

新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望

王彩霞¹, 时智勇¹, 梁志峰², 李钦森¹, 洪博文¹, 黄碧斌¹, 蒋莉萍¹

(1. 国网能源研究院有限公司, 北京市 102209; 2. 国家电网有限公司, 北京市 100032)

摘要: 能源转型背景下的电力清洁低碳化将推动传统电力系统向以新能源为主体的新型电力系统发展。新型电力系统中的电力供应保障和安全稳定运行能力将受到高比例新能源的极大挑战,传统电力系统运行模式下单靠电源侧资源已无法满足安全稳定且经济高效的电力供应要求,必须充分挖掘需求侧资源的潜力,由“源随荷动”向“源荷互动”转变。文中首先阐述了新型电力系统面临的电力安全可靠经济供应新形势,其次研究分析了国内外需求侧资源利用实践,在此基础上,提出了面向新型电力系统的需求侧资源利用关键技术,并从资源开发重点、运行管理、市场机制、政策措施、商业模式5个方面对中国新型电力系统需求侧资源利用进行了展望。

关键词: 新能源; 新型电力系统; 需求侧资源; 需求响应; 电力供应

0 引言

随着全球气候问题日益凸显,世界主要国家积极推进碳中和。加快发展非化石能源,尤其是风电、太阳能发电等新能源,是推动能源低碳转型的关键。2021年3月,中央财经委员会第九次会议提出构建以新能源为主体的新型电力系统。新型电力系统中电源结构、用电结构和系统生态将发生深刻变化^[1],仅依靠电源侧的调节能力已经难以保障新型电力系统的电力可靠供应和安全稳定运行,并且成本高昂。相比之下,需求侧的解决方案则通常规模较小,且选择更加多元化,推动电力系统由“源随荷动”向“源荷互动”转变,充分发挥需求侧资源在以新能源为主体的新型电力系统中的作用十分迫切和必要^[2-4]。

随着分布式电源、储电、储热、柔性调节等技术的应用,负荷用电特性发生重大变化。中国工业企业、商业建筑等用电负荷中蕴藏了巨大的可调节资源,但目前对需求侧资源调节能力挖掘不足,受到了市场、政策、技术等多方面的约束,难以形成稳定的负荷与电网协调互动能力,在新型电力系统中的作用发挥十分有限。诸多文献对需求侧资源的利用进行了研究,但相关研究仍基于传统电力系统开展,新能源为主体的电力系统中,需求侧资源利用的环境发生了深刻变化,其功能定位、市场机制、支持政策

均需要重新考量;同时,需求侧资源的类型也发生了深刻变化,由传统单向利用向双向互动转变,其开发重点、支撑技术、商业模式均需要创新拓展。

本文围绕以新能源为主体的电力系统面临的新挑战,从需求侧资源的利用方式和实践入手,研究未来需求侧资源开发重点,分析了以新能源为主体的新型电力系统中需求侧资源利用关键技术,并进行了展望。

1 需求侧资源利用面临的新形势

从需求侧资源利用的发展历程来看,需求侧资源利用方式主要包括有序用电、能效管理、需求响应、精准实时负荷控制等。有序用电是指在电力供应不足、突发事件等情况下,通过行政措施、经济手段、技术方法,依法控制部分用电需求,维护供用电秩序平稳的管理工作。能效管理是指采取技术和管理措施,在用电环节制止浪费、降低电耗、实现电力电量节约的需求侧资源利用方式。需求响应是指电力用户根据价格信号或激励措施,改变用电行为的需求侧资源利用方式。精准实时负荷控制是指由电网运行机构精准实时控制可快速响应的柔性负荷的需求侧资源利用方式。

随着中国电力市场改革的推进以及数字化技术应用,需求侧资源在新型电力系统中的价值日益凸显。中国2021年1月出现寒潮期间,在统筹全网支援能力、本地可用机组已全开满发情况下,需求侧资源在电网中发挥的作用不可或缺。未来,在继续做好发电侧与电网侧资源优化利用的同时,将需求侧

收稿日期: 2021-03-23; 修回日期: 2021-07-01。

上网日期: 2021-07-13。

国家电网公司科技项目(4000-202057046A-0-0-00)。

资源纳入电网规划与运行管理,发挥需求侧资源的灵活调节作用将成为保障新型电力系统电力可靠、稳定和低成本供应的关键手段。

相比于传统电力系统,新型电力系统在电源结构、用电结构和系统生态方面呈现新变化。在电源侧,新能源装机和发电占比将不断提升,逐步成为电力系统中的新增装机主体乃至电量供给主体,煤电逐步成为调节性电源。在用电侧,一方面,冬季、夏季“双峰”特征明显,尖峰负荷持续时间只有30~50 h,冬季高峰负荷逐步接近或超过夏季负荷,受气候变化影响,夏季极热、冬季极寒等极端天气下负荷可能急剧增长;另一方面,随着第三产业和居民用电负荷占比增加,电网负荷峰谷差持续扩大。此外,随着分布式新能源、储能等发展和互联网、通信等技术不断创新,电力消费模式正在发生变化,更多的电力用户参与到电力生产中,形成虚拟电厂、负荷聚合商、综合能源系统等多种新业态。

与此同时,电力系统也将面临前所未有的挑战。

一是电力系统将面临新的电力电量平衡难题,保供应压力加大。新能源发电具有随机性、波动性,从历史统计规律看,季节上的大风期和冬夏用电高峰期不一致^[5],冬夏季高负荷期,新能源近六成的时间出力处于装机容量的15%以下,电力平衡较紧张;从日内电力供应看,极热无风、晚峰无光,新能源发电能力与实际用电需求不匹配,晚峰时段新能源七成的时间处于装机容量的15%以下。极端场景下负荷激增,新能源却无能为力,如2020年末寒潮期间,湖南用电负荷快速增长,但超八成风电机组因冰冻无法发电,晚峰出力不足装机容量2%,甚至出现瞬时为零的情况。

二是电力系统安全稳定运行风险增加,保安全难度加大。新能源设备具有低抗扰性和弱支撑性,系统故障和极端情景下将严重冲击电力系统安全^[6]。近年来,中国新能源引发的电网安全事故时有发生,国外典型高比例新能源地区已出现新能源导致大规模停电的极端事故,如2019年8月英国大停电事故中新能源在系统发生扰动时大规模脱网,进一步加大了系统功率缺额^[7]。

三是新能源跨越式发展情况下,将新能源利用率保持在较高水平难度加大。实现新能源高效利用面临系统成本大幅上涨压力。随着新能源大规模接入电力系统,实现大规模新能源高效利用需付出灵活性电源投资成本、平衡成本、运行损失成本和电网投资成本等系统成本,推高电力系统供应成本。初步研究显示,新能源电量渗透率超过15%后,系统成本进入快速增长临界点。

面向中国未来以新能源为主体的电力系统,需求侧资源利用方式将以能效管理为基础,以有序用电作保底,更加注重需求响应和精准实时负荷控制在保障电力系统安全稳定经济运行中的作用。具体来讲,需求侧资源的主要作用可分为3类:第1类是保供应,即保障电力可靠供应,在新的电源结构和用电结构形势下,支撑电力供需平衡;第2类是保安全,即保障电网安全稳定运行,在电网紧急情况下,作为常态化可调度资源;第3类是以最低的成本实现新能源高效利用。即需求侧资源与发电侧资源、电网侧资源、储能等协同利用,以最经济的方式实现电力安全可靠供应与新能源高效利用。

2 国内外需求侧资源利用的实践

2.1 需求侧资源利用的国外实践

欧美等发达国家和地区在需求侧资源利用方面的研究开展较早,20世纪70年代美国最早提出了电力需求侧管理,得益于较为成熟的政策法规和市场环境,欧美在需求侧资源利用方面积累了丰富的经验^[8-9]。

在应用场景方面,需求侧资源广泛应用于提升系统经济性、安全性、可靠供电以及节能增效。提升系统经济性方面,美国能源部报告显示纽约独立系统运营商(NYISO)、新英格兰独立系统运营商(ISO-NE)、宾夕法尼亚-新泽西-马里兰联合电力市场(PJM)等区域输电组织通过需求响应每年每千瓦分别获益0.22、0.04、0.29美元^[10];提升安全性方面,如2006年,美国得克萨斯州电网发电容量瞬时缺失1 000 MW,频率跌至59.7 Hz,需求侧资源快速响应,总容量达到1 150 MW,在保障电网频率稳定方面起到关键作用^[11];保障可靠供电方面,2015年,德国日全食期间光伏出力呈“V”形变化,为解决供需不平衡问题,启动了需求响应,减少负荷3 800 MW,约占光伏下降出力的46%;提升能效管理方面,日本积极引进需求侧资源利用新形式,提出了“负电力”市场,实行终端用能产品能效领跑者制度。

在激励机制方面,欧美均建立了“尖峰电价+中断补偿”的激励机制。美国采用居民用户分时电价、工业用户实时电价激励机制,为用户提供不同电价方案,激发用户参与积极性,加州等地区逐步试点尖峰电价,削峰效果显著。针对中断负荷激励,加大补偿力度,如挪威提前15 min通知,补偿标准达到了502倍电价,负荷种类不限;在美国加州对于提前30 min通知的中断负荷,补偿标准为120倍电价。

在市场建设方面,依托成熟的电力市场环境,欧

美建立了较为完备的需求侧资源参与各类细分市场的规则和交易机制。通过立法明确需求侧资源参与容量市场、电量市场、辅助服务市场等各类市场的主体地位,市场主体主要包括配售电公司、负荷聚合商、工商业负荷等;利用方式包括以降低电价为目标的经济型利用方式和以保障电网安全可靠运行目标的紧急型负荷控制利用方式;收益模式上普遍按照可用性和响应效果进行奖惩^[12]。2019年,美国PJM中需求侧资源平均收益达到了34.73美元/MW。2020年,美国联邦能源委员会(FERC)批准了一项具有突破性的规则,允许分布式能源资源聚合商在批发电力市场上竞争,扩展了需求侧资源的应用空间。

在商业模式方面,欧美形成了集合需求响应、能效管理、能源交易和数据增值服务的多元化商业模式。美国售电公司基于智能能源中心开展电力需求侧资源利用,用户在总用电成本和生产生活习惯不变的情况下,丰富了能源使用选择权,有利于提高用户满意度。欧美也是负荷聚合商最为活跃的地区,为需求侧资源的汇聚利用提供了良好的平台环境,美国EnerNOC公司全球网络运营中心每月可收集和评估近15亿个能源数据点,为客户提供可靠的需求响应能力和节能机会;德国Next Kraftwerke公司聚合其庞大的分布式电源与可调负荷参与电能量交易、辅助服务、需求响应以及峰谷套利,通过市场与技术手段并用,实现单体规模小、分布零散、调度和交易难度大、成本高的需求侧资源获利。澳大利亚等通过智能电表开展用户友好互动、配电网运行管理等增值业务。

在重点技术方面,分布式电源、储能等需求侧资源进入市场,创新应用蜂窝技术、物联网等新兴技术得到了推动^[13-14]。美国通过创建能源数据云平台实现对智能电表数据进行监控、分析、预测,提高需求响应的精准度;美国某负荷聚合商集中控制加州地区的电池储能,向电力公司提供需求响应服务;爱尔兰某公司通过聚合电动汽车参与需求响应;法国和比利时聚合商通过物联网将工商业负荷以及分布式电源聚合以提升需求侧资源利用水平。

2.2 需求侧资源利用的国内实践

国内需求侧资源利用以需求响应优先、有序用电保底^[15]。2014年以来,中国上海、北京、江苏、天津等省市相继实施了削峰、填谷需求响应。2016年,江苏省大规模源网荷友好互动系统投运。

在应用场景方面,中国需求响应实践主要集中于江苏、浙江、上海、江西、山东等中东部负荷密集、峰谷差较大的地区,针对送、受端电网在冬季供暖、

迎峰度夏、电网极端故障等场景下的新能源利用、供需平衡、事故支撑等需求,形成了削峰、填谷、精准实时负荷控制3种具体实施方式。削峰方面,2016年,江苏为了缓解迎峰度夏期间电网供需压力、解决局部负荷过载问题,通过尖峰电价和可中断负荷补贴,工商业自主响应负荷3.52 GW;填谷方面,如2020年10月前3日,江苏通过需求响应累计填谷13.4 GW,促进清洁能源利用86.9 GW·h,保障了长假期间电网安全稳定运行;精准负荷控制方面,为提升华东电网最大可受直流馈入容量,保障电网安全稳定运行,江苏实现了3.76 GW秒级、2.60 GW毫秒级的精准切负荷能力,参与用户达1788个。

在激励机制方面,江苏、天津等地建立针对工业用户的尖峰电价机制,利用提价收入建立资金池,用于需求响应补贴及相关平台系统建设。天津区分填谷和削峰需求响应进行补贴管理,同时根据电力供需情况,确定启动需求响应的类型和规模。江苏、山东等地制定了分级补偿标准,补偿标准与响应持续时间和响应前通知时间有关。

在市场建设方面,江苏率先出台需求响应实施细则,江苏、山东以单边市场竞价方式采购需求侧资源;浙江出台鼓励第三方参与辅助服务市场的试点方案,建立需求响应补贴和市场“双重”机制。

在商业模式方面,中国需求侧资源利用的商业模式较为传统和单一,多由电网公司组织,用户独立参与,最终通过中标容量和实际响应效果获得补偿。近年来,以分布式电源、可调节负荷为代表的新型需求侧资源库不断拓展,新的商业模式不断得到尝试,如上海积极推动虚拟电厂运营试点参与中长期需求响应,成功组织虚拟电厂参与需求响应市场化试点交易3次(端午填谷、国庆填谷、迎峰度冬削峰),有效交易出清容量总计151.5 MW,有效支撑了上海电网用电高峰期的调峰需求。

在技术方面,江苏电网和浙江电网分别依托自主研发的需求响应平台,积极开展多类型用户的负荷柔性控制改造及智能终端部署,研发各类可调节智能终端和负荷集控系统,满足电力供需平衡和动态响应的不同要求。江苏电网利用大数据分析,智能挖掘潜在客户。上海的自动需求响应客户端为用户参与需求响应提供了便捷条件。

3 面向新型电力系统的需求侧资源利用关键技术

3.1 需求侧资源利用关键技术研究现状

针对需求侧资源技术的研究主要包括2类:一类是需求侧资源的利用技术,另一类是需求侧资源

利用的支撑技术。其中需求侧资源的利用技术包括运行控制技术、优化调度技术以及协同规划技术。需求侧资源利用支撑技术主要以“大云物移智链”为基础的计算、通信、交易等技术。

1)需求侧资源参与系统调频和安全稳定运行的控制技术研究

面向未来新型电力系统,需求侧资源发挥保安、保供的作用需要纳入电力系统运行控制体系。目前,已有需求侧资源利用的运行控制研究主要集中在调频和保障系统安全稳定运行领域。调频方面,文献[16]提出一种大功率缺失下频率响应负荷聚合建模与分散控制方法;文献[17]研究了通过模糊控制调节需求侧各类变频空调的出力,辅助发电机组改善系统的动态调频性能。保障系统安全稳定运行方面,文献[18]介绍了支撑特高压互联电网安全稳定的负荷友好互动技术,提出了毫秒级紧急控制、秒级次紧急控制、分钟级常规控制3种模式,并介绍江苏电网在负荷参与电网友好互动方面的工程实践;文献[19]提出了备调池的概念,将温控负荷、电动汽车、电储能等纳入需求侧资源备调池,通过聚合需求侧可控负荷资源,为电力系统低频减载提供负荷削减,并通过资源池内多类可控负荷协同控制,提供较长时域的负荷削减持续时间,为电力系统频率故障排除及频率恢复争取时间。需求侧资源单体容量小,分布广而散,在实际应用中难以做到接收自动发电控制(AGC)指令并进行连续调节,而在电网二次调频领域应用较少,但随着电动汽车、用户侧分布式储能的普及,需求侧资源参与二次调频逐渐被关注^[20]。已有研究已在将需求侧资源纳入电网运行控制方面做了有益探索,未来仍需丰富需求侧资源参与系统运行控制的类型,特别是将需求侧资源纳入安全防御体系的运行控制的研究亟待开展。

2)以新能源高效利用为目标的需求侧资源优化调度策略研究

将需求侧资源常态化纳入系统调度是新型电力系统构建的重要内容。需要综合考量需求侧资源的成本、调节特性等,并与储能、常规电源等做好协同优化。目前,需求侧资源尚未常态化纳入调度计划安排中,考虑需求侧资源在系统优化运行方面的重要价值,部分文献分别从大电网和园区层面进行了研究。大电网中,相关研究主要集中在经济调度和促进新能源利用领域。文献[21-22]以系统经济性最优和弃风率最小为目标函数,构建了考虑火电深度调峰主动性与需求响应的含储能电力系统优化调度模型;文献[23]以多目标安全为约束,兼顾发电

侧与需求侧柔性负荷的双侧协调配合,建立了机组组合优化模型。在配电网以及园区环境下,需求侧资源优化调度的目的在于提升能源综合利用效率。文献[24]以综合能源系统中能耗成本、污染排放、风电消纳等多个调度为目标,建立了考虑综合需求响应的优化模型;文献[25]设计了园区多能源系统综合需求侧响应策略,以解决传统工业园区能源利用效率低、电能紧缺等问题。已有研究多以降低新能源弃电率为优化目标,考虑需求侧资源与电源的协同优化调度,对需求侧资源利用、储能、电源调节等成本的综合比对与系统优化考虑不足,且在源网荷储一体化调度与需求侧资源聚合体的分层控制协调方面需要进一步深化研究。

3)考虑需求侧资源的多目标协同规划技术研究

将需求侧资源常态化纳入系统规划,在规划阶段做好各类资源协同、实现系统经济性最优是提高系统效率、降低系统成本的重要内容。目前,需求侧资源利用尚无专项的规划,也未被纳入电力系统规划之中,文献[26]研究显示预计“十四五”期间大部分地区需求响应占最大负荷的比例达到5%左右,为应对电力供需矛盾应将需求响应纳入电力规划。面向高比例新能源电力系统,部分文献对考虑需求侧资源的网源规划进行了研究,文献[27]阐述了灵活性资源规划的迫切性,并提出了包含需求侧资源的源网荷储四元结构平衡的规划模型;文献[28]提出了考虑广义需求侧资源的江苏“十四五”电源规划方案;文献[29]提出考虑环境成本和需求侧管理的电源规划模型;文献[30]提出考虑可再生能源与需求响应协同增效的规划方法。在配电网方面,需求侧资源的规划更多是提升分布电源的接入水平。如文献[31]考虑主动管理与需求侧管理研究主动配电网分布式光伏最大准入容量配置方法;文献[32]考虑分布式电源和需求侧响应的配电网综合规划以提高配电网运行的良好经济性和安全可靠。将需求侧资源作为新型电力系统的常态化资源纳入规划,如何评估需求侧资源的潜力、特性、成本,并与其他资源做好协同,仍需进一步深化研究。

4)“大云物移智链”下需求侧资源利用支撑技术研究

需求侧资源潜力挖掘和作用发挥离不开“大云物移智链”等各类先进技术的支撑。文献[33]开展了电力需求侧的大数据应用研究,从几个典型案例出发分析了电力大数据应用的瓶颈问题;文献[34]从需求侧响应、有序用电和能效管理3个方面对基于数据挖掘的电力需求侧管理进行了综述;文献[35-36]分别研究了人工智能和深度强化学习技

术在需求响应方面的应用;文献[37]提出了一种以电网侧云平台为主导、聚合商内部分散协同加用户侧边缘控制主动响应的能源互联网供需资源协调控制框架及方法;文献[38]提出一种需求响应边缘节点云部署方法,缓解电网需求侧管理平台处理海量业务的压力,提高电力用户底层终端的管理质量;文献[39]从工作量证明机制、互联共识、智能合约、信息安全等方面剖析了区块链在自动需求响应系统中的关键问题。量测和通信技术作为用户参与需求响应的支持技术^[40-43],是承担用户管控用电设备、参与电力交易和电网互动任务的基础技术^[44]。面向新能源为主体的新型电力系统中,需求侧资源具有海量的通信节点,并对通信实时性、可靠性、安全性提出了更高要求,有必要对基础性、通用性的通信技术开展研究。

3.2 面向新能源为主体的新型电力系统需求侧资源利用关键技术研究探讨

1)考虑需求侧资源利用的新型电力系统安全防御及韧性提升技术

高比例新能源接入情况下,电力系统运行机理更加复杂,故障不确定性更强,传统安全防御体系不具备灵活应对不确定性故障的能力,无法保障复杂故障条件下的电网安全运行。需要将需求侧资源纳入电网安全防御体系,研究需求侧资源与源、储等资源的系统运行控制,提出综合考虑源网荷储各类资源的电力系统安全防御设防标准和韧性提升方法。

2)源网荷储一体化分层协同调度技术

将需求侧资源作为常态化资源纳入电网调度体系,实现源网荷储协同调度,是发挥需求侧资源作用的关键。源网荷储协同调度技术包括大规模源网荷储多维度协调优化控制方法、大规模可中断负荷精准控制技术、基于多安全约束的大规模精准负荷恢复技术、负荷优化控制技术、调度营销一体化控制技术等。

3)新型电力系统源网荷储协同规划技术

一方面,分布式电源和电动汽车的发展,使得负荷曲线发生根本性变化,用电设备隐蔽性也不断增加,需要采取更加灵活的监测手段,如使用非侵入式量测方式和大数据分析技术等,对需求侧资源进行识别和分析建模。

另一方面,需要建立面向新型电力系统源网荷储协同规划的典型场景,研究灵活调节资源平衡技术,综合对比源网荷储各类调节资源的利用成本与调节特性,研究满足源网荷储协同发展的规划方法及全环节成本综合效益评估技术,研究在极端气候条件下源网荷储协同保障供能安全的可靠性评估

技术。

4)面向海量通信节点的需求侧资源互动通信技术

未来,随着需求侧资源种类和规模的不断增加,需求响应的复杂性、互动性和灵活性也不断增强^[45],各类传统和新兴资源的检测、识别和管理的要求也不断提高,并出现多技术、多层级、多主体的综合管控平台^[46],在丰富需求侧资源利用手段的同时,也极大地增加了协调控制和运营管理的难度。未来需求侧资源小型化、分散化和数字化的趋势日益明显,对信息通信的要求也不断提高。一方面需要建立电网与需求侧资源统一的互操作协议,统一、安全、高效的互操作协议可以为复杂业务交互逻辑提供有力支撑。另一方面,需求侧资源利用模式和应用场景对通信服务的质量要求也各有不同,需要制定合理的通信服务并辅以通信自适应控制策略加以优化。面对海量需求侧资源的接入以及互动水平的提升,网络安全问题应引起高度重视,部分聚合商已经具备了大型发电厂同等容量规模的资源,在网络安全技术方面需要做到隔离、认证等多重防护。

4 面向新型电力系统的需求侧资源利用展望

4.1 总体原则

“十四五”期间中国新能源将实现超常规、跨越式发展,以新能源为主体的电力系统迫切需要需求侧资源提升安全性、可靠性、经济性。目前,中国需求侧资源的利用多以解决个别实际问题(例如迎峰度冬、度夏)为导向,尚未形成系统的开发思路和原则。因此,“十四五”期间需求侧资源的利用迫在眉睫,需要及早明确总体原则。

一是承担“共同但有区别”的系统责任。将需求侧资源作为常态化资源纳入电力系统运行管理,与各类发电机组类似,共同承担支撑电网安全、可靠、经济运行的责任。初期,可以根据需求侧资源特性以及电力系统应用场景不同,适当降低需求侧资源承担的责任。

二是结合系统需求,因地制宜开展。结合地区性系统需求,分地区、有侧重地推进需求侧资源利用。对于上海、江苏等经济发达且有一定应用基础的电力受端省市,重点探索需求侧资源在保证电力可靠供应和安全稳定运行中的作用;对于西北新能源富集地区,优先探索需求侧资源与储能、火电机组灵活性改造等其他灵活性资源的协调优化运行,降低电力系统供应成本。

三是政策引导,市场主导。初期,通过完善分时电价、补贴等激励机制,推动需求侧资源利用方式和规模持续发展。随着中国电力市场的建设,应逐步

将用户或负荷聚合商作为市场主体,纳入电力市场体系,更多地采用市场化的方式,调动需求侧资源参与各类细分市场。

4.2 新能源为主体的电力系统需求侧资源利用体系构建

在明确总体利用原则的基础上,对比国内外研

究现状和实践经验,结合中国电力体制特点,从需求侧资源的利用场景出发,分别从资源开发重点、运行管理、市场机制、政策措施以及商业模式5个方面对中国新型电力系统需求侧资源的利用架构进行设计,如表1所示。

表1 新型电力系统需求侧资源利用架构
Table 1 Demand-side resource utilization architecture for new power system

需求侧资源利用场景	需求侧资源开发重点	运行管理				市场机制				政策措施	商业模式
		控制模式	响应性能	量级要求	运行方式	市场类型	交易品种	交易标的	价格机制		
保供应	电动汽车、分布式电源、储能、工业可调负荷	自主响应	小时级	容量型	调峰、电力平衡	中长期、现货	调峰、爬坡	电量	激励性的电量电价	①激励和补贴 ②技术支撑和平台建设 ③试点示范 ④技术标准建设	①固定补偿模式 ②电力市场模式 ③输配电价模式
保安全	可中断负荷、商业与居民空调负荷、储能	紧急负荷控制	毫秒级至数分钟级	功率型	一二次调频、紧急备用	辅助服务、容量市场	调频、容量备用	电量、容量、里程	容量补偿与电量/里程补偿相结合		
降低电力供应成本	储热蓄冷、电制气、数据中心	自主响应	小时级	容量型	调峰、电力平衡	中长期、现货、容量市场	调峰、容量备用	电量、容量	减少投资、降低运行成本		

1) 资源开发重点

需求侧资源潜力的开发取决于利用技术和市场机制^[47]。随着利用技术的提升和市场机制的成熟,需求侧资源潜力也会持续增加。例如在美国,这一比例从2005年的3%升至2020年的6%。在中国,预计到2025年,需求侧资源利用规模有望达到70 GW,约占最大负荷的4%。长期来看,未来高比例新能源电力系统的需求侧资源利用规模有望达到20%以上的较高水平。

大工业用户仍是目前需求侧资源利用的主体,但随着未来控制技术和管理手段的丰富完善,居民用户的资源利用潜力和实际规模均将快速增加。目前,参与需求响应的用户以工业负荷为主,规模占比达95%以上。未来,随着用户侧储能和电动汽车等多元新兴负荷不断涌现,居民负荷中可参与需求响应的占比将不断攀升,并将逐步成为主要的需求响应资源^[48-50]。根据国际可再生能源署的2050能源

场景研究,预计全球电动汽车总数将达10亿辆,电储能容量达到12 TW·h,空调热泵数骤增至2.5亿台以上,长途货运等其他领域则可能使用电制氢及合成气^[51]。

不同需求侧资源的特性存在较大差异,如表2所示,需要在资源潜力分析和实际利用时加以考虑,充分发挥各自特点。例如,大部分空调负荷、工业负荷、电蓄热/冰蓄冷等可中断负荷通常是分钟级以上的响应,满足电力供需平衡的长时间尺度要求,可视为常规需求侧资源;电动汽车、用户侧储能等则可实现秒级甚至毫秒级的快速响应,实现负荷精准控制,参与更加快速的电力系统调节,属于调节性能更为优越的动态响应资源。综合来看,大工业负荷、空调负荷等是近期需求侧资源开发的重点;用户侧储能、电动汽车、电蓄热和数据中心等不断涌现的新兴资源,代表了未来需求侧资源开发的重点。

表2 需求侧资源特性
Table 2 Characteristics of demand-side resources

特性类型	传统资源		新兴资源				
	工业可调、可中断负荷	商业和居民空调负荷	电动汽车	分布式电源、用户侧储能	电蓄热、冰蓄冷	数据中心	电制气负荷
已利用规模	大	中到大	小	小	小	中	小
可开发潜力	中到大	大	大	中到大	大	中到大	中
响应性能	毫秒到小时级	分钟到小时级	毫秒到分钟级	毫秒级	分钟到小时级	分钟到小时级	分钟到小时级

2) 运行管理

已有研究将需求响应概念扩展到快速需求响应以及动态需求响应^[52],对需求侧资源的响应速度更为关注,更加注重需求侧资源在改善电网动态过程中的作用。实际运行中,目前对于参与需求响应的需求侧资源以自主响应为主,响应时长一般为小时级,运行方式不受调度直接控制;对于参与精准负荷控制的需求侧资源,目前已实现毫秒级、秒级及分钟级的响应时间,且完全由调度控制,但规模仍然较小。对于未来的新型电力系统,需要根据不同应用场景,对需求侧资源的控制模式、响应性能、量级要求和运行方式等进行精细化管理。

控制模式方面,保供应和降低电力供应成本的需求侧资源以自主响应为主,调度机构进行安全校核;保安全的需求侧资源主要为紧急负荷控制,在电网需要时调度机构可通过预先通知或紧急控制的模式利用需求侧资源。

响应性能方面,保供应和降低电力供应成本的需求侧资源侧重于对响应时长的要求,一般为小时级;保安全的需求侧资源侧重于对响应速度的要求,根据不同的运行需要一般在毫秒级到数分钟级。

量级要求方面,保供应和降低电力供应成本的需求侧资源多为电量型负荷,容量大小一般根据电力系统运行经济性出发,由市场交易规模和交易价格确定;保安全的需求侧资源多为功率型,从满足电力系统安全可靠运行需求出发,由调度核定规模和响应量级。

运行方式方面,保供应和降低电力供应成本的需求侧资源运行方式主要包括调峰和电力平衡,以应对高比例新能源电力系统上下调节能力不足和用电高峰时段系统发电能力不足的问题;保安全的需求侧资源运行方式主要包括一二次调频、紧急功率支撑、紧急负荷控制等,以应对暂态工况下电力系统调频能力不足导致的频率失稳问题。

3) 市场机制

成熟的电力市场环境 with 激励政策可有效提高需求侧资源服务电力系统安全、可靠、经济运行的积极性。欧美等国家和地区需求侧资源主要通过常态化参与电力市场实现应用,对引导需求侧资源参与系统调节发挥了重要作用。中国电力市场的建设为需求侧主动响应提供了发展机遇^[53],相关研究给出了需求响应市场化交易分阶段的设计思路,构建需求侧资源参与辅助服务、现货市场、中长期市场的基本框架,并对日前、实时市场进行优化分析^[54]。在以新能源为主体的电力系统中,应以需求为导向,细化产品类型,发挥市场的资源优化配置作用,调用不同

类型需求侧资源提供差异化的服务。需求侧资源利用的市场机制设计主要包括市场类型、交易品种、交易标的以及价格机制。

市场类型方面,保供应的需求侧资源利用以中长期和现货等电能量市场为主;保安全的需求侧资源利用以辅助服务市场和容量市场为主;降低电力供应成本的需求侧资源利用以中长期、现货市场和容量市场为主。

交易品种方面,保供应的需求侧资源利用主要参与调峰和爬坡等辅助服务市场。调峰辅助服务市场本质上属于电能量市场,中国多个省份出台的调峰辅助服务市场运营规则允许需求侧资源与新能源进行双边交易,未来随着现货市场的成熟运营,调峰辅助服务市场将与现货市场融合;保安全的需求侧资源利用主要参与调频和容量备用市场,随着高比例新能源并网,电力系统对快速调频、容量备用等灵活性资源需求迫切,该类新型市场交易品种为需求侧资源利用提供了更多的选择;降低电力供应成本的需求侧资源利用主要参与调峰和容量备用交易。

交易标的方面,保供应的需求侧资源交易标的为某些时段的电量;保安全的需求侧资源交易标的以容量、调节里程为主。降低电力供应成本的需求侧资源交易标的以电量和容量为主。

价格机制方面,保供应的需求侧资源主要通过激励性的电量电价来确定收益;保安全的需求侧资源主要通过容量补偿与调用后的有效电量、有效里程补偿相结合确定收益,并突出按利用效果补偿;降低电力供应成本的需求侧资源主要通过减少电源电网投资、节约电量、容量备用成本等确定收益。

4) 政策措施

“十三五”时期,中国电力需求侧管理政策体系逐渐完善,并取得了显著成效^[55]。以新能源为主体的电力系统中,需求侧资源的利用将面临新形势、新任务和新要求,已有研究主要集中在支持政策上,如提出财政资金支持电力需求侧管理工作的政策建议^[56];建立投资补贴机制,以基金方式对新能源并网相关需求响应项目进行一次性投资补贴;通过峰谷分时电价对居民进行激励等^[57]。目前,中国需求侧资源的利用形式较为单一,主要侧重于削峰填谷,仅作为保障电力系统安全运行的补充手段,利用规模上仍然较小,用户参与意识和意愿不强,因此需要加强政策顶层设计,发挥政策引导和驱动作用,近期应着重加快激励机制、技术平台、试点应用和标准完善等相关政策、措施的制定。

一是完善需求侧资源利用的激励机制,提高需求侧资源响应的积极性。明确市场过渡期需求侧资

源常态化纳入系统运行的政策激励机制,加大激励力度,培育市场主体参与意识,根据电力系统不同应用场景对需求侧资源的特性需求,以及相应需求侧资源的稀缺程度,建立不同等级、不同幅度的激励标准,设立专项资金,形成长期稳定的资金来源。

二是推进技术支撑和平台建设,为需求侧资源利用提供物理基础。采用先进的软硬件技术作为支撑,实现信息交互和共享、用电在线监测、数据统计分析、用电决策支持等功能。利用大数据、云计算等先进理念和技术,建设线上线下一体化客户服务平台,及时向用户发布用能信息,引导用户主动节约用能。推动智慧能源系统建设,通过综合能源服务等挖掘需求侧资源的潜力。

三是扩大需求侧资源利用试点范围,为需求侧资源利用推广积累经验。尤其是结合部分省份推进的源网荷储调度系统建设,加大对保安全的需求侧资源利用试点示范,持续完善需求侧资源保障电网安全稳定运行的相关技术要求,并在现有精准负荷控制试点的基础上,丰富需求侧资源应用模式和控制方式,从多样性、灵活性、协同性等方面优化完善运行调控手段。

四是完善技术标准,降低需求侧资源利用的成本。加快需求侧资源利用效果测量验证、负荷聚合商响应技术、空调系统终端技术标准研究,为开展需求侧资源利用提供统一的技术基础。与此同时,推动需求侧资源利用平台功能、互动终端接入、信息交换等方面的标准化建设。

5) 商业模式与工程建设投资

欧美得益于成熟的售电侧竞争机制和开放的市场环境,需求侧资源利用的新模式、新业态不断涌现。中国需求侧资源利用尚未形成成熟的商业模式,部分试点示范尚未大面积推广和商业化应用,负荷聚合商数量较少,盈利模式缺失。根据价格形成与疏导机制,可以分为3类。第1类满足特定响应要求时,通过获得一定的补偿获得收益。该模式下,对于不同的需求侧资源利用方式,有明确的补贴标准,需求侧资源提供相应的服务,通过中标容量和实际响应效果获得补偿。第2类是需求侧资源纳入电力市场,通过市场机制疏导成本。该模式下由大型的工商业用户或者负荷聚合商、虚拟电厂等市场主体通过参与电能市场、容量市场或辅助服务市场,提供相关的服务获得收益。第3类是将需求侧资源利用的相关成本纳入电网输配电价。该模式下电网为需求侧资源服务的购买者,相关成本在用电侧进行全电量分摊。第1类模式目前已经采用,但存在补贴标准低、缺乏稳定补贴资金来源的问题;第2类模

式是未来的发展方向;第3类模式因全体电力用户受益且难以分配具体时段成本(如特定情况下保障系统安全),需要相关政策的支持。

新能源为主体的新型电力系统,需求侧资源利用的相关投资和工程建设将成为重要内容。研究显示,在供给侧建设调峰电厂和配套电网满足尖峰负荷的投资成本高达约1万元/kW,在需求侧开展需求响应削减尖峰负荷的投资成本仅为前者的14%~20%。以陕西电网2020年迎峰度冬高峰电力缺口1.5GW测算,需投资150亿元解决短时期用电需求,而采取需求响应,则仅需要24亿元(按照需求响应补贴20元/(kW·h),利用天数20d,每天高峰时段4h测算),在有效解决供需矛盾的同时,将大大减少全社会整体投资^[58]。国家对需求响应能力建设提出明确要求,通过引导和激励电力用户挖掘调峰资源,形成占年度最大用电负荷3%左右的需求响应能力^[59]。面对如此大规模需求侧资源的利用,相关的终端设备、通信网络、管理平台建设投资需要稳定的商业模式进行支撑。目前,国家-省级-企业信息化平台架构基本建成^[60],国家电力需求侧管理平台侧重于监测和目标考核,省级电力需求侧管理平台侧重于组织和管理。未来应加快电网与负荷之间以控制运行行为为主要功能的设施建设投资,真正发挥需求侧资源的价值。

5 结语

为应对以新能源为主体的电力系统在电力供应、安全稳定运行等方面的新挑战,必须将需求侧资源充分调动起来,从技术、运行管理、市场、政策等方面协同发力,推动电力系统由“源随荷动”向“源荷互动”转变,实现需求侧资源在新能源为主体的电力系统中的大规模应用。

面向“十四五”时期乃至中远期,如何在电力系统规划以及运行管理中充分考虑需求侧资源,将是未来以新能源为主体的新型电力系统实现安全、可靠、经济、低碳电力供应的一个重要考量,对实现中国能源革命与能源高质量发展具有重大意义。

参考文献

- [1] 陈国平,董昱,梁志峰.能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5493-5506. CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5506.
- [2] 陈国平,李明节,许涛,等.关于新能源发展的技术瓶颈研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):20-27.

- CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27.
- [3] 曾博,杨雍琦,段金辉,等. 新能源电力系统中需求侧响应关键问题及未来研究展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 10-18.
- ZENG Bo, YANG Yongqi, DUAN Jinhui, et al. Key issues and research prospects for demand-side response in alternate electrical power systems with renewable energy sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 10-18.
- [4] DEHGHANPOUR K, AFSHARNIA S. Electrical demand side contribution to frequency control in power systems: a review on technical aspects [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015(41): 1267-1276.
- [5] 李明节,陈国平,董存,等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986.
- LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system [J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986.
- [6] 陈国平,李明节,许涛,等. 中国电网支撑可再生能源发展的实践与挑战[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3095-3103.
- CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Practice and challenge of renewable energy development based on interconnected power grids [J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3095-3103.
- [7] 方勇杰. 英国“8·9”停电事故对频率稳定控制技术的启示[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 1-5.
- FANG Yongjie. Reflections on frequency stability control technology based on the blackout event of 9 August 2019 in UK [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 1-5.
- [8] 黄韧,张素芳. 主要发达国家电力需求侧管理的实践及启示[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2020(6): 47-55.
- HUANG Ren, ZHANG Sufang. Practice and enlightenment of power demand-side management in major developed countries [J]. Journal of North China Electric Power University (Social Science Edition), 2020(6): 47-55.
- [9] 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.
- [10] U. S. Department of Energy. Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them [R]. 2006.
- [11] IRENA. Demand-side flexibility 2019 for power sector transformation[R]. 2019.
- [12] PJM. Load management performance report 2019/2020 [R]. 2020.
- [13] IRENA. Global energy transformation: a roadmap to 2050[R]. 2018.
- [14] ANTONOPOULOS I, ROBU V, COURAUD B, et al. Artificial intelligence and machine learning approaches to energy demand-side response: a systematic review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 130(C): 1-35.
- [15] 王志轩. 中国电力需求侧管理变革[J]. 新能源经贸观察, 2018(9): 27-34.
- WANG Zhixuan. Reform of power demand side management in China[J]. New Energy Economic and Trade Observation, 2018(9): 27-34.
- [16] 陶苏滕,王琦,赵奇,等. 大功率缺失下频率响应负荷聚合建模与分散控制方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 182-188.
- TAO Sumeng, WANG Qi, ZHAO Qi, et al. Aggregation modeling and decentralized control method of frequency response load under severe power shortage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 182-188.
- [17] 张杰,高广玲,张智晟. 需求响应参与电力系统调频的模糊控制策略[J]. 广东电力, 2020, 33(3): 64-71.
- ZHANG Jie, GAO Guangling, ZHANG Zhisheng. Fuzzy control strategy of demand response participating in power system frequency modulation [J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(3): 64-71.
- [18] 尹积军. 支持特高压互联网安全运行的供需友好互动技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5715-5723.
- YIN Jijun. Research on load friendly interactive technology for safe operation of UHV interconnected power grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5715-5723.
- [19] 孙毅,李泽坤,黄绍模,等. 基于分布式需求侧资源备调池的低频减载优化策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 1016-1026.
- SUN Yi, LI Zekun, HUANG Shaomo, et al. An improved UFLS strategy based on distributed demand side resource pools [J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 1016-1026.
- [20] 吴洲洋,艾欣,胡俊杰. 需求侧灵活性资源参与调频辅助服务的备用优化与实时调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(6): 148-157.
- WU Zhouyang, AI Xin, HU Junjie. Reserve optimization and real-time scheduling of frequency regulation ancillary service with participation of flexible resource on demand side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 148-157.
- [21] 崔杨,周慧娟,仲悟之,等. 考虑火电调峰主动性与需求响应的含储能电力系统优化调度[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1674-1684.
- CUI Yang, ZHOU Huijuan, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal dispatch of power system with energy storage considering deep peak regulation initiative of thermal power and demand response [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1674-1684.
- [22] 崔杨,张家瑞,仲悟之,等. 考虑源-荷多时间尺度协调优化的大规模风电接入多源电力系统调度策略[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1828-1837.
- CUI Yang, ZHANG Jiarui, ZHONG Wuzhi, et al. Scheduling strategy of wind penetration multi-source system considering multi-time scale source-load coordination [J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1828-1837.
- [23] 王晗,徐潇源,严正. 考虑柔性负荷的多目标安全约束机组组合优化模型及求解[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1904-1912.
- WANG Han, XU Xiaoyuan, YAN Zheng. Multi-objective optimization of security constrained unit commitment model and solution considering flexible load [J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1904-1912.
- [24] 魏震波,任小林,黄宇涵. 考虑综合需求侧响应的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. 电力建设, 2020, 41(7): 92-99.

- WEI Zhenbo, REN Xiaolin, HUANG Yuhan. Multi-objective optimal dispatch for integrated energy system considering integrated demand response [J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(7): 92-99.
- [25] 陈锦涛, 杨苹, 陈滢, 等. 基于综合需求侧响应策略的园区多能源系统优化运行[J]. *可再生能源*, 2021, 39(2): 222-228.
CHEN Jintao, YANG Ping, CHEN Ying, et al. Optimized operation of multi-energy system in the industrial park based on integrated demand response strategy [J]. *Renewable Energy Resources*, 2021, 39(2): 222-228.
- [26] 谭显东, 刘俊, 徐志成, 等. “双碳”目标下“十四五”电力供需形势[J]. *中国电力*, 2021, 54(5): 1-6.
TAN Xiandong, LIU Jun, XU Zhicheng, et al. Power supply and demand balance during the 14th Five-Year Plan period under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. *Electric Power*, 2021, 54(5): 1-6.
- [27] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(13): 147-158.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(13): 147-158.
- [28] 葛毅, 陈佳铭, 朱永康, 等. 考虑广义需求侧资源的江苏“十四五”电源规划[J]. *电力需求侧管理*, 2021, 23(2): 4-9.
GE Yi, CHEN Jiaming, ZHU Yongkang, et al. Power generation planning considering generalized demand-side resources of Jiangsu province in the 14th Five-Year Plan period [J]. *Power Demand Side Management*, 2021, 23(2): 4-9.
- [29] 张晓辉, 同鹏达, 钟嘉庆, 等. 考虑环境成本和需求侧管理项目的电源规划模型[J]. *电网技术*, 2015, 39(10): 2809-2814.
ZHANG Xiaohui, YAN Pengda, ZHONG Jiaqing, et al. Generation expansion planning model incorporating environment cost and demand side management programs [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(10): 2809-2814.
- [30] 曾博, 徐富强, 刘裕, 等. 考虑可再生能源与需求响应协同增效的能量枢纽多目标区间优化规划方法[J/OL]. *中国电机工程学报* [2021-06-10]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201303>.
ZENG Bo, XU Fuqiang, LIU Yu, et al. Multi-objective interval optimization approach for energy hub planning with consideration of renewable energy and demand response synergies [J]. *Proceedings of the CSEE* [2021-06-10]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201303>.
- [31] 蔡秀雯, 陈茂新, 陈钢, 等. 考虑主动管理与需求侧管理的主动配电网分布式光伏最大准入容量计算方法[J]. *电力建设*, 2021, 42(5): 38-47.
CAI Xiuwen, CHEN Maoxin, CHEN Gang, et al. Calculation method for maximum allowable access capacity of distributed PV in active distribution network considering active management and demand-side management [J]. *Electric Power Construction*, 2021, 42(5): 38-47.
- [32] 陈伟坚, 邹浩斌, 王增煜, 等. 考虑分布式电源和需求侧响应的配电网综合规划[J]. *机电工程技术*, 2015, 44(5): 34-38.
CHEN Weijian, ZOU Haobin, WANG Zengyu, et al. Integrated planning of distribution systems with distributed generation and demand side response [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2015, 44(5): 34-38.
- [33] 马云鹏, 刘蓓涵, 刘晓焜, 等. 面向电力需求侧的大数据应用分析与探究[J]. *信息通信*, 2019(10): 157-158.
MA Yunpeng, LIU Beihan, LIU Xiaokun, et al. Integrated planning of distribution systems with distributed generation and demand side response [J]. *Information & Communications*, 2019(10): 157-158.
- [34] 李巍, 袁晓婷, 李俊杰, 等. 基于数据挖掘的电力需求侧管理综述[J]. *电力大数据*, 2018, 21(1): 10-13.
LI Wei, YUAN Xiaoting, LI Junjie, et al. Review of electric power demand side management based on data mining [J]. *Power Systems and Big Data*, 2018, 21(1): 10-13.
- [35] 徐伟燕. 基于人工智能的客户需求响应研究与分析[J]. *电力需求侧管理*, 2019, 21(3): 17-20.
XU Weiyan. Research and analysis of resident demand response based on artificial intelligence [J]. *Power Demand Side Management*, 2019, 21(3): 17-20.
- [36] 孙毅, 刘迪, 李彬, 等. 深度强化学习在需求响应中的应用[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(5): 183-191.
SUN Yi, LIU Di, LI Bin, et al. Application of deep reinforcement learning in demand response [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(5): 183-191.
- [37] 潘明明, 田世明, 刘宗杰, 等. 能源互联网中需求侧资源参与电网控制的边云协同技术研究[J]. *电子技术应用*, 2021, 47(4): 24-29.
PAN Mingming, TIAN Shiming, LIU Zongjie, et al. Research on cloud edge coordination technology of demand side resources participating in system control within energy Internet [J]. *Application of Electronic Technique*, 2021, 47(4): 24-29.
- [38] 曹望璋, 李彬, 祁兵, 等. 一种考虑业务可靠性的需求响应边缘云部署方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(3): 846-857.
CAO Wangzhang, LI Bin, QI Bing, et al. A deployment method of demand response edge cloud considering services reliability [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(3): 846-857.
- [39] 李彬, 卢超, 曹望璋, 等. 基于区块链技术的自动需求响应系统应用初探[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(13): 3691-3702.
LI Bin, LU Chao, CAO Wangzhang, et al. A preliminary study of block chain based automated demand response system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(13): 3691-3702.
- [40] 丁一, 惠红勋, 林振智, 等. 面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(14): 2-9.
DING Yi, HUI Hongxun, LIN Zhenzhi, et al. Design of business model and market framework oriented to active demand response of power demand side [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(14): 2-9.
- [41] 国际能源署, 国网能源研究院. 重塑电力市场: 低碳电力系统转型过程中的市场设计与监管[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
IEA, State Grid Energy Research Institute. Reshaping the electricity market: market design and regulation in the process of low carbon power system transformation [M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [42] 范帅, 郑琨琪, 王芬, 等. 基于负荷准线的大规模需求响应[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(15): 19-27.

- FAN Shuai, JIA Kunqi, WANG Fen, et al. Large-scale demand response based on customer directrix load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 19-27.
- [43] 肖勇, 吴昊文, 王宗义, 等. 面向可中断负荷控制的需求响应通信业务优化[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 36-43.
- XIAO Yong, WU Haowen, WANG Zongyi, et al. Communication service optimization of demand response for interruptible load control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 36-43.
- [44] 史俊伟, 文福拴, 崔鹏程, 等. 参与需求响应的工业用户智能用电管理[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 45-53.
- SHI Junyi, WEN Fushuan, CUI Pengcheng, et al. Intelligent energy management of industrial loads considering participation in demand response program [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 45-53.
- [45] 降国俊, 崔双喜, 樊小朝, 等. 考虑电转氢气过程及综合需求响应的电-氢-气综合能源系统协调优化运行[J]. 可再生能源, 2021, 39(1): 88-94.
- JIANG Guojun, CUI Shuangxi, FAN Xiaochao, et al. Electric-hydrogen-gas integrated energy system considering E2H conversion process and comprehensive demand response coordination and optimization of operation [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(1): 88-94.
- [46] 张鹏, 蒯圣宇, 刘维, 等. 考虑双侧不确定性的负荷聚集商需求响应资源规划[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(1): 49-54.
- ZHANG Peng, JING Shengyu, LIU Wei, et al. Demand response resources planning for load aggregators considering bilateral uncertainty [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(1): 49-54.
- [47] GJORGIEVSKI V, MARKOVSKA N, ABAZIET A A, et al. The potential of power-to-heat demand response to improve the flexibility of the energy system: an empirical review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 138(C): 1-13.
- [48] BRENDAN H, JAMES G, MARK W, et al. From utility demand side management to low-carbon transitions: opportunities and challenges for energy efficiency governance in a new era [J]. Energy Research & Social Science, 2020(59): 2214-2221.
- [49] PARRISH B, HEPTONSTALL P, GROSS R, et al. A systematic review of motivations, enablers and barriers for consumer engagement with residential demand response [J]. Energy Policy, 2020, 138(C): 1-11.
- [50] DRANKA G G, FERREIRA P. Review and assessment of the different categories of demand response potentials [J]. Energy, 2019(179): 280-294.
- [51] 洪博文, MIKETA A, GIELEN D, 等. 基于可再生能源的全球电气化路径与远景分析[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 159-166.
- HONG Bowen, MIKETA A, GIELEN D, et al. Global renewable-based electrification pathways and its long-term scenario analysis [J]. Electric Power, 2020, 53(3): 159-166.
- [52] 姚建国, 张凯锋, 丁哲通, 等. 动态需求响应概念扩展及研究重点[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 207-215.
- YAO Jianguo, ZHANG Kaifeng, DING Zhetong, et al. Concept extension and research focus of dynamic demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 207-215.
- [53] 丁一, 吴华华, 惠红勋, 等. 适合需求侧主动响应的中国电力市场机制的思考与建议[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 24-31.
- DING Yi, WU Huahua, HUI Hongxun, et al. Analysis and related suggestions on power market mechanism of demand side response in China [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 24-31.
- [54] 张高, 薛松, 范孟华, 等. 面向中国电力市场的需求响应市场化交易机制设计[J]. 电力建设, 2021, 42(4): 132-140.
- ZHANG Gao, XUE Song, FAN Menghua, et al. Design of demand-response market mechanism in accordance with China power market [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(4): 132-140.
- [55] 李云卿. 系统推进“十四五”时期电力需求侧管理高质量发展 [J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(1): 1-3.
- LI Yunqing. Systematically promoting high quality development of demand side management during the “14th Five-Year Plan” period [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(1): 1-3.
- [56] 王娟, 周伏秋, 许文. 新形势下推进电力需求侧管理财政政策研究 [J]. 地方财政研究, 2018(7): 43-47.
- WANG Juan, ZHOU Fuqiu, XU Wen. Research on fiscal policy of promoting DSM under new situation [J]. Sub National Fiscal Research, 2018(7): 43-47.
- [57] 刘浩田, 陈锦, 朱熹, 等. 一种基于价格弹性矩阵的居民峰谷分时电价激励策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 116-123.
- LIU Haotian, CHEN Jin, ZHU Xi, et al. An incentive strategy of residential peak-valley price based on price elasticity matrix of demand [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 116-123.
- [58] 宁启水. 建议强化电力需求响应 保障电力安全有序供应 [EB/OL]. [2021-03-09]. <https://power.in-en.com/html/power-2384539.shtml>.
- NING Qishui. It is suggested to strengthen the response of power demand to ensure the safe and orderly supply of power [EB/OL]. [2021-03-09]. <https://power.in-en.com/html/power-2384539.shtml>.
- [59] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于做好2019年能源迎峰度夏工作的通知 [EB/OL]. [2019-06-18]. https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/yxj/sjdt/201906/t20190625_987026.html.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on doing a good job of energy peak for summer in 2019 [EB/OL]. [2019-06-18]. https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/yxj/sjdt/201906/t20190625_987026.html.
- [60] 国家发展改革委. 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]. [2017-09-26]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-09/26/content_5227721.html.
- National Development and Reform Commission. Notice on deepening supply side structural reform and doing a good job of power demand side management under the new situation [EB/OL]. [2017-09-26]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-09/26/content_5227721.html.

09/26/content_5227721.html.

王彩霞(1985—),女,博士,高级工程师,主要研究方向:高比例新能源电力系统运行分析、新能源政策与市场机制设计。E-mail:wangcaixia@sgeri.sgcc.com.cn

时智勇(1983—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:高比例新能源电力系统运行控制、市场机制与政策。E-

mail:shizhiyong@sgeri.sgcc.com.cn

梁志峰(1984—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:新能源调度运行与管理。E-mail:liang-zhifeng@sgcc.com.cn

蒋莉萍(1964—),女,通信作者,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向:能源及电力规划和技术经济。E-mail:jiangliping@sgeri.sgcc.com.cn

(编辑 代长振)

Key Technologies and Prospects of Demand-side Resource Utilization for Power Systems Dominated by Renewable Energy

WANG Caixia¹, SHI Zhiyong¹, LIANG Zhifeng², LI Qinmiao¹, HONG Bowen¹, HUANG Bibin¹, JIANG Liping¹

(1. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. State Grid Corporation of China, Beijing 100032, China)

Abstract: In the background of energy transition, clean and low-carbon power systems will promote the development of traditional power systems to new power systems dominated by renewable energy. The power supply guarantee and safe and stable operation ability of the new power systems will be greatly challenged by the high proportion of renewable energy. The traditional power system operation mode solely relying on the power-side resources cannot meet the requirements of safe, stable and cost-effective power supply. The potential of demand-side resources must be fully tapped to transit from “source follows load” to “source interacts with load”. In this paper, firstly, the new situation of safe, reliable and economic power supply faced by the new power systems is described. Secondly, the practice of demand-side resource utilization at home and abroad is studied and analyzed. On this basis, the key technologies of demand-side resource utilization for the new power systems are put forward. The demand-side resource utilization of China’s new power systems is prospected from five aspects of resource development focus, operation management, market mechanism, policy measures, and business model.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 4000-202057046A-0-0-00).

Key words: renewable energy; new power system; demand-side resource; demand response; power supply

