格如表2所示。

表2 各地辅助服务市场交易价格

Table 2 Transaction prices of auxiliary service markets in different regions

地区	实时深度调峰	可中断负荷调峰	储能能调峰
华东 ^[29]	第一档：上限0.3元/kWh 第二至五档：上限0.4/0.6/0.8/1 (元/kWh)	—	—
东北 ^[30]	第一档：0~0.4元/kWh 第二档：0.4~1元/kWh	报价下限：0.1元/kWh 报价上限：0.2元/kWh	报价下限：0.1元/kWh 报价上限：0.2元/kWh
华北 ^[31]	第一档：0~0.3元/kWh 第二档：0~0.4元/kWh	—	—
西北(甘肃) ^[32]	第一档：0~0.4元/kWh 第二档：0.4~1元/kWh	报价下限：0.1元/kWh 报价上限：0.2元/kWh	报价下限：0.1元/kWh 报价上限：0.2元/kWh
南网 ^[33]	第一档：上限0.2元/kWh 第二至五档：上限0.4/0.6/0.8/1 (元/kWh)	—	—

参与辅助服务市场主要包括市场信息上报、竞价交易、出清与结算等步骤^[34-35]。需求侧市场主体需要上报辅助服务的可调节容量范围、时段、市场等关键信息，不同需求侧市场主体可能有差异，例如储能、电动汽车等需要上报最大充电和放电功率，楼宇、基站等仅需上报充电功率。在竞价交易中，需求侧市场发展初期往往不参与市场竞价，随着需求侧市场规模的扩大，可能逐步放开市场竞价过程。受限于市场规模和可调能力，需求侧市场主体往往不具备竞价优势，仅仅作为价格接受者，以辅助市场出清价结算，同时也会面临考核的市场风险。在交易执行过程中，需求侧资源在得到辅助服务调度指令后通过智能化设备控制或信息传递-用户响应等方式，及时调控柔性负荷和储能充放电参与辅助服务。

在交易过程中，需求侧资源通过参与市场获得经济激励。在调度执行过程中，主要涉及的技术问题包括多种能源耦合技术、分布式资源互联技术、用户激励机制和集中管控技术。聚合后的需求侧资源具有更高的参与市场能力和系统可靠性，将有效提高需求侧收益和电力系统稳定性。

2.1.2 典型案例应用情况

电动汽车公司通过聚合京津冀电动汽车参与华北

辅助服务市场以实现辅助服务市场调峰需求。该案例涉及北京、天津、冀北共接入充电站2476个,充电桩27 621个,接入充电设施容量1200 MW。市场初期,电动汽车聚合商作为省网市场统一出清价格接受者,只参与省网日前市场(京津唐市场)。条件具备时,可参与市场报价,并适时参与华北市场。该典型案例的组织模式如图3所示。

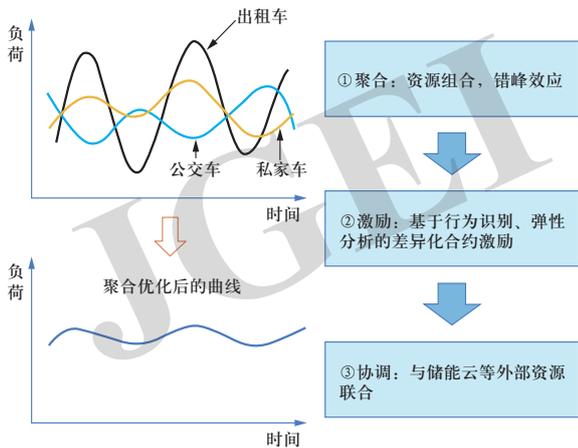


图3 电动汽车聚合交易典型案例

Fig. 3 Demonstration project for electric vehicle aggregation trading

在2019年11月22日2:00—5:00时段的充电优惠活动中,度电优惠金额为0.05元/kWh,22日2:00—6:00最高负荷为22.96 MW,较20日、21日分别增长8.84%、13.75%;最低负荷为8.05 MW,分别增长19.61%、30.26%;平均负荷为11.98 MW,分别增长9.41%、13.23%。具体响应情况如图4所示。

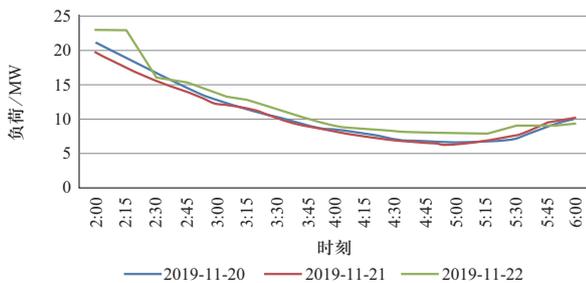


图4 电动汽车负荷响应情况

Fig. 4 Load response of electric vehicles

该案例采用自然组合、经济激励、物理控制等手段,利用数据挖掘技术和智能控制技术将同一时段不同主体的负荷曲线进行智能化组合,有效实现削峰填谷、需求响应、交易履约等目标。作为电动汽车聚合参与电力市场的典型案例,该案例充分利用大数据分

析技术和用户激励策略,实现了大规模离散化负荷的聚合调度。但在响应效果上依然有提升的空间,应考虑如何激励更多的电动汽车参与,实现更为明显的优化调度效果。

2.2 参与需求侧响应

2.2.1 需求侧响应机制分析

为促进电力供需平衡、优化资源配置、促进新能源消纳的同时缓解电网运行压力,部分地区相继出台需求响应规则,如表3所示,部分地区规定响应时长按响应功率计价,部分地区则按响应电量计价。

表3 各地需求响应市场交易规则

Table 3 Transaction rules of demand response market in different regions

	削峰需求响应	填谷需求响应
江苏 ^[36]	①约定响应: 10/12/15 (元/kW) ②实时响应: 约定响应×响应速度系数	①谷时: 5元/kW ②平时: 8元/kW
浙江 ^[37]	实时执行4元/kWh年度固定补贴,削峰出清价格设置4元/kWh上限	1.2元/kWh
山东 ^[38]	①容量补偿费用(经济型不涉及)+②电量补偿费用+③考核费用	
河南 ^[39]	①约定响应: 3~4.5元/(kW·次) ②实时响应: 12~16元/(kW·次)	—
天津	①提前通知时间大于2h: 5元/kWh 0.5~2h之间: 7.5元/kWh ②实时响应: 15元/kWh	1.17~2元/kWh
江西 ^[40]	约定响应: 0.9元/kWh	—
广东 ^[41]	①市场化电力用户: 20元/(kW·天) ②非市场化电力用户: 10元/(kW·天)	

智能互联技术和控制技术的进步为需求侧资源整合、信息传递和设备控制提供了技术条件。聚合商通过聚合大量的需求侧资源,响应容量得到极大提升;由于其设备控制能力强、预测技术高、设备条件足,其在响应能力上也具有明显提升,响应方式往往按照最大效益原则设计。因此,需求侧聚合商参与需求响应交易具有足够的先天条件。聚合商首先统计负荷曲线,预测负荷基线走向;然后考虑灵活性负荷、储能资源的响应能力,确定聚合可调节范围;进而在需求响应市场上报容量和价格;最后通过智能运行管控平台或者信息传递-用户响应等方式进行需求响应。该过程中主要的技术问题为需求响应的控制方式和效益分配方法。

现行需求响应的补偿主要以国家补贴的形式发放，具有较大的激励效果。但是考虑到电力市场的不断发展，该模式的可持续性需要进一步研究。目前开展需求响应的区域有限，大部分是虚拟电厂聚合商和弹性负荷，其通过参与需求响应有效降低了成本。

2.2.2 典型案例应用情况

上海市虚拟电厂典型案例通过建设虚拟电厂调节需求侧资源保证电力供需稳定。该典型案例主要包括楼宇2200 MW、分布式光伏800 MW、电动汽车90 MW以及用户侧三联供5.3 MW，其建设情况如图5所示。

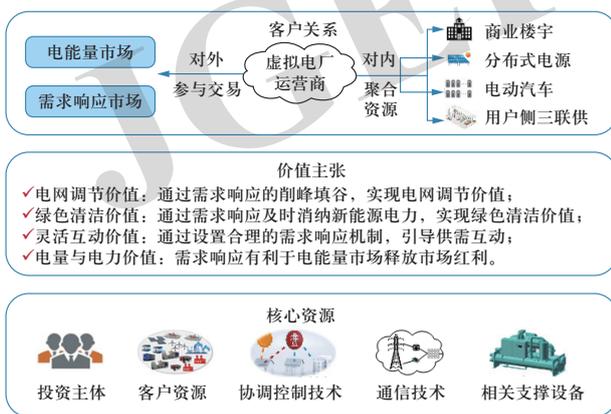


图5 上海虚拟电厂的建设情况

Fig. 5 Construction of virtual power plant in Shanghai

该案例中，上海市仅商业楼宇、分布式能源、电动汽车、用户侧三联供等资源构成的各类虚拟电厂建设潜力总计可达3090 MW以上，通过调动需求侧资源参与需求响应来调节，相较于发电侧调节更经济可靠。

3 需求侧资源参与新能源交易

3.1 低谷弃电曲线追踪

3.1.1 低谷弃电曲线追踪交易机制分析

新能源具有清洁、安全、变动成本较低等特点，高比例新能源接入对于改善能源结构、提高电力经济性具有重要意义。然而，当调度调峰能力达到极限，由于新能源波动性较大，在电力充沛的情况下往往弃新能源电而选择其他类型电力。

低谷弃电曲线追踪交易按照调节技术难度和市场完善度可以设计弃电追踪交易、峰谷分段电量交易、曲线追踪交易3种交易方式，其结算机制不同。对于弃电追踪交易，新能源场站发布弃电信息，虚拟电厂

调控资源完成弃电消纳，按照弃电消纳量进行结算。在具体实施过程中，主要由新能源场站根据预测信息得出当日弃电曲线，并挂牌开口合同；用户确定具有消纳能力时摘牌，并调整可调容量对弃电进行及时消纳，最终按照新能源场站的挂牌价、用户的实际消纳量进行结算。发电侧提交弃风弃光曲线，需求侧聚合并调节需求侧资源以匹配曲线。需求侧是否能够实际享受效益需要复核，通过实际线与基准线之间的差额计算负荷增量，通过对增量和新能源发电的匹配程度计算补偿和市场效益，若不达预期则做出惩罚性效益调整。目前蒙东、宁夏、吉林和辽宁已经有相应的应用。图6(a)中的绿色曲线即为弃电追踪交易量曲线。

对于峰谷分段电量交易，新能源场站发布不同时段电量电价信息，直接对低谷电量以较低价格打包集中交易，而对负荷高峰时段电量则以较高价格交易；激励虚拟电厂及时调整负荷曲线，按照峰谷电量、电价进行结算。该过程已经融合于电力中长期分时段交易过程中，主要以新能源占比高的省份为主。实施过程中，通过新能源场站的专场交易，对峰谷平的电量开展双边、集中、滚动撮合等多种形式的交易，通过调整用户侧负荷来满足发电侧的新能源消纳需求。

对于曲线追踪交易，考虑电量电价和容量电价，将电站出力曲线划分为若干段，每段确定不同的交易价格进行追踪交易，如图6(b)所示，将电站出力曲

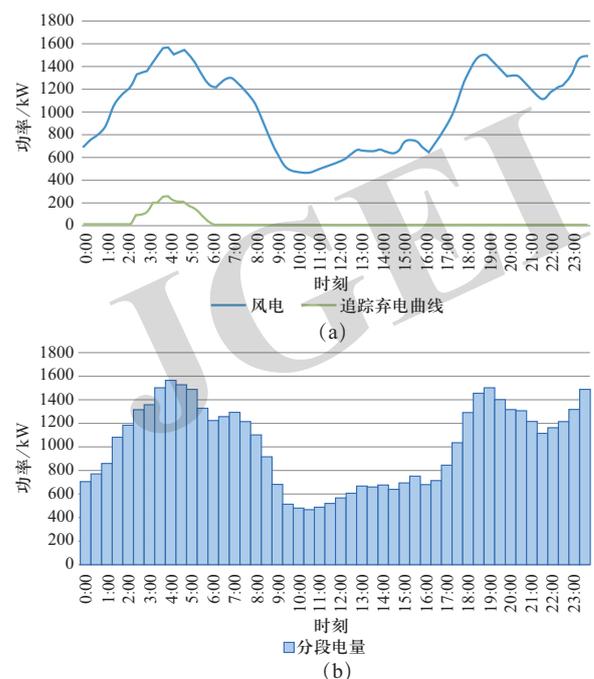


图6 某风电场的日负荷曲线及追踪计算

Fig. 6 Daily load curve and tracking calculation of a wind farm

线按30 min分段, 每段实行不同电价。该模式类似于现货市场中的专场交易, 通过日前、实时市场, 挂牌新能源电力, 实现新能源的追踪消纳。

3种模式都充分体现了“荷随源动”的需求侧负荷协调调度特征, 差异在于弃电追踪交易侧重于发用双方自主调度的方式, 通过挂牌开口合同达成交易; 峰谷分段电量交易是电力中长期分时段建设过程中的一种新能源出力消纳方法, 可以以多种形式开展新能源的专场交易; 曲线追踪交易则是基于现货市场的一种交易方式。

3.1.2 典型案例应用情况

宁夏源网荷储互动典型案例交易模式如图7所示, 低谷弃电曲线追踪为其中一种重要的交易模式, 通过源网荷储互动促进新能源消纳。

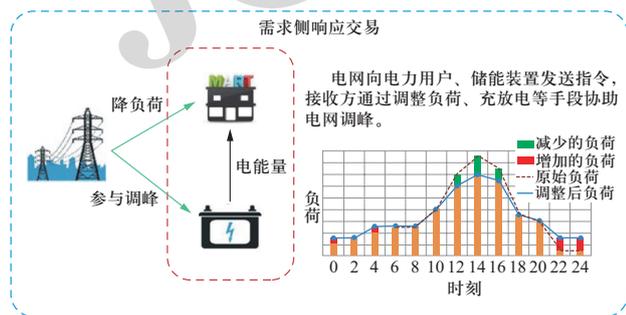


图7 宁夏源网荷储互动典型案例

Fig. 7 A typical case of Ningxia source-grid-load-storage interaction

新能源场站预测自身出力, 确定市场交易电量的曲线特征, 并提交交易平台挂牌交易; 用户、储能等需求侧市场主体在确认可调节能力后可自行摘牌; 交易中心确认各用户的交易负荷曲线, 并提交电网; 电网向用户、储能等需求侧市场主体发送调度指令, 执行新能源的追踪消纳。

该案例通过荷随源动, 在高比例新能源系统中, 促进需求侧发展的可控性、灵活性, 帮助火电共同参与电力平衡。作为源网荷储互动的典型案例, 其针对宁夏的地域特征, 提出利用需求侧与电网、发电侧资源的互动来实现高比例新能源的消纳交易机制。该机制为新能源丰富区域的电力市场建设提供了参考, 是未来促进供需互动的可靠方式。

3.2 新能源与用户偏差替代

3.2.1 新能源与用户偏差替代交易模式

新能源并网需要接受考核和结算, 而新能源发电预测难度较大, 如何减少考核费用成为新能源场站需

要研究的重要问题。

需求侧资源与电网的双向友好互动为解决新能源并网考核提供了新思路。虚拟电厂拥有大量可调度资源, 可与新能源场站灵活互动解决其并网考核问题; 用户侧中的第一类电力用户也需要接受偏差考核, 新能源场站有可能辅助用户免于偏差考核。在替代方法上, 当新能源场站发现下一节点新能源出力无法达到偏差内的预测出力时, 及时向虚拟电厂发送并网考核需求; 虚拟电厂接收到新能源场站的处理曲线信息后, 及时调度负荷和储能资源, 减少新能源场站的考核偏差量; 最终使得新能源场站免于并网考核。虚拟电厂一方面辅助新能源场站并网、使其免于考核、抑制新能源波动性, 另一方面辅助用户侧免于偏差考核。新能源与用户偏差替代方式如图8所示。

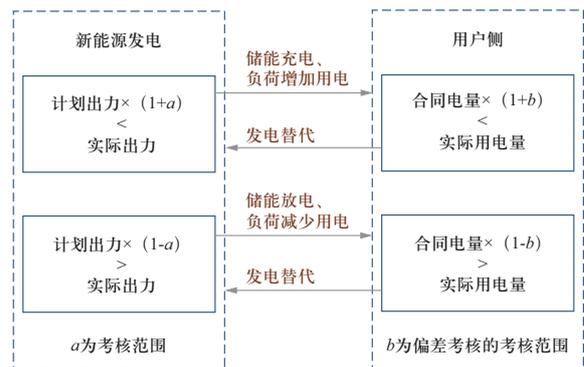


图8 新能源与用户偏差替代

Fig. 8 Deviation substitution between renewable energy and users

3.2.2 典型案例应用情况

江苏源网荷储互动典型案例为推动新能源发展并促进源网荷储互动提出了一系列市场模式, 其中新能源与用户偏差替代为促进发电侧、负荷侧和储能资源友好互动的重要方式, 是完善电力市场交易机制的有效策略, 其交易模式如图9所示。

该案例在2019年12月1日到12月3日组织的偏差电量交易过程中, 达成交易量508.43 MWh, 最大调节电

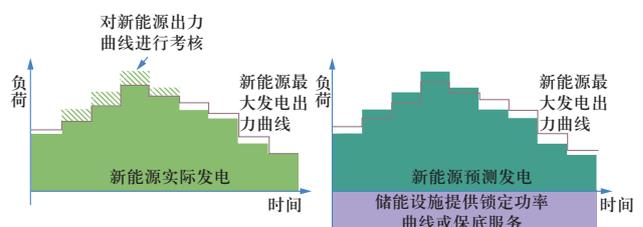


图9 江苏源网荷储互动典型案例

Fig. 9 A typical case of Jiangsu source-grid-load-storage interaction

力达35.68 MW，成交均价为98.1元/MWh，有效促进了供需互动，对于新能源的消纳具有重要促进作用。

3.3 分布式能源与储能灵活性应用

分布式能源与储能是需求侧能源供应与资源灵活性应用的重要来源。传统的储能资源由于其成本高而无法参与分布式能源的消纳。但是在电力市场建设的新阶段，利用广义的需求侧储能资源和控制技术，充分调用各类型的储能资源，可以有效缓解电力波动，进而供用户使用以获得电量效益。

分布式能源发电在为用户提供电能的基础上，通过灵活的充放电机制为用户赢得增量电价收益。在实践方法上，综合能源管理平台通过售电分析、感知平衡区域内发用电情况，确定有条件参与分布式与储能灵活性应用的个体意愿、负荷曲线和容量；然后根据历史运行情况设置储能响应曲线，储能主体按照储能设备充放电情况选择不同灵活性互动方式。图10为分布式能源与储能灵活性应用的能流示意图。

在分布式能源与储能灵活互动过程中，分布式能源提高了消纳能力，获得更多的电量交易收入；储能资源通过充放电获得电力差价收益。

4 需求侧资源参与兼顾现货的中长期市场

兼顾现货的带曲线中长期交易是能源互联网技术发展下考虑电量价值和电力价值的电力交易方式。目前，中国多地已开展基于中长期交易与现货交易的衔

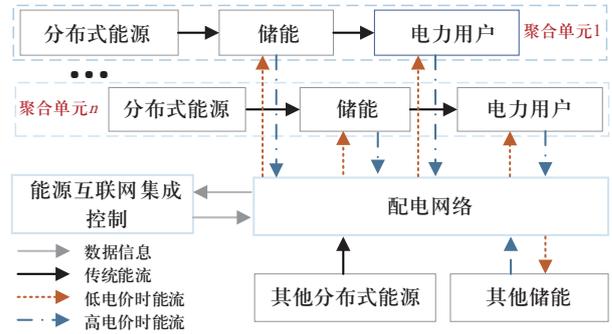


图 10 分布式能源与储能灵活性应用能流示意
Fig. 10 Energy flow diagram of the flexible application between distributed energy and energy storage

接工作，并开展带曲线中长期交易的研究。在兼顾现货的带曲线中长期交易市场中，首先，年度交易按照年度峰谷平交易时段进行分解，不同时间分段的供需双方可签订不同电价的交易合约；然后，按照月度分段分解，将月度交易时段分解为多节点时段，供需双方签订不同分段电量电价的交易合约；进而，在月内短期交易中，通过连续开市滚动调节进一步调整发用电双侧的市场交易结果；最终形成电力中长期的分时段交易结果，如图11所示。随着时段划分的不断细化，可以由3~5段交易（图11（a）灰色曲线）演变成24点交易（图11（b）橙色曲线），可以进一步演化为48或96点交易；随着交易频次的不断提高，可以由周内短期交易（图11（c）红色曲线）演变为日内交易（图11（d）浅蓝色曲线），交易曲线不断贴近实际的负荷曲线，即可实现真正意义上的现货交易，最终实

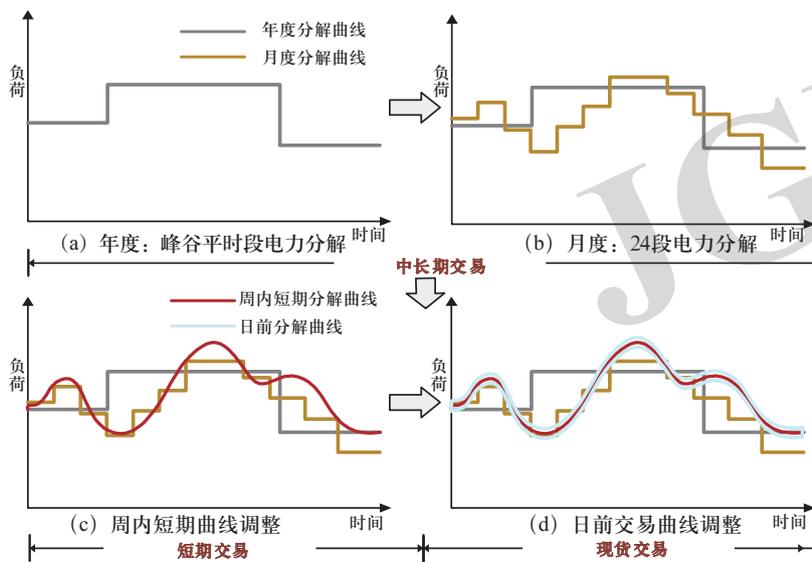


图 11 兼顾现货的带曲线中长期交易

Fig.11 Medium and long-term trading with curves that takes the spot market into account

现电力中长期交易和现货交易的有效衔接。

针对电力中长期市场建设过程中的电力电量价值、负荷特征、电力系统平衡、市场公平等多个关键问题,中国各地对需求侧参与电力市场从年度和月度的多时间尺度交易、月内交易、合同调整、偏差考核、不平衡资金分配等各个方面进行专门设计,鼓励需求侧参与电力市场。例如,冀北交易中心组织的中长期分时段交易中,实现了用户侧月度峰谷平234.56 MWh的交易电量,其中峰段电量占比24.4%,平段电量占比35.5%,谷段电量占比40.1%,实现了削峰填谷;在过渡期增设峰谷投机交易系数和峰谷偏差考核机制,若用户峰谷投机交易系数达到一定阈值则进行偏差考核,用以协调供需双侧的平衡关系,保证了交易的公平合理。

综合来说,中国各地的电力中长期市场建设通过多种形式为电力负荷企业释放改革红利,如:峰谷电价激励、不平衡资金分配等,需求侧市场主体通过参与电力中长期市场可以有效节约成本。

5 挑战与建议

源网荷储互动是解决未来高比例新能源接入、促进电力系统稳定可靠运行的有效途径。需求侧灵活性资源丰富,合理引导需求侧资源参与电力市场,是促进供需互动、降低电力系统运行成本的重要途径。目前,需求侧资源参与市场的挑战主要集中于以下几个方面。

1) 需求侧资源参与电力市场的规则仍需不断完善。由于需求侧主体类型多样,不同的负荷类型在可调容量、调度方式、响应速率、信息化智能化程度等方面差异明显,市场规则制定的准入条件、参与辅助服务等交易类型的负荷基线、报价报量方式和考核机制的设计都有所差异。

2) 需求侧资源参与电力市场的竞争力有待提升。目前需求侧资源受限于市场规模和优化调度能力,需求侧市场主体不具备充分的竞争优势,例如,需求侧资源参与辅助服务市场难以实现精准调度,需求侧资源参与带曲线现货交易的灵活性不足等。

3) 需求侧的用户行为特征还需进一步研究。对于聚合商来说,聚合主体参与调度的积极性直接影响了优化调度效果,如何在保证用户满意度的情况下进行调度,如何设计用户参与市场的激励机制,是聚合商参与电力市场需要解决的首要问题。

4) 需求侧资源的优化调度技术还需不断完善。

需求侧资源参与优化调度需要的条件众多,涉及用户需求信息的采集、行为的监控、调度策略的形成、控制信息的发送和执行等多个方面,如何选用技术项目,使得聚合商控制投资成本的同时保证优化调度效果是一项重要内容。

针对上述挑战,本文提出以下发展建议。

1) 针对需求侧市场主体特征多样的情景,可以考虑多样化的市场交易类型设计,不同主体自主选择参与不同类型的交易模式,并且遵循统一交易规则,通过市场主体的自主调节实现市场选择。例如,从电动汽车、虚拟电厂等市场主体的角度出发设计辅助服务市场机制;从其他高弹性负荷的角度设计需求响应参与机制;从储能的角度设计分布式能源与储能灵活互动机制。确保某一特征市场中的需求侧主体的市场效益,从而激发需求侧参与电力市场的动力。

2) 针对需求侧市场主体参与市场的竞争力保障问题,一方面需求侧资源应从自身优势出发考虑合适的电力市场交易品种,另一方面市场规则可以对需求侧资源参与电力市场进行一定程度的保护。例如电动汽车聚合商以其较大的负荷规模和可调节潜力,可以参与辅助服务市场和低谷弃电追踪交易;而辅助服务市场为保护聚合商参与,对电动汽车辅助服务调节电量进行优先出清。

3) 针对需求侧市场主体参与电力市场的用户行为研究问题,应针对用户的特征影响因素做关联分析,对用户的行为偏好做特征识别,对用户的激励效用函数做深入研究,并基于这些用户的特征因素设计针对性的优化调度策略。目前电动汽车聚合商已经以电子标签的方式识别电动汽车的特征行为,通过制定针对性的激励方式来提升聚合调度效果;虚拟电厂则通过设置合理的红利传导机制使得各个主体积极参与调度。

4) 针对需求侧资源的优化调度问题,一方面是加快电力物联网的建设过程,另一方面可以考虑因地制宜地选择合适的优化调度方式。例如,电动汽车聚合商可以通过聚合管理平台对电动汽车的充放电过程进行实时的优化调度;而虚拟电厂则通过综合能源管理与用户自主响应多种方式对负荷曲线进行综合管理。

6 结论

需求侧资源参与电力市场是未来的发展方向之一,将为稳定可靠的电力供应、新能源消纳、电力市场建设推进带来新的机遇。本文基于电力市场现阶段

信息、技术、管理等方面的资源条件,总结了需求侧资源参与电力市场的典型模式,包括需求侧资源参与辅助服务、需求响应、低谷弃电曲线追踪交易、新能源与用户偏差替代交易模式和兼顾现货的带曲线中长期交易机制,并研究分析了其交易模式的主要内容、实践方法、示范应用以及挑战和展望。需求侧市场主体应充分考虑方案实施的环境,严密分析其技术和政策成熟度,进而选择合适的需求侧市场参与模式并积极推进其市场交易。

参考文献

- [1] 肖谦, 喻芸, 荆朝霞. 电力市场的目标、结构及中国电力市场建设的关键问题讨论[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(5): 508-517.
XIAO Qian, YU Yun, JING Zhaoxia. Discussion on the target and structure of electricity market and the key issues in the construction of China's electricity market[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(5): 508-517(in Chinese).
- [2] WANG F, XU H C, XU T, et al. The values of market-based demand response on improving power system reliability under extreme circumstances[J]. Applied Energy, 2017, 193: 220-231.
- [3] 宋巍, 王佳伟, 赵海波, 等. 考虑需求响应交易市场的虚拟电厂多阶段竞价策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 35-45.
SONG Wei, WANG Jiawei, ZHAO Haibo, et al. Research on multi-stage bidding strategy of virtual power plant considering demand response market[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 35-45(in Chinese).
- [4] PENG X, TAO X M. Cooperative game of electricity retailers in China's spot electricity market[J]. Energy, 2018, 145: 152-170.
- [5] LIU S Q, YANG Q, CAI H X, et al. Market reform of Yunnan electricity in southwestern China: Practice, challenges and implications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 113: 109265.
- [6] GUO X J, QU Q, GUO X, et al. Economy supervision mode of electricity market and its incentive mechanism[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(5): 504-510.
- [7] 王建军, 李莉, 谭忠富, 等. 电力需求侧响应利益联动机制的系统动力学模拟[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(12): 2287-2295.
WANG Jianjun, LI Li, TAN Zhongfu, et al. Simulating the electric demand response profit linkage mechanism by system dynamics[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(12): 2287-2295(in Chinese).
- [8] 闫华光, 陈宋宋, 钟鸣, 等. 电力需求侧能效管理与需求响应系统的研究与设计[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 42-47.
YAN Huaguang, CHEN Songsong, ZHONG Ming, et al. Research and design of demand side energy efficiency management and demand response system[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 42-47(in Chinese).
- [9] 代业明, 高岩. 具有多类资源多类用户智能电网实时定价决策[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(9): 2315-2323.
DAI Yeming, GAO Yan. Real-time pricing decision-making in smart grid with multi-type users and multi-type power sources[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2015, 35(9): 2315-2323(in Chinese).
- [10] 张晶, 孙万珺, 王婷. 自动需求响应系统的需求及架构研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4070-4076.
ZHANG Jing, SUN Wanjun, WANG Ting. Studies on requirements and architecture for automated demand response system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4070-4076(in Chinese).
- [11] 江秀臣, 刘亚东, 傅晓飞, 等. 输配电设备泛在电力物联网建设思路与发展趋势[J]. 高压技术, 2019, 45(5): 1345-1351.
JIANG Xiuchen, LIU Yadong, FU Xiaofei, et al. Construction ideas and development trends of transmission and distribution equipment of the ubiquitous power Internet of Things[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1345-1351(in Chinese).
- [12] 曾鸣, 王雨晴, 李明珠, 等. 泛在电力物联网体系架构及实施方案初探[J]. 智慧电力, 2019, 47(4): 1-7.
ZENG Ming, WANG Yuqing, LI Mingzhu, et al. Preliminary study on the architecture and implementation plan of widespread power Internet of Things[J]. Smart Power, 2019, 47(4): 1-7(in Chinese).
- [13] 张亚健, 杨挺, 孟广雨. 泛在电力物联网在智能配电系统应用综述及展望[J]. 电力建设, 2019, 40(6): 1-12.
ZHANG Yajian, YANG Ting, MENG Guangyu. Review and prospect of ubiquitous power Internet of Things in smart distribution system[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(6): 1-12(in Chinese).
- [14] BROEER T, FULLER J, TUFFNER F, et al. Modeling framework and validation of a smart grid and demand response system for wind power integration[J]. Applied Energy, 2014, 113: 199-207.
- [15] 刘坚, 熊英, 金亨美, 等. 电动汽车参与电力需求响应的成本效益分析—以上海市为例[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 86-94.
LIU Jian, XIONG Ying, KIM Hyoung Mi, et al. Economic assessment of demand response delivered by electric vehicles in Shanghai[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 86-94(in Chinese).
- [16] RAHMANI-ANDEBILI M. Modeling nonlinear incentive-based and price-based demand response programs and implementing on real power markets[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 132: 115-124.
- [17] 王宣元, 刘敦楠, 刘秦, 等. 泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3175-3183.
WANG Xuanyuan, LIU Dunnan, LIU Zhen, et al. Operation mechanism and key technologies of virtual power plant under ubiquitous Internet of Things[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3175-3183(in Chinese).

- [18] 杨挺, 翟峰, 赵英杰, 等. 泛在电力物联网释义与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 9-20.
YANG Ting, ZHAI Feng, ZHAO Yingjie, et al. Explanation and prospect of ubiquitous electric power Internet of Things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 9-20(in Chinese).
- [19] 刘敦楠, 王梅宝, 江叶峰, 等. 基于负荷品质梯级利用的快速需求响应市场机制设计[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 295-301.
LIU Dunnan, WANG Meibao, JIANG Yefeng, et al. Design of rapid demand response market mechanism based on load quality grading utilization[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 295-301(in Chinese).
- [20] 刘晓峰, 高丙团, 李扬. 博弈论在电力需求侧的应用研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2704-2711.
LIU Xiaofeng, GAO Bingtuan, LI Yang. Review on application of game theory in power demand side[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2704-2711(in Chinese).
- [21] 张嘉睿, 陈晚晴, 张雅青, 等. 考虑用户用电灵活性的社区能源系统双层优化[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(2): 133-141.
ZHANG Jiarui, CHEN Wanqing, ZHANG Yaqing, et al. Bi-level optimization framework of community energy system considering user flexibility[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(2): 133-141(in Chinese).
- [22] LUO Z, HONG S, DING Y M. A data mining-driven incentive-based demand response scheme for a virtual power plant[J]. Applied Energy, 2019, 239: 549-559.
- [23] 张元星, 江冰, 刁晓虹, 等. 基于车联网平台的分布式能源交易体系[J]. 电力建设, 2019, 40(7): 10-17.
ZHANG Yuanxing, JIANG Bing, DIAO Xiaohong, et al. Distributed energy trading system based on Internet of vehicles platform[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(7): 10-17(in Chinese).
- [24] 康琦. 零售电力市场研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2008.
- [25] 周明. 电力需求侧市场运营的若干问题研究[D]. 保定: 华北电力大学(保定), 2006.
- [26] SHAYEGAN RAD A, BADRI A, ZANGENEH A, et al. Risk-based optimal energy management of virtual power plant with uncertainties considering responsive loads[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(6): 2135-2150.
- [27] 何奇琳, 艾芊. 售电侧放开环境下含需求响应虚拟电厂的电力市场竞争策略[J]. 电力建设, 2019, 40(2): 1-10.
HE Qilin, AI Qian. Bidding strategy of electricity market including virtual power plant considering demand response under retail power market deregulation[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(2): 1-10(in Chinese).
- [28] 张晨. 售电放开政策下电力交易多方主体利益分析模型研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.
- [29] 国家能源局华东监管局. 华东电力调峰辅助服务市场运营规则(试行)[R]. 合肥: 国家能源局华东监管局, 2018.
- [30] 国家能源局东北监管局. 东北电力辅助服务市场运营规则(暂行)[R]. 沈阳: 国家能源局东北监管局, 2018.
- [31] 国家能源局华北监管局. 华北电力调峰辅助服务市场运营规则(试运行版)[R]. 北京: 国家能源局华北监管局, 2018.
- [32] 国家能源局甘肃监管办公室. 甘肃省电力辅助服务市场运营规则[R]. 兰州: 国家能源局甘肃监管办公室, 2018.
- [33] 国家能源局南方监管局. 广东调峰辅助服务市场交易规则(试行)[R]. 南宁: 国家能源局南方监管局, 2018.
- [34] 陈好, 卫志农, 胥峥, 等. 电力体制改革下的多虚拟电厂联合优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 42-49.
CHEN Yu, WEI Zhinong, XU Zheng, et al. Optimal scheduling strategy of multiple virtual power plants under electricity market reform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 42-49(in Chinese).
- [35] 刘思源, 艾芊, 郑建平, 等. 多时间尺度的多虚拟电厂双层协调机制与运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 753-761.
LIU Siyuan, AI Qian, ZHENG Jianping, et al. Bi-level coordination mechanism and operation strategy of multi-time scale multiple virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 753-761(in Chinese).
- [36] 江苏省经信委. 江苏省电力需求响应实施细则(修订版)[R]. 南京: 江苏省经信委, 2018.
- [37] 浙江省发展和改革委员会, 浙江省能源局. 省发展改革委关于深入推进供给侧结构性改革做好新形势下电力需求侧管理工作的通知[EB/OL]. (2020-07-08) [2021-04-14]. http://fzggw.zj.gov.cn/art/2020/7/8/art_1599544_50128806.html.
- [38] 东营市发展和改革委员会. 东营市发展和改革委员会关于转发《关于印发<2020年全省电力需求响应工作方案>的通知》的通知[EB/OL]. (2020-07-06) [2021-04-14]. http://www.dongying.gov.cn/art/2020/7/6/art_42499_9273208.html.
- [39] 河南省发展和改革委员会. 关于2019年开展电力需求响应工作的通知[EB/OL]. (2019-03-26) [2021-04-14]. <http://fgw.henan.gov.cn/2019/04-09/742118.html>.
- [40] 北极星售电网. 江西第四次居民需求响应试点补贴标准增加到0.9元/千瓦时[EB/OL]. (2019-08-12) [2021-04-14]. <https://shoudian.bjx.com.cn/html/20190812/999377.shtml>.
- [41] 广东省能源局. 广东省2019年电力需求响应方案(征求意见稿)[R]. 广州: 广东省能源局, 2019.

收稿日期: 2021-04-14; 修回日期: 2021-05-22。

作者简介:



宋莉

宋莉(1983), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力市场研究、市场建设、市场成员管理, E-mail: li-song@sgcc.com.cn。

刘敦楠(1979), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统自动化、电力市场、能源互联网。通信作者, E-mail: liudunnan@126.com。

(责任编辑 张宇)