

我国电力需求响应发展成效及“十四五”工作展望

何 胜¹,徐玉婷²,陈宋宋²,袁金斗²,官飞翔²

(1. 国家电网有限公司,北京 100031;2. 需求侧多能互补优化与供需互动技术北京市重点实验室(中国电力科学研究院有限公司),北京 100192)

Prospect and the 14th Five-Year Plan of power demand response development effect in China

HE Sheng¹, XU Yuting², CHEN Songsong², YUAN Jindou², GONG Feixiang²

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 2. Beijing Key Laboratory of Demand Side Multi-Energy Carriers Optimization and Interaction Technique (China Electric Power Research Institute Co., Ltd.), Beijing 100192, China)

摘要:随着新能源发电占比的不断提高和负荷“尖峰化”趋势加强,电力需求响应在提升电网运行调节能力方面的重要性日益提高。首先梳理了“十三五”时期需求响应工作基础,回顾了需求响应在配合电网削峰填谷、促进新能源消纳、助力电力市场发展3个方面的实践工作。然后分析了“十四五”时期新形势下需求响应业务发展面临的挑战,并从政策机制、市场交易、技术研发、标准实施4个方面给出了相关建议。最后,对未来需求响应发展趋势进行了展望。

关键词:电力需求响应;新能源消纳;可调节负荷;发展成效;对策建议

Abstract: With the continuous increasing in the proportion of renewable energy power generation and the intensified trend of power demand “spikes”, the demand for flexible grid adjustment methods such as demand response has become more urgent. Firstly, the achievements of demand response implementation is summarized from three aspects: cooperating with grid operation, promoting renewable energy accommodation, and promoting the development of the power market based on the analysis of demand response development during the “13th Five-Year Plan” period. Secondly, the challenges faced by the development of demand response during the “14th Five-Year Plan” period are analyzed. The corresponding countermeasures and suggestions are proposed from the perspectives of policy support, market environment, technology research and development, and standard application. Finally, the future development trend of demand response is predicted.

Key words: demand response; renewable energy accommodation; adjustable load; development achievements; suggestions

0 引言

“十三五”时期,我国电力需求响应(以下简称需求响应)总体呈现快速发展趋势,从局部试点摸索逐步转向省级范围大规模示范应用,为我国能源结构转型、清洁能源消纳、电网安全运行、电力供需平衡、用户能效提升提供了有力支撑^[1-4]。不同于有序用电“一刀切”的调节方式,需求响应作为用户侧参与电网调节的弹性手段,用户可根据激励政策或电价信号自主进行负荷调节,在保证电力用户用电满意度的基础上引入了市场化的电网调节方式^[5-7],有助于新一轮电力体制改革落实。

目前,我国需求响应发展形势良好,华北、华东、华中等区域需求响应工作均取得较好效果。截

至2020年12月,全国共有11个省(市)开展需求响应相关试点工作,单次响应容量最高达402万kW,有效缓解了电网供需平衡压力。天津、山东、江苏、浙江、上海、江西、河南、重庆、陕西、广东等地均出台了需求响应支持政策,建立了需求响应实施机制,在迎峰度夏(冬)、节假日和夜间低谷期开展了需求响应,成效明显^[8-9]。

然而,需求响应仍存在地区发展不平衡的问题,部分省市仍在起步阶段。此外,需求响应发展仍然受到政策机制、实施模式、潜力分析等因素制约^[10-11]。从响应方式来看,目前国内需求响应开展以基于激励的需求响应为主,通过相应的补贴政策,引导用户参与需求响应。但是此种方式补贴资金来源有限,无法形成长效的激励作用,亟需通过健全完善市场交易机制来保障需求响应可持续发展^[12-13]。“十四五”时期,“碳达峰、碳中和”的“双碳”目标的提出,以新能源为主体的新型电力系统建设战略的落实,给需求响应工作带

收稿日期:2021-07-05;修回日期:2021-09-20

基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目(5100-202114296A-0-0-00)

来了巨大机遇,也提出了更高要求。为推动“十四五”时期需求响应工作取得更多实效,文章在分析我国“十三五”时期需求响应工作基础上,从政策机制、市场交易、技术研发、标准实施4个方面对“十四五”时期需求响应工作提出了相关建议,并对未来发展趋势进行了展望。

1 “十三五”需求响应工作分析

1.1 政策设计

“十三五”时期,国家和地方出台多项相关政策,提出了需求响应建设的相关目标,初步形成了支持需求响应发展的国家、省两级政策体系^[14]。

2016—2020年,为推动需求侧建设,国家层面陆续出台了相关指导意见、宏观规划以及管理办法。2017年,《电力需求侧管理办法(修订版)》中明确提出“支持、激励各类电力市场参与方开发和利用需求响应资源,提供有偿调峰、调频服务,逐步形成占年度最大用电负荷3%左右的需求侧机动调峰能力,保障非严重缺电情况下电力供需平衡”。地方层面也积极响应国家需求侧建设相关要求,全国共有10个省(市)出台需求响应相关支持政策,从市场准入条件、补偿原则、补偿对象、需求响应资源类型、考核评价等方面对需求响应开展进行规范引导。山东省发展和改革委员会发布《2020年全省电力需求响应工作方案》,推动建立“系统导向+价格导向”的需求响应参与模式、“容量市场+电能量市场”的价格补偿机制并与现货市场有效衔接,山东省紧急型需求响应补贴资金列入供电成本;广东省能源局编制了《广东省2019年电力需求响应方案》(征求意见稿),该方案规定了形成一般地区3%峰时负荷调节能力,重点地区5%峰时负荷调节能力的目标。国家电网有限公司在《电力需求响应工作两年行动计划(2020—2021年)》文件中,提出形成占年度最大用电负荷5%的可调节负荷资源库的目标,在最新的《国家电网有限公司构建以新能源为主体的新型电力系统行动方案(2021—2030年)》文件中,明确了到2025年、2030年可调节负荷容量分别达到5 900万kW、7 000万kW的目标。国家、地方、企业对需求响应的重视程度与支持力度都在逐年增强。

1.2 技术攻关与产品研发

需求响应的实施需要技术和产品作为软硬件支撑。技术方面,需求响应终端、需求响应服务系统、聚合系统、省级智慧能源服务平台等设施的建设为需求响应实施构建了物理基础。攻关力量建设方面,中国电科院筹建了多个实验室支撑需求响

应技术研究。2015年筹建的“电力需求侧管理实验室”获得国家电网有限公司科技部授牌;2016年获得美国OpenADR联盟需求响应信息交换一致性测试实验室资质授权;2016年申报并获批需求侧多能互补与供需互动北京市重点实验室。中国电科院经过多年研发,已有一整套需求响应服务系统、需求响应聚合系统、需求响应终端,覆盖需求响应业务全流程,满足不同业务主体参与响应需求。截至2020年底,系列产品在浙江、河北、山东等地推广应用,有效地支撑了各试点省市需求响应工作的开展。

1.3 标准体系建设

目前,国内电力需求响应标准体系已涵盖系统软件、硬件终端、互操作接口、检验检测、业务管理5类要素^[15],并成立了专门的标准委员会进行相关标准的制修订工作。2014年,SAC/TC 549全国智能电网用户接口标准化技术委员会(以下简称标委会)成立。标委会设有电力需求响应工作组,围绕需求响应标准体系2层架构开展相关标准化工作,目前已完成《电力需求响应系统通用技术规范》等5项国家标准的编制。为了进一步加快需求响应标准体系的完善进度,弥补国家标准无法对需求响应系统软件、硬件终端功能细化规定的不足,专门编制了相关电力行业标准、中电联团体标准、电网公司企业标准数十项,进一步规范了需求响应业务发展,推动需求响应技术在不同场景下的应用。

1.4 示范试点

在各级力量的支持下,“十三五”时期,我国需求响应在配合电网削峰填谷、促进新能源消纳、助力电力市场发展3方面取得了较好的成效。

需求响应配合电网削峰填谷有助于实现供需平衡调节。2016—2020年,国家电网有限公司经营区累计实施需求响应125次,其中削峰响应86次,填谷响应39次,实现削峰响应量1 853万kW,填谷响应量1 925万kW,极大缓解了用电高峰时段电网供电压力。2019年夏季高温天气下,江苏省实施需求响应削减尖峰负荷402万kW,刷新了单次需求响应最大削减负荷量的记录。南方电网经营区,广东省通过电力需求响应实现持续稳定削峰80万kW,通过市场化的方式解决电力紧平衡问题。据统计,2019年华北、华中、华东地区各省最大负荷95%以上尖峰持续时间仅为7~60 h,单纯通过增加调峰机组和电网配套措施来满足尖峰负荷需求资源致其利用率低且经济性差,亟需创新调节机制,从负荷侧采用需求响应等灵活措施来解决电网调峰问题。

需求响应是促进新能源消纳的有力手段。需求响应能够缓解新能源发电与用电需求时域不匹配的矛盾,促进新能源消纳已成为需求响应的重要应用

场景。2017年3月,新疆电网通过需求响应平台邀约电力客户,响应负荷18 MW,响应电量30 MWh,是国内首次将需求响应与风力发电协同互补,为探索需求响应促进新能源消纳提供了良好的应用实例。

2016—2020年需求响应总量与实施次数如图1所示。

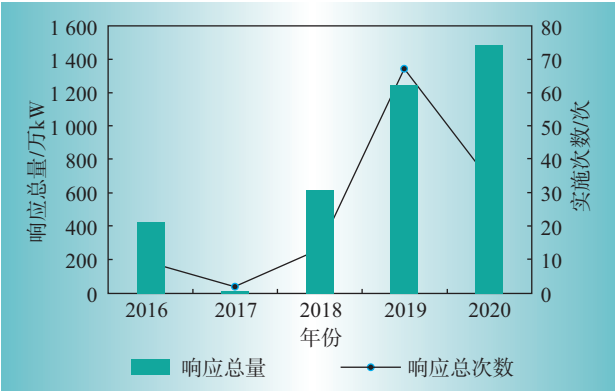


图1 2016—2020年需求响应响应总量与实施次数
Fig. 1 The total amount of demand response and the number of implementations in 2016—2020

需求响应需要良好市场机制来支持其可持续发展,同时也促进了我国电力市场建设与完善。山东省作为最早将市场机制引入需求响应的省份,建立了需求侧资源参与容量竞价与电能量竞价的机制。2020年11月,山东电网分别实施了首次经济型填谷需求响应和紧急型填谷需求响应,累计响应负荷达688 MW,其中主动参与经济型填谷需求响应的负荷达88 MW,这充分体现了采用市场机制引导需求侧和发电侧协同配合的成效。广东省在最新的市场化需求响应实施方案中,需求响应费用由所有参与市场化交易的用户分摊。冀北和上海在虚拟电厂实践方面走在我国前列,将大量分布式的电源和负荷资源进行聚合,为负荷侧资源参与电网调度提供了新的实现路径。2019年需求响应实施时间如图2所示。

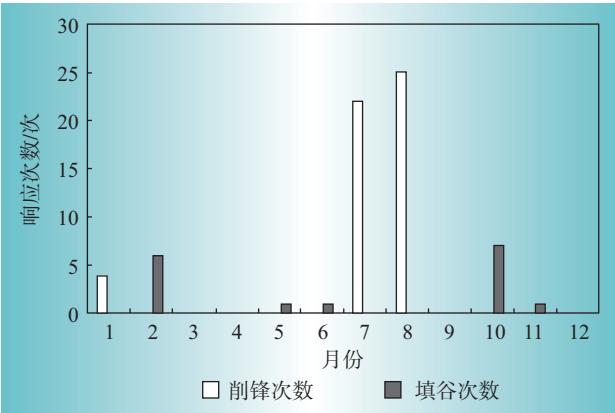


图2 2019年需求响应实施分布
Fig. 2 Implementation distribution of demand response in 2019

“十三五”期间,我国需求响应的形式、规模、参与用户数量、市场机制均有较大的发展,开展情况如表1所示。

表1 “十三五”期间国内需求响应开展情况
Table 1 Development of domestic demand response during the “13th Five-Year Plan” period

年份	削峰/次	填谷/次	削峰响应量/万kW	填谷响应量/万kW	参与用户数/户	参与省份/个
2016	9	—	419.1	—	3 340	2
2017	2	—	7.7	—	36	2
2018	8	5	244.8	374.3	2 394	6
2019	51	16	703.3	543.6	111 218	8
2020	16	18	477.8	1 007.2	18 862	8

注:本文数据统计过程中,响应次数和响应功率按天进行统计,一天内多次响应仅计数一次,单次响应量取当天最大响应功率。

2019年需求响应参与用户数量超过了10万户。需求响应的形式主要为削峰和填谷。削峰响应实施时间大多集中在7月、8月,夏季高温天气导致制冷负荷迅速增长,午高峰与晚高峰阶段用电压力较大;填谷响应实施时间主要集中在节假日,节假日期间全社会用电负荷低,新能源弃电严重、电网轻载。需求响应作为一种灵活的调节手段,对延缓电网投资、提高电网调节能力和资源利用效率、促进新能源消纳具有重要意义。

2 面临的新形势

2.1 政策要求

在“碳达峰、碳中和”目标下,“十四五”时期新能源装机比例将保持高速增长。2020年非化石能源在一次能源中的占比约为15.8%,为实现2030年占比25%的目标,2030年风力发电与光伏发电总装机容量将达到12亿kW。

新基建战略带动新兴负荷快速增长,将显著增加负荷的随机特性和冲击特性。未来5G基站、边缘计算服务器、电动汽车充电桩将带来大量的负荷增长。据公安部统计,截至2020年,全国新能源汽车保有量为492万辆,其中纯电动汽车400万辆,占新能源汽车总量的81.32%。据中国电科院预测,2025年电动汽车数量将达到2 000万辆,新增充电负荷将达2.4亿kW。然而,电动汽车无序充电时造成的台区负荷剧烈变化对电网冲击较大,因此,迫切需要研究以新兴负荷为代表的可调节负荷和储能资源参与电网互动响应。

2.2 业务需要

“十四五”时期,在经济增长与极端天气双重影

响下,电网负荷将继续呈现尖峰化特点,最高负荷持续攀升,电网运行调节压力增大。近年来多地最高负荷连创新高。2021年1月7日,受极寒天气影响国家电网有限公司经营区最高负荷达9.6亿kW,同比增长27.7%,共有11个省份负荷创历史新高,已超过2020年夏季最高负荷8.75亿kW,其中江苏电网负荷高达1.17亿kW。虽然我国电力供应形势整体充足,但局部电网短时间尖峰供电矛盾突出。

“双碳”目标下高比例新能源使得电网日最大功率波动显著增加,调峰调差要求进一步提高。风电光伏等新能源的开发利用是电力行业碳减排的关键,然而其较强的随机性和波动性,不仅无法对电网电压频率波动进行快速调整,提供稳定持续的电力供应,而且新能源出力与用电负荷不相匹配,具有一定的反调峰特性,影响电网安全稳定运行。未来,在“碳达峰、碳中和”战略引领下,我国新能源规模将进一步提高,依靠传统的调节手段已不能应对高比例新能源带来的问题,亟需调动需求侧柔性资源来应对挑战。

3 “十四五”时期需求响应发展建议

“十四五”时期,我国需求响应面临着新形势、新任务和新要求。“碳达峰、碳中和”及以新能源为主体的新型电力系统建设的不断推进,对需求侧资源利用的高效性要求也不断提高。“十三五”时期,需求响应取得了良好的成效,同时也显现出多方面不足。“十四五”时期可从政策、市场、技术、标准4方面采取针对性措施。

3.1 政策支持

政策支持是需求响应能否从试点走向全面推广的根基。目前需求响应政策机制仍不完善,难以支撑需求响应常态化、规模化开展。国家层面出台了需求侧管理的相关指导意见、宏观规划及管理办

法,但对于需求响应细化实施并未出台全国性的政策。“十四五”时期制定相关细化政策建议从以下3方面来考虑:一是构建支持需求响应发展的政策体系,明确规定各类资源参与需求响应的准入条件、基本操作流程、收益计算原则、成本疏导原则等,推动将需求响应能力建设有关投资通过纳入输配电价(市场建立前)或辅助服务费用(市场建立后)来进行回收。在此框架下,鼓励各省因地制宜制定属地需求响应政策。对于夏季与冬季尖峰负荷高的地区,重点挖掘楼宇空调、电采暖负荷,适当提升快速响应的激励标准;对于清洁能源消纳困难、节假日

采暖季电网负备用不足地区,重点挖掘蓄热蓄冰、电化学储能负荷,合理控制填谷补贴标准,避免与削峰补贴出现交叉。二是健全需求响应市场化的法律保障,通过修订完善能源法、电力法,巩固需求响应各参与方市场主体地位,对需求侧资源参与电网辅助服务、分布式电源建设配套服务等方面提供优先保障。三是在新的专项激励政策下,在“碳达峰、碳中和”目标下,出台需求响应减少CO₂排放量规则,将需求响应作为优质碳交易品种,纳入碳市场,帮助用电企业控排创收,形成电力用户-电网企业-发电企业多方共赢的商业模式。

3.2 市场环境

市场环境是需求响应能否发展成熟的关键因素。需求响应建设资金与响应执行的补贴来源是需求响应发展面临的挑战,目前需求响应补贴来源集中于尖峰电价增收资金、现货市场形成的资金空间、项目专项基金等,资金规模有限,未实现市场性的资金补贴来源,本质上仍是计划性的需求响应。

目前,相关市场化交易主要以参与现货市场与辅助服务市场为主,且仍处于理论研究设计与试点验证阶段,仅局部地区进行小规模试点工作,暂无大规模市场化应用,相关交易品种、交易机制和操作流程还十分欠缺。

“十四五”时期要抓住电力市场化改革契机,从以下3方面建立健全市场机制营造良好的市场环境:一是进一步完善电价机制,考虑不同地区系统调节需求与能力和新能源装机情况,因地制宜选择合适的峰谷电价、分时电价、实时电价、尖峰电价等定价方式,充分发挥电价的市场调节作用。二是设计需求响应参与各类市场的详细规则,包括容量市场、辅助服务市场、电能量市场等,加强市场信息披露的及时性与公开性,推动更多类型可调节负荷纳入市场主体,激发市场潜力,为需求响应的常态化开展提供动力。三是丰富需求响应产品类型、参与方式和商业模式,根据需求侧资源特性,设计相应的产品类型参与市场交易,形成可持续的商业模式以支撑需求响应长期发展。

3.3 技术研发

技术研发是需求响应切实应用的重要支撑。我国可调节负荷可挖掘潜力巨大,技术上有2大关键问题:一是如何精准感知、预测、聚合大量柔性负荷,准确评估柔性负荷的可调节潜力,提高其响应规模与响应速率,充分发挥需求响应调节作用。二是如何采用准确的负荷基线评估需求响应执行效果,负荷基线的计算直接与用户补贴激励相关,基线计算比实际偏高导致用户补贴减少,参与积极性

下降;反之,基线偏低,导致实际补贴资金支出增加,不利于可持续发展。

目前,需求响应技术瓶颈依旧存在,科研开发投入仍需稳步推进。国家电网有限公司制定的新型电力系统行动方案中提出要加强需求响应等关键技术攻关。

“十四五”时期应对需求响应的技术问题从以下3个方面重点推进:一是扩大可调节负荷资源库建设,对各类可调节资源进行普查,到2030年建立7 000万kW容量的可调节负荷资源库。二是创新可调节潜力评估方法,应用人工智能、区块链^[16]、分布式计算等新技术准确计算不同需求响应场景下,各类柔性需求响应资源的可调节潜力,从响应容量、响应速度、响应可持续时间等角度进行综合评估。三是进一步完善现有系统、平台和终端功能,深化可调节负荷互动感知接口研究,提高可调节负荷在线监测调节能力,发挥可调节负荷资源在全网资源优化配置中的作用。

3.4 标准应用

完善的标准体系有利于需求响应业务的规模化发展。现有的电力需求响应标准体系在需求侧灵活资源可调节潜力分析、需求响应系统建设、验收规范等方面仍缺乏相关标准。此外,各省需求响应实施平台各不相同,平台间数据通用性不强,各类设备及负荷聚合商的通信接口、协议不统一,交互壁垒拉高了建设成本和难度,不利于形成可复制推广的需求响应模式。

“十四五”时期加强标准应用从以下3个方面重点推进:一是丰富完善现有标准体系,凝聚全国智能电网用户接口标准化技术委员会(SAC/TC 549)等相关标委会、高校、科研机构 and 产业单位力量,学习引进国际先进经验,开展相关标准的制修订工作。二是规范可调节负荷与电网信息交互统一接口,出台相关强制性国家标准或政策要求,提高信息交互效率。三是加强现有标准体系的实用化,提高现有标准的宣贯培训力度,促进现有标准在实际需求响应平台建设的应用。

4 未来展望

从未来发展趋势来看,我国电力消费需求仍将保持平稳较快增长。在能源结构转型与“碳达峰、碳中和”目标促进下,2030年前风电、光伏总装机容量将达到12亿kW。国家电网有限公司为推动“双碳”目标实现,制定了构建以新能源为主体的新型电力系统行动方案。新型电力系统的建设带来了

机遇,同时也面临着巨大的挑战。随着发电侧大量新能源的涌入,电网运行方式更加复杂,对于调峰、调频、备用等辅助服务的需求日益增大。与此同时,夏季高温与冬季寒潮导致的季节性尖峰负荷给电力供需平衡带来极大挑战。高比例新能源发电与负荷侧尖峰负荷日益提高的双重压力下,需求响应将是提升电网调节能力,促进清洁能源消纳,提升终端用电能效,保障能源安全的重要手段。

“十四五”时期,我国需求响应发展趋势将呈现出新的发展特点:

(1) 需求响应相关政策进一步完善。在新一轮电力体制改革契机下,随着国内现货市场建设不断成熟,需求侧可调节负荷将通过各类灵活电价政策充分发挥市场“无形的手”优化配置作用,让用户以竞争方式参与需求响应,调动需求侧资源主动参与电网供需平衡调节。

(2) 需求响应关键技术研究逐步深入。可调节负荷资源库建设方面,资源类型更加丰富,形成工业、楼宇、居民及新兴负荷等需求侧可调节负荷模型库。可调节负荷控制方面,通过大数据分析等技术进一步挖掘用户侧可调节负荷潜力,对可调节负荷进行分层分区聚合优化,参与电网实时互动。

(3) 可调节负荷技术标准体系和检验检测体系逐步建立并完善。将形成包含数据模型、运行调控、安全稳定、仿真评估等的可调节负荷并网运行与控制技术标准体系。同时,相关系统、平台、软件、终端的产品检验检测规范完成落地,将明显提高可调节负荷资源的接入和聚合效率。

5 结束语

“十三五”时期,需求响应从局部的试点测试向全省推广应用,实践表明需求响应在促进新能源消纳、提升电网调节能力、提升用户终端用能效率、保障电网安全方面有良好的效果,目前需求响应潜力并未充分挖掘,“十四五”时期可从政策、市场、技术和标准4方面进一步推动我国需求响应快速发展,未来各项政策机制逐步完善,市场交易体系初步形成,商业模式不断丰富,需求侧资源可调节潜力进一步释放,需求响应成效将进一步显现。D

参考文献:

- [1] 丁一,胡怡霜,崔文琪. 国外电力需求响应实践及启示[J]. 电力需求侧管理,2019,21(2):1-4.
DING Yi, HU Yishuang, CUI Wenqi. Practices and en-

- lightenment of foreign power demand response[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(2):1-4.
- [2] 党东升,韩松,周珏,等.需求响应参与系统调峰研究综述[J].电力需求侧管理,2017,19(5):13-17.
DANG Dongsheng, HAN Song, ZHOU Jue, et al. Review of demand response participating in power system peak shifting[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(5):13-17.
- [3] 王俐英,曾鸣,赵嘉欣,等.计及电力需求响应的多能源协同系统优化运行研究[J].电力工程技术,2021,40(1):2-9.
WANG Liying, ZENG Ming, ZHAO Jiaxin, et al. Optimal operation of multi-energy collaborative system considering electricity demand response[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1):2-9.
- [4] 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.
- [5] 潘小辉,王蓓蓓,李扬.国外需求响应技术及项目实践[J].电力需求侧管理,2013,15(1):58-62.
PAN Xiaohui, WANG Beibei, LI Yang. Demand response technology abroad and its practice[J]. Power Demand Side Management, 2013, 15(1):58-62.
- [6] 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.
- [7] 李彬,赵燕玲,魏吟斌,等.碳中和背景下的需求侧资源互动关键支撑技术研究[J].供用电,2021,38(9):3-9,18.
LI Bin, ZHAO Yanling, WEI Yinwu, et al. Research on key supporting technologies of demand side resource interaction under the background of carbon neutral[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(9):3-9, 18.
- [8] 张宁,代红才,胡兆光,等.考虑系统灵活性约束与需求响应的源网荷协调规划模型[J].中国电力,2019,52(2):61-69.
ZHANG Ning, DAI Hongcai, HU Zhaoguang, et al. A source-grid-load coordinated planning model considering system flexibility constraints and demand response[J]. Electric Power, 2019, 52(2):61-69.
- [9] 孙毅,刘昌利,刘迪,等.计及滚动评价的居民群需求响应策略[J].中国电力,2019,52(2):34-45.
SUN Yi, LIU Changli, LIU Di, et al. Residents demand response strategy considering rolling evaluation[J]. Electric Power, 2019, 52(2):34-45.
- [10] 田世明,王蓓蓓,张晶.智能电网条件下的需求响应关键技术[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3 576-3 589.
TIAN Shiming, WANG Beibei, ZHANG Jing. Key technologies for demand response in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22):3 576-3 589.
- [11] 徐箴,孙宏斌,郭庆来.综合需求响应研究综述及展望[J].中国电机工程学报,2018,38(24):7 194-7 205,7 446.
XU Zheng, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24):7 194-7 205, 7 446.
- [12] 闫华光,陈宋宋,李世豪,等.需求响应发展现状及趋势研究[J].供用电,2017,34(3):2-8.
YAN Huaguang, CHEN Songsong, LI Shihao, et al. Research on the current situation and development trend of demand response[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(3):2-8.
- [13] 周琳,付学谦,刘硕,等.促进新能源消纳的综合能源系统日前市场出清优化[J].中国电力,2019,52(11):9-18.
ZHOU Lin, FU Xueqian, LIU Shuo, et al. Day-ahead market clearing model of integrated energy system for promoting renewable energy consumption[J]. Electric Power, 2019, 52(11):9-18.
- [14] 陈宋宋,李德智.中美需求响应发展状态比较及分析[J].电力需求侧管理,2019,21(3):73-76,80.
CHEN Songsong, LI Dezhi. Comparison and analysis of domestic and American demand response development situation[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(3):73-76, 80.
- [15] 陈宋宋,闫华光,李德智,等.我国需求响应标准体系研究综述[J].供用电,2017,34(3):9-15.
CHEN Songsong, YAN Huaguang, LI Dezhi. A review of the research on demand response standard system in China[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(3):9-15.
- [16] ZHENG X F, JIA H Y, WANG J S. Energy Internet development based on blockchain technology [C]//2019 American Society of Civil Engineers International Conference on Construction and Real Estate Management, May 21-24, 2019, Banff Alberta, Canada.

作者简介:

何胜(1984),男,安徽合肥人,硕士,高级工程师,主要从事电力营销、电力市场与电力需求侧管理工作。

(责任编辑 郝 洁 张紫涛)