

需求响应资源潜力评估方法、应用及展望

王飞¹, 李美颐¹, 张旭东², 陈宋宋³, 李康平⁴, 姚良忠⁵, 王俊龙²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北省保定市 071003; 2. 国网河北省电力有限公司营销部, 河北省石家庄市 050022; 3. 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), 北京市 100192; 4. 上海交通大学智慧能源创新学院, 上海市 200240; 5. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北省武汉市 430072)

摘要: 需求响应(DR)资源潜力评估是指对特定对象在约定的控制方式下参与某一段时间内DR潜力的大小进行量化估计。作为DR研究的关键基础问题,DR潜力评估在灵活资源聚合、市场交易决策、虚拟电厂优化运行等方面均发挥着重要作用。首先,分别从DR潜力的类型、评估的时间维度和空间维度以及思路框架4个分类维度梳理了DR潜力评估的研究进展,并分析不同维度DR潜力评估的应用场景。其次,总结了DR潜力评估的实际项目,以典型项目为例进行重点剖析,并通过国内外案例对比分析中国DR潜力评估项目未来的发展方向。然后,介绍了综合DR、低碳DR和动态DR这3类新型DR机制,并在此基础上对DR潜力评估面向新型电力系统的应用扩展进行了分析。最后,对未来DR潜力评估的研究方向进行了展望。

关键词: 需求响应; 潜力; 评估; 新型电力系统; 应用

0 引言

构建新型电力系统是实现电力行业“双碳”目标的必由之路^[1-3]。新能源发电装机与并网电量占比的不断上升一方面大大削弱了系统电源侧的灵活调节能力,另一方面新能源出力的随机波动特性对系统的实时功率平衡能力提出了更高的要求,这令电力系统灵活调节能力匮乏和灵活调节需求增加之间的矛盾日益突出,仅依赖电源侧可调节资源维持电力系统功率平衡的方式难以为继^[4]。需求响应(DR)通过价格或激励信号引导用户改变用电行为,实现负荷与电网互动运行,在提升系统灵活调节能力、促进新能源消纳等方面能够发挥重要作用^[5]。

DR资源潜力评估是DR研究中的关键基础问题之一。目前关于“DR潜力”尚未有统一定义,存在诸多不同提法,如“DR容量^[6]”“响应能力^[7]”“可调度容量^[8]”“可调节潜力^[9]”“负荷调控潜力^[10]”“负荷灵活性^[11]”等。本文对于DR潜力的定义为:在约定的控制方式下,用户参与DR以基线负荷为基准

削减/增加负荷的能力^[12],这里基线负荷是指用户如果不参与DR本该消耗的负荷^[13-15]。DR潜力评估是指针对特定对象(如单一用户、用户集群等)评估其在约定的控制方式下参与DR时某一段时间内DR潜力的大小。

DR资源潜力评估作为DR项目的关键支撑技术,对于DR实施过程中涉及的各个利益主体均有重要意义。本文DR资源指可参与DR的负荷资源,主要包括纯电类负荷以及电动汽车、分布式储能等双向负荷,与柔性负荷的外延一致^[16]。从参与DR的个体用户来看,DR潜力评估可以让用户更加了解自身的用电弹性,从而为其选择合适的DR项目提供科学依据^[4]。从负荷聚合商、虚拟电厂等代理商的角度来看,代理商可根据聚合DR潜力评估结果并结合自身风险偏好优化市场投标策略,降低市场交易的决策风险,同时也可依据评估结果优化对用户的激励策略^[17-18]。从电网调度的角度来看,DR潜力的准确评估是调度中心制定科学合理调度计划的数据支撑,对充分发挥DR削峰填谷、消纳新能源、降低系统运行成本^[19]等方面的作用来说至关重要。从政府的角度来看,DR潜力评估结果是政府主管部门科学合理地制定电价和激励政策的重要依据,对推进DR项目实施、挖掘DR潜力非常重要^[20]。

近几年,国内外学者对DR潜力评估展开了广

收稿日期: 2023-03-24; 修回日期: 2023-06-02。

上网日期: 2023-09-12。

国家自然科学基金资助项目(52107103);新疆维吾尔自治区重点研发计划资助项目(2022B01020-2);国家电网有限公司科技项目(5108-202218280A-2-383-XG)。

泛的研究。文献[21]梳理了DR潜力的分类体系;文献[22]总结了基于需求价格弹性系数法评估DR潜力的基本方法;文献[23]对现有DR潜力评估方法进行了简单分类。然而,上述研究只考虑了DR潜力评估的单一层面,缺乏多维度、多场景、深层次的分析与总结。本文对DR潜力评估及应用场景进行系统性的分析、对比、总结和展望。首先,分别从DR潜力的类别、DR潜力评估的时间维度、DR潜力评估的空间维度及DR潜力评估的思路框架4个角度,对DR潜力评估的研究进展进行系统性总结,并分析不同维度DR潜力评估的应用场景。随后,总结了评估DR潜力的实际项目现状,以典型项目为例进行重点剖析,并通过国内外案例对比分析中国DR潜力评估项目未来的发展方向。然后,介绍了综合DR、低碳DR和动态DR这3类新型DR概念,并在此基础上对DR潜力的应用范围进行了拓展。最后,展望了DR潜力评估未来的研究方向。

1 DR潜力评估方法

近年来,国内外学者针对DR潜力评估开展了广泛的研究,各项研究侧重点有所不同,本章将按照不同的分类维度对其进行梳理。

1.1 按照评估的DR潜力类型分类

按照类型划分,DR潜力可分为理论DR潜力、技术DR潜力、经济DR潜力和可用DR潜力4类,根据容量大小排序,理论DR潜力 \geq 技术DR潜力 \geq 经济DR潜力 \geq 可用DR潜力^[21]。

1.1.1 理论DR潜力

理论DR潜力是指负荷理论上可参与DR的最大响应容量,即当前负荷值(基线负荷)与理论极限响应点的差值^[24]。如图1所示,对于纯用电负荷来说,当其参与DR进行削峰时,理论上可通过关闭所有用电设备将负荷削减至0,即理论下调DR潜力为基线负荷大小;当负荷参与DR进行填谷时,理论上可将所有用电设备全部开启,即理论上调DR潜力为总安装容量与基线负荷之差^[25]。对于电动汽车和储能等新型双向负荷来说,以其处于充电状态为例,理论上可通过增大充电功率实现上调节,即理论上调DR潜力为最大充电功率和当前运行功率的差值。而下调节则可通过切换至放电状态来实现,即理论下调DR潜力为当前运行功率与最大放电功率之和。相比于纯用电负荷,由于储能类负荷具备双向调节能力,其理论DR潜力更大。理论DR潜力的评估结果较为粗糙,通常可用于判断负荷是否适合参与DR,进而确定DR的实施对象^[21]。文献[24]评估了

德国典型负荷的理论DR潜力,其2050年的负荷削减潜力为0.8~1.6 GW,负荷转移潜力为20~43 GW。文献[25]评估了德国1500多家服务业公司的理论DR潜力,约为子行业总用电量的35%。文献[26]评估了欧洲30个电力消费领域的理论总DR潜力,每小时可提供负荷削减量61 GW,负荷增加68 GW。

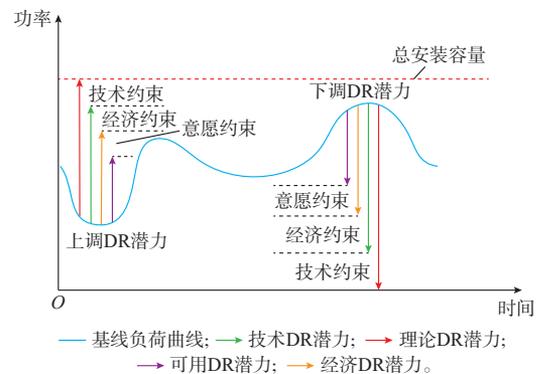


图1 不同类型DR潜力示意图
Fig.1 Schematic diagram of different types of DR potential

1.1.2 技术DR潜力

本文的技术DR潜力是在理论DR潜力的基础上考虑技术约束(如可控负荷转移时间、DR时长、负荷中断次数、荷电状态约束等)后的DR潜力^[21],即基线负荷与考虑技术约束后的响应负荷之差。相较理论DR潜力,技术DR潜力的评估适用性更强,可在辅助确定DR实施对象的基础上为DR实施方案的制定提供重要参考。文献[27]通过对负荷用电过程的定性分析以及对问卷调查结果的定量计算,评估了中国内蒙古西部第二产业在考虑技术约束下的DR潜力。评估结果表明,所研究范围内50%以上工业企业的高峰负荷转移的技术DR潜力小于高峰负荷的10%。文献[28]评估了丹麦工业、商业以及居民用户的技术DR潜力,并使用了EnergyPLAN软件对未来DR发展情景进行了模拟。

1.1.3 经济DR潜力

经济DR潜力是在技术DR潜力的基础上,进一步考虑实施DR所需的前期投资与运行成本约束后的DR潜力^[21],即基线负荷与考虑技术和经济约束后响应负荷之差。换言之,如果用户参与DR在技术上可行,但响应后并不具有经济效益,那么该用户的经济DR潜力将在技术DR潜力的基础上进一步缩减。经济DR潜力的评估结果能辅助DR实施者估计DR项目的成本效益^[29]。文献[29]通过研究不

同的工业过程及其技术和经济特性,评估了德国部分工业行业的技术和经济DR潜力。文献[30]通过对工厂运营商、研究机构、设备制造商等信息的搜集,确定了制冷系统的特征参数,从而评估了德国曼海姆市制冷系统的经济DR潜力。

1.1.4 可用DR潜力

可用DR潜力是在经济DR潜力的基础上进一步考虑用户响应意愿后实际可获得的潜力大小^[21],即基线负荷与考虑技术、经济及意愿约束后响应负荷之差。对于经济不敏感的用户,即便参与DR具有可行性和经济性,也可能选择不参与或不完全参与,其实际激发出来的潜力小于经济DR潜力。可用DR潜力的评估结果一般应用于对评估精度较高的场景,如负荷聚合商的市场交易决策,用于降低决策风险、提升收益^[18]。文献[30]通过调查问卷分析用户的响应意愿估算可用DR潜力相对技术DR潜力的权重系数,进而评估了德国曼海姆市制冷系统的可用DR潜力,约为2.8 GW,相当于德国最大电力需求的4%~6%。文献[31]建立了基于霍克斯过程的用户参与度模型,评估电热水器的可用DR潜力。文献[32]采用弹性系数法评估了空调负荷集群在不同激励和价格条件下的可用DR潜力。

以上文献评估了不同类型的DR潜力,但目前关于DR潜力的分类尚未有权威统一的标准,不同的DR潜力类型服务于不同的应用需求,现有文献比较杂乱,难以确定其评估的DR潜力属于哪一类别。其次,目前大部分研究侧重于理论DR潜力和技术DR潜力,对经济DR潜力和可用DR潜力的研究不够深入。经济DR潜力和可用DR潜力的评估关键是用户激励响应行为的准确建模,现有文献结合消费者心理学、行为经济学等原理对用户的激励响应行为开展了初步研究,但是仍然存在模型考虑因素不够全面、鲁棒性较差等问题。

1.2 按照评估的时间尺度分类

参考负荷预测时间尺度划分,本文将DR潜力的评估分为超短期、短期和中长期,不同时间尺度的DR潜力评估结果服务于不同的应用需求,其应用场景总结如图2所示。

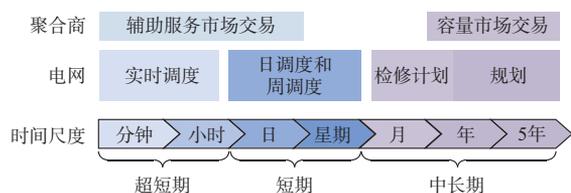


图2 不同时间尺度DR潜力评估的应用场景
Fig. 2 Application scenarios for DR potential assessment in different time scales

1.2.1 超短期

超短期DR潜力评估时间尺度一般为分钟级到小时级^[4],服务于电网实时调度及负荷聚合商辅助服务市场交易策略的制定。文献[33]提出了面向实时电价下的生产者和消费者的多阶段综合响应模型,从而评估用户参与实时市场的DR潜力。文献[34]综合考虑用户出行需求和电池损耗,建立了一种规模化电动汽车实时DR潜力的评估模型。文献[35]提出基于并行梯度决策树的温控负荷集群日内超短期DR潜力预测模型。

1.2.2 短期

短期DR潜力评估时间尺度一般为日级到星期级^[4],服务于电网日(星期)调度以及负荷聚合商日前市场交易策略的制定。文献[36]基于用户行为预测数据评估了电动汽车虚拟电厂的日前DR潜力,并综合考虑响应时间裕度和荷电状态裕度对日内DR潜力进行动态修正。文献[37]采用家庭智能管理系统对用户的响应行为进行模拟,并提出了基于分位数回归的日前DR潜力概率预测模型。

1.2.3 中长期

中长期DR潜力评估的时间尺度为月级到年级^[4],服务于电力系统规划以及容量市场交易,通常需要综合考虑未来各类用户的负荷增长、削峰率、用户参与率等来建立评估模型。如文献[38]综合分析用户的长期DR潜力、中期DR潜力以及响应水平,建立了基于中长期时间维度DR潜力的系统动力学模型,从而为DR激励机制设计提供依据。文献[24]通过对德国各行业未来电力需求、灵活负荷比例等进行分析,进而评估了德国2035年和2050年各类负荷的DR潜力。文献[39]对中国某区域电网2013—2022年的DR潜力进行了评估,并推广评估了华北分部所有区域电网的DR潜力。

以上文献评估了不同时间尺度的DR潜力,但目前针对超短期DR潜力研究较少。超短期DR潜力评估的难点在于用户在给定外部激励信号下的响应行为受到很多因素的耦合影响,且具有明显的时变特性,通常需要结合其他因素的预测结果进行预测,由此增加了预测误差的来源。同时,由于基线和响应后负荷不能同时存在,DR潜力并不存在严格意义上的真实值,难以判断不同时间尺度DR潜力评估的准确性。

1.3 按照评估的空间尺度分类

按照评估的空间尺度划分,可分为单一用户、用户集群、城市、国家、大洲。不同空间维度DR潜力评估的应用场景总结如图3所示。单一用户的DR

2)商业用户

与工业负荷相比,商业用户中冲击性负荷很少且负荷行为不受生产流程的约束^[50]。典型商业用户如酒店、办公楼、商场、学校的可调负荷主要为温控负荷及照明负荷,可以通过空调的设定温度、照明负荷光线强弱的控制策略调整提供DR潜力。

可调节的温控负荷主要包括空调和电热水器。电热水器由于具有储能特性,可以适当调温或短暂切断^[52],其用电时间也可以进行较大范围的转移^[30],具有灵活的DR潜力^[53]。空调可通过改变设定温度或开关状态进行功率调节^[54],同时由于空调-建筑系统具有一定的蓄热能力,空调功率发生变化后建筑内温度变化存在滞后效应,因此也有一些文献将其建模为虚拟储能^[55]。楼宇照明负荷是商业用户的重要DR资源,可通过调整亮度或关停部分照明设备提供DR潜力,响应速度快^[56]。文献[56]利用EnergyPlus软件仿真评估了中国北京一栋写字楼在改变空调系统温度设定值时的DR潜力。文献[57]对楼宇空调系统的冷冻水泵系统、冷却塔系统、冷凝器系统及风机盘管系统分别进行物理建模,建立优化模型对中国上海某商业楼宇的空调DR潜力进行了评估。文献[58]采用综合能量管理系统对中国兰州一栋商业楼宇中的供暖、通风、空调系统以及电池等负荷进行建模,建立了基于决策树模型的商业楼宇DR潜力预测模型。文献[59]总结了不同商业用户的适宜温度约束条件,通过建立优化模型对酒店、办公楼、学校等典型商业用户的负荷转移潜力进行了评估。结果表明,商业楼宇DR潜力受冷负荷与用电时间影响,不同类型商业楼宇体现出不同的DR潜力特性。

不同类型的商业用户可调负荷结构差异不大,均以温控负荷与楼宇照明负荷为主,但负荷用电状态受商业用户日常经营管理影响,负荷数量规模受商业建筑规模影响,负荷灵活可调范围受商业用户舒适度要求影响。因此,商业用户DR潜力评估的重点集中在研究具体商业用户的负荷分布与舒适度要求下的DR潜力。现有文献多建立优化模型评估商业用户的DR潜力,但仍存在假设条件过多、实际应用困难等问题。

3)居民用户

居民用户可调负荷的分类尚未统一,目前一种主流的分类方法是将其分为可削减、可平移和温控负荷3类^[12]。可削减负荷的功率可进行调节,如亮度可调的照明设备等^[60]。可平移负荷在提前通知的情况下其运行时段可进行转移,但是用电量保持

不变,如洗碗机、洗衣机等。温控负荷是指受到温度影响并且可在一定温度范围内进行功率调节的负荷^[61],如空调、热水器等。

居民用户的DR潜力与一天中的时间和环境温度有很强的相关性^[62],用电不确定性强^[63],且单体居民用户的DR潜力较小,难以达到市场准入门槛。因此,居民用户DR潜力评估集中在聚合层面,目前对单一用户的DR潜力评估主要面向工商业用户。也有少量文献针对单一居民用户DR潜力进行评估,如文献[32]基于非侵入式负荷分解算法建立了单个居民用户空调负荷的DR潜力评估模型。

1.3.2 聚合层面

聚合层面的DR潜力评估可应用于电力市场交易或辅助进行区域电力系统规划设计,具有重要的应用价值。相比单个用户,聚合层面DR潜力的评估需综合考虑负荷间的时空耦合联系以及模型计算的复杂度,评估难度更大。根据聚合对象不同,可分为同类负荷聚合与异类负荷聚合。

1)同类负荷聚合

同类负荷聚合的DR潜力通常通过典型单体负荷DR潜力评估模型推广得到,现有同类负荷聚合DR潜力研究以温控负荷和电动汽车为典型代表。

在温控负荷聚合方面,文献[64]建立典型单体空调的DR潜力模型,并基于闵可夫斯基求和算法得到了变频空调集群的聚合DR潜力。文献[65]基于参数辨识方法将温控负荷分为4类,建立典型温控负荷DR潜力分析模型,聚合得到温控负荷集群DR潜力的动态评估方法。文献[66]基于典型温控负荷模型,建立了温控负荷集群的DR潜力评估方法,并探究了不同温度调整量和不同响应规模下的温控负荷DR潜力。文献[67]建立了单一用户在不同电价以及舒适性要求影响下的响应模型,并就实际运行数据不足的情况,提出了基于概率密度估计的大规模异构空调负荷DR潜力评估方法。文献[68]以DR潜力最大化为目标函数,建立了考虑用户舒适度的空调集群优化调度模型,实现了DR潜力的评估。文献[69]在此基础上定量分析了DR持续时间、提前通知时间、温度设定范围等因素对DR潜力的影响。

在电动汽车聚合方面,文献[70]基于用户出行时间和补偿价格的用户参与度模型评估了电动汽车集群的DR潜力。文献[71]采用闵可夫斯基求和算法将电动汽车集群聚合为广义储能设备,并进一步基于数据驱动方法建立了电动汽车充电站日前和实时DR潜力预测模型。文献[72]首先建立了电动汽

车集群并网的聚合模型,并提出了考虑并网功率约束和充放电计划的插电式电动汽车集群DR潜力评估模型。文献[73]建立了考虑时空分布特性的电动汽车出行活动模型,并基于蒙特卡洛和二项分布法评估了电动汽车集群的DR潜力。文献[74]评估了自动DR机制下光储一体的电动汽车充电站DR潜力。

2) 异类负荷聚合

目前,对异类负荷的聚合DR潜力评估思路主要有两类:(1)先评估同类负荷聚合DR潜力,再进行分类叠加;(2)考虑异类负荷间的耦合响应特性进行评估。

第1类方法不考虑异类负荷间的耦合效应,对负荷聚合DR潜力进行分类累加,应用范围广,但评估精度受限,广泛应用于区域DR潜力的评估。文献[75]以中国佛山市为例,分析了重点行业DR潜力系数,为评估区域DR潜力提供数据支撑。文献[76]评估了中国河南省各行业的削峰DR潜力,全省的DR潜力可由各行业用户叠加汇总得到。文献[28]、文献[77]和文献[78]分别自下而上叠加汇总了丹麦、德国、巴西全国范围内的DR潜力。文献[79]使用OSEMOSYS软件评估了葡萄牙的工业、居民以及第三产业的DR潜力。

第2类方法通常考虑异类负荷间的耦合响应特性建立负荷集群参与DR项目的协同优化模型,通过求解可行域评估聚合DR潜力。文献[80]采用极端能量场景方法建立了考虑时间耦合特性的虚拟电池模型,并以经济效益最大化建立目标函数,通过求解功率可行域评估了电动汽车和暖通空调两类负荷的聚合DR潜力。文献[81]基于异类负荷的单体模型,采用Fourier-Motzkin消元法推导出异类负荷的精确聚合可行域,由此评估异类负荷的聚合DR潜力,其约束条件数量与资源数量呈线性关系,降低了模型计算复杂度。

聚合层面的DR潜力评估仍存在以下几个难点:(1)海量资源聚合的DR潜力评估计算复杂度大,亟须探究降维有效的聚合DR潜力评估方法;(2)不同负荷资源具有不同的响应速度、响应容量等特性,难以用统一的模型进行建模,其聚合DR潜力难以精准评估;(3)现有文献对多种类、多场景下的异构负荷之间的耦合响应特性缺乏深度的剖析与研究。未来可结合态势感知、分析推演等技术深度剖析异构负荷之间的耦合响应特性^[82],建立精准化的聚合DR潜力评估模型。

1.4 按照评估的思路框架分类

国内外对DR潜力的研究采用的分析方法各有不同,但其总体框架存在着一些共性。现有评估方法可分为机理驱动、数据驱动和机理-数据联合驱动,其优缺点总结如表1所示。

表1 DR潜力评估方法的对比
Table 1 Comparison of DR potential assessment methods

评估方法	代表方法	优点	缺点
机理驱动	用电过程分析法	与实际相结合、评估可靠性高	负荷建模复杂、难以大规模推广
	需求价格弹性系数法	计算简单、适用性强	模型过于依赖参数、准确估计参数困难
数据驱动	支持向量神经网络	建模较为容易、实现速度较快	所需数据量大、多源数据处理困难、容易过拟合/欠拟合
机理-数据联合驱动	物理建模与机器学习相结合	规避过拟合/欠拟合的风险、规避机理驱动理想化的弊端	步骤烦琐、处理复杂

1.4.1 机理驱动

机理驱动方法从被评估对象的响应特性、机理角度出发,建立DR潜力评估模型,目前典型的机理驱动的DR潜力评估方法包括用电过程分析法和需求价格弹性系数法。

用电过程分析法的理论依据在于各类用户DR潜力很大程度上取决于其用电特性,对用电过程进行分析时需要较多数据支撑,且涉及行业具体生产流程,评估工作量大^[83]。文献[84]探讨了温控负荷聚合功率与室外温度、温度设定值等参数之间的关系,并提出计及响应不确定性的DR潜力评估模型。文献[85]对数据中心的功耗进行了精细化建模,在此基础上分析了其DR潜力。文献[86]提出了基于负荷对比的DR潜力评估方法,该方法将两年内相似时间但不同天气的负荷进行比较分析,确定空调负荷变化的上下限,从而评估DR潜力。

需求价格弹性系数法采用需求价格弹性来定量表征电力价格变化对于用户响应行为特性的影响^[22],从而评估用户的DR潜力。该方法可应用于所有类型用户,但DR潜力评估结果过于依赖价格弹性系数且并没有考虑实际负荷特性约束,可能会引起较大的评估误差^[87]。文献[22]详细介绍了需求价格弹性系数法评估DR潜力的流程,并对其影响因素进行了分析。文献[32]采用需求价格弹性系数法评估了某配电台区的DR潜力,并探究了激励大小与DR潜力之间的关系。文献[39]基于价格

弹性评估了某区域电网在不同电力市场场景下的削峰DR潜力。文献[88]基于需求价格弹性系数法建立了分时电价场景下的居民用户的DR潜力评估模型。文献[89]基于分位数回归和带有惩罚的B样条算法提出了概率价格弹性模型并利用居民和工业用户数据进行验证,仿真结果表明:由于技术和运营方面的限制,下调价格对工业用户的DR潜力影响更小。

1.4.2 数据驱动

数据驱动方法不关注被评估对象的内在响应机理,而是利用神经网络、支持向量机等机器学习算法建立影响因素和DR潜力之间的映射模型来进行潜力评估。然而,这些模型多属于黑箱式模型,难以直观地解释内部机制,且对数据质量的要求较高。此外,在泛化性、鲁棒性等方面也存在许多难点,导致其难以适应复杂的现实场景,实际中鲜有应用。文献[90]基于Ecogird2.0项目实验数据,建立了DR潜力与时间、环境温度之间的映射函数,并依据实时收集的数据对模型进行实时更新。文献[91]基于EnergyPlus软件模拟得到的DR潜力数据,建立了DR潜力与室外温度的分段线性回归模型。文献[92]在考虑负荷基线差异和季节波动特性的非侵入式负荷分解的基础上,提出了一种从单体用户到大型聚合负荷群均适用的运行DR潜力评估方法。文献[93]基于高斯混合模型,提出了由智能电表数据驱动的实时DR潜力评估方法。文献[94]针对电动汽车和电热水器系统,提出了基于时域卷积网络与Transformer模型相结合的DR潜力预测模型,并探究了不同DR持续时间下的DR潜力。文献[95]对数据驱动方法在DR领域的应用进行了综述。

1.4.3 机理-数据联合驱动

为了克服机理驱动和数据驱动方法的局限性,也有学者提出机理-数据联合驱动的DR潜力评估方法。然而,该方法需要消耗大量的计算资源与时间,需要解决如何优化模型参数和计算复杂性的问题。文献[96]首先基于机理特性建立了楼宇DR潜力分析模型,并利用历史及在线数据对该模型的参数进行修正,从而建立了机理-数据联合驱动的楼宇DR潜力评估模型。文献[97]采用行为经济学中的遗憾匹配机制模拟用户自适应响应行为并采用机器学习算法进行优化求解,提出了考虑多时间尺度不确定性的DR潜力评估方法。文献[98]建立了基于等效热参数模型的空调负荷理论DR潜力评估模型,并进一步考虑用电行为随机性,建立了基于深度学习的DR潜力预测模型。

2 DR潜力评估示范项目

2.1 DR潜力评估项目概况

DR潜力的实际评估项目大多采用“自下而上”法评估聚合层面的DR潜力。美国的PJM市场和澳大利亚的NEM市场于2006年开展了第1批DR潜力评估项目^[23]。此后,世界各地陆续开展DR潜力评估项目,辅助本地的电力系统规划设计和DR政策的制定。表2总结了DR潜力评估项目的研究实例,主要来自美国、英国、澳大利亚等DR发展比较成熟的国家^[99-128]。由表2可知:1)现有DR潜力评估项目以评估可用DR潜力和技术DR潜力为主;2)现有DR潜力评估项目大多对区域内各类型用户进行分析,由于经济、负荷、激励政策差异,不同国家各类型负荷DR潜力占比有较大差异;3)DR潜力评估项目以中长期评估为主,常依据未来预估的负荷增长率、用户参与度等进行评估;4)由于数据条件限制,现有DR潜力评估项目以机理驱动类方法为主,未来有望进一步探索数据驱动在DR潜力评估项目中的应用。

本文以美国联邦能源管理委员会“Assessment of demand response and advanced metering staff report”项目^[99-104]及中国“上海DR市场潜力及效益评估”项目^[121]为例进行具体介绍。

2.2 美国DR潜力评估案例

2.2.1 美国项目案例概况

2006年,美国联邦能源管理委员会对全美各行业可用DR潜力进行了全面评估,截至2022年3月共计公布16份研究报告,采用“用电过程分析法”自下而上汇总了每年全美各机构收集的数据及DR潜力评估结果,评估对象覆盖工业、商业、居民用户。

2.2.2 美国项目案例评估结论

1)不同行业部门的评估结果

该项目初期聚焦于不同行业部门的DR潜力评估,2006—2012年间评估了2006、2008、2010、2012年居民、工商业、电力批发市场及其他类型负荷的可用削峰DR潜力^[99-104],评估结果如图4所示。结果表明:(1)美国预估可用DR潜力在2006年至2012年间稳步增长,其中工商业用户将贡献最多的响应量,预估增速可达到31%;(2)随着电力批发市场DR计划的逐步落实,将有更多的客户参与电力批发市场的交易,未来的DR潜力十分可观。

2)不同区域实体的评估结果

该项目自2011年以来关注零售市场的DR潜力,2011—2018年北美电力可靠性公司(North

表2 DR潜力评估项目研究总结
Table 2 Research summary of DR potential assessment projects

项目名称	地区	项目实施时间	DR潜力类型				时间尺度		空间尺度			思路框架	
			理论	技术	经济	可用	中长期	短期	大洲	国家	城市	数据驱动	机理驱动
Assessment of demand response and advanced metering ^[99-112]	美国	2006—2022				✓	✓			✓			✓
Assessing the value of demand response in the NEM ^[113]	澳大利亚	2006				✓	✓			✓			✓
Electricity smart metering customer behaviour trials (CBT) findings report ^[114]	爱尔兰	2011				✓	✓			✓			✓
Demand side response in the non-domestic sector ^[115]	英国	2012		✓			✓			✓			✓
Electricity demand reduction initial impact assessment ^[116]	英国	2012		✓			✓			✓			✓
Conservation potential assessment ^[117]	美国	2013				✓	✓			✓			✓
Assessment of industrial load for demand response across U.S. regions of the western interconnect ^[118]	美国	2013		✓		✓	✓			✓			✓
Demand response: a study of its potential in Europe ^[119]	欧洲	2014	✓				✓		✓			✓	✓
GB electricity demand—2010 and 2025 initial brattle electricity demand-side model-scope for demand reduction and flexible response ^[120]	英国	2014		✓			✓			✓			✓
上海DR市场潜力及效益评估 ^[121]	中国上海	2015				✓	✓				✓		✓
上海市冬夏季商用楼宇DR潜力后续分析报告 ^[122]	中国上海	2016				✓	✓				✓		✓
Conservation potential assessment ^[123]	美国	2017		✓		✓	✓			✓			✓
ECOGRID 2.0 ^[124]	丹麦	2018				✓	✓	✓		✓			✓
Barriers and opportunities to broader adoption of integrated demand side management at electric utilities ^[125]	美国	2018			✓	✓	✓			✓			✓
Assessment of demand response capability and effectiveness ^[126]	美国佛蒙特州	2019		✓	✓	✓	✓				✓		✓
ENERGTICA 2030 ^[127]	哥伦比亚	2020		✓	✓		✓			✓			✓
电动汽车与电网互动的商业前景 ^[128]	中国上海	2020				✓		✓			✓		✓

注:表中“✓”表示有该项内容。

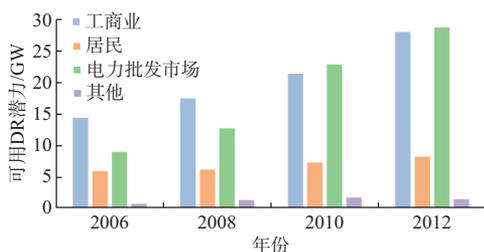


图4 美国2006—2012年可用DR潜力评估结果
Fig. 4 Assessment results of available DR potential in the U.S. from 2006 to 2012

American Power Reliability Corporation, NERC) 下属8个区域实体的零售市场可用DR潜力评估结果如表3所示^[105-111]。从表3中可见:(1)DR潜力评估结果由于各区域的DR项目策略、客户群体以及不

同区域的经济发 展态势的不同呈现明显的差异性;(2)宏观角度上全美可用DR潜力在2011—2016年稳步增长,2017年开始小幅降低。

3) 不同独立系统运营商的实际响应量

美国2020年修订的《国家节能政策法案》要求各机构报告每年的实际响应量,文献[111-112]汇总了不同独立系统运营商2018—2020年的实际响应量,总结在表4中。从表4可见:(1)DR政策是影响DR潜力的关键因素,如CAISO系统运营商在2018年允许代理客户参与日前和实时批发市场的交易,挖掘了更多客户参与DR计划,并实现了800 MW的DR潜力涨幅;2020年PJM容量市场对其交易的响应资源提出了更严格的要求,可参与市

表3 不同区域实体零售市场DR潜力的评估结果
Table 3 Assessment results of DR potential of retail markets of different regional bodies

NERC 区域实体	DR 潜力/MW							
	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
FRCC	3 360	3 306	1924	3 389	3 246.5	3 259.4	3 112.4	3 097.9
MRO	5 450	5 567	4264	4 366	4 508.9	5 231.3	5 364.5	5 252.7
NPCC	613	606	467	654	787.4	1 120.2	821.4	1 058.7
RF	5 529	5 836	5362	5 006	5 372.2	5 505.1	6 171.0	5 899.0
SERC	5 937	6 046	8254	8 343	9 259.1	8 265.6	8 787.9	8 452.9
SPP RE	1 215	1 323	1594	1 324	1 922.7	5 004.4	1 700.4	1 686.8
Texas RE	340	480	459	613	696.4	773.3	823.8	914.0
WECC	4 016	5 269	4681	7 427	7 019.2	6 625.3	4 553.7	4 382.6

场的响应资源减少导致 PJM 市场 2019—2020 年总响应量减少 12%;(2)突发公共事件会改变负荷需求分布情况,从而影响 DR 潜力。如全球新型冠状病毒感染疫情使得美国部分工商业负荷需求转移到居民负荷,部分地区 DR 潜力降幅高达 15%^[129]。

表4 不同独立系统运营商DR潜力的评估结果
Table 4 Assessment results of DR potential of different independent system operators

系统运营商	DR 潜力/MW		
	2018年	2019年	2020年
CAISO	2 400.0	3 200.0	3 290.0
ERCOT	3 261.9	3 551.8	3 939.0
ISO-NE	356.0	454.8	476.2
MISO	12 931.0	13 612.0	13 024.0
NYISO	1 431.1	1 404.0	1 274.1
PJM	9 294.0	10 185.0	8 915.0
SPP	0	0.3	34.2
总和	29 674.0	32 407.9	30 953.0

2.3 中国 DR 潜力评估案例

2.3.1 中国项目案例概况

2014年5月29日,上海正式启动了“DR试点城市”项目,平均削减高峰负荷超过10%。2015年,自然资源保护协会对上海在直接负荷管理及可削减负荷两类激励型 DR 项目下的可用 DR 潜力进行了评估^[121]。该项目采用“用电过程分析法”,通过分析各类用户典型负荷曲线自下而上评估 DR 潜力。

2.3.2 中国项目案例评估结论

1)不同行业部门的评估结果

基于上述方法,该项目对 2020 年、2025 年及 2030 年上海 DR 可用 DR 潜力进行评估,DR 潜力发挥程度分为基本、中等、最佳 3 级,评估结果如图 5 所示。由图 5 可见:(1)上海市工商业可削减负荷项目预期贡献 DR 潜力的主要份额,这与中国负荷结构有密切关系;(2)不同于工商业空调负荷,居民空调

直接负荷控制项目能够为 DR 市场潜力做出显著贡献。

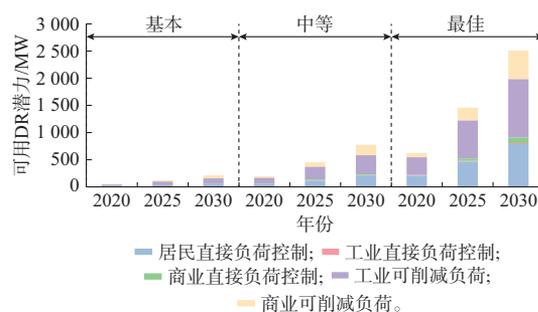


图5 上海可用DR潜力评估结果
Fig. 5 Assessment result of available DR potential in Shanghai

2)不同终端用电设备的评估结果

基于更充分的负荷特性与用户响应数据,自然资源保护协会于2016年进一步对上海市商业楼宇不同终端用电设备的 DR 潜力进行评估^[122],具体评估数据及细节见文献^[122]。评估结果表明:(1)空调是造成高峰负荷的主要原因,但也是商业楼宇提供 DR 潜力的重要负荷;(2)除空调之外,其他用电终端设备也可提供 DR 潜力,特别是可调节的照明和插座设备。

2.4 国外案例对中国的启示

美国、英国等发达国家在 DR 潜力评估及应用方面积累了广泛的经验,中国可借鉴其研究成果实现 DR 潜力评估项目在以下几方面的突破。

1)提高数据的数量与质量。中国 DR 潜力评估项目的很多假设都是建立在国际经验的基础上的,仅考虑了部分试点用户的负荷响应情况。随着 DR 试点的开展,未来需建立本地 DR 数据库,充分挖掘本地负荷特性及用户行为特性,提高 DR 潜力评估的准确性。

2)评估负荷在不同 DR 项目下的 DR 潜力^[121]。美国 FERC 机构评估了用户在直接负荷控制、动态

电价等不同DR项目下的DR潜力^[103]。为充分挖掘用户的DR潜力,建议中国提供满足不同用户的多元化DR项目,同时评估用户在不同项目下的DR潜力。

3)评估负荷在不同应用场景的DR潜力。文献[118]评估了美国西部互联区域内工业负荷可应用于监管、应急、提供灵活性、作为容量储备等场景的DR潜力,而中国DR潜力评估项目仍局限于削峰场景,未来需进一步探究不同应用场景的DR潜力。

4)定期评估DR潜力。DR潜力与经济发展水平、用户响应意愿、多元负荷特性等因素密切相关,具有明显的时变特性。因此,建议利用更新的数据定期对DR潜力进行评估,探究DR潜力的变化趋势,为未来的DR计划提供重要参考信息。

3 DR潜力评估应用范围扩展

随着新型电力系统建设的不断推进,系统对于负荷侧调节的实际需求也在不断变化,DR的作用和价值不断被深化,一些新型DR概念相继被提出。本章将先介绍综合DR、低碳DR、动态DR这3类新型DR,在此基础上对DR潜力估计面向新型电力系统的应用范围扩展进行分析。

3.1 综合DR

随着多能源系统的发展以及能源市场的改革,电、气、热、冷等不同能源形式之间相互耦合、相互替代的关系不断加深。在上述背景下,综合DR应运而生。综合DR是需求侧在综合能源网络中传统DR的衍生和扩展,不仅能实现传统DR在时间上削减和转移负荷,还能将用能种类转换与时间转移相结合,充分利用多能互补特性激活综合能源网络的DR潜力^[130]。在综合DR中,除了需对传统DR中可削减、可转移等负荷进行建模,还需对微型燃气轮机、电制氢设备等可实现不同能源间相互转换的可转换负荷建立响应模型。

3.2 低碳DR

在中国“双碳”战略目标的背景下,电力系统的低碳转型需求愈加迫切,低碳DR的概念被提出。传统的DR机制从“电”视角出发,以促进电力系统供需平衡为导向。而低碳DR从“碳”视角出发,以降低电力系统碳排放为导向,是一种通过给予电力用户不同用电行为下所产生的相应用电碳排放信息,引导用户改变其自身用电行为,从而降低系统碳排放的减碳新机制^[131]。在低碳DR机制下,用户可通过用电碳排放因子来获知自身用电行为产生的碳排放量,其DR潜力主要受自身碳减排意愿和碳市场下的激励影响^[131]。

3.3 动态DR

随着电动汽车、分布式储能等具有良好动态响应特性的资源在用户侧的广泛接入,动态DR开始受到学界的广泛关注。关于动态DR尚未有统一的定义,目前主要有3种不同阐述:1)动态DR是维持短时间尺度(秒级、分钟级)电网供需平衡的一类DR,其重点在于响应速度快和持续时间短^[132];2)动态DR是多时间尺度连续滚动优化的一类DR,其重点在于协调不同时间尺度的DR^[133];3)动态DR是改善电网动态过程品质的一种负荷调节手段,其重点在于改善电网受扰动后从稳态过渡到另一个稳态过程中的控制性能^[134]。在上述3种阐述中,第3种阐述同时考虑了电网的动态变化过程特征和DR资源的动态特性,相比于前两者内涵更加丰富。

3.4 DR潜力评估应用扩展

与传统DR相比,综合DR扩充了响应资源,促进了多种能源之间的相互转换,低碳DR从“碳”视角出发,改变了传统DR的机制导向,动态DR将原先DR的内涵从“维持实时功率平衡”拓展到“改善电网动态过程品质”。相应的,DR潜力估计的应用范围也需相应进一步扩展。笔者认为,在新型DR视角下,DR潜力评估应用范围应拓展为“电碳耦合视角下需求侧多能流资源动态响应过程中的综合性能指标体系”。与传统DR潜力评估相比,区别体现在如下3个方面:

1)从“单一能源形式”转变为“多能源耦合形式”。已有DR潜力评估多针对单一的电能源形式,较少考虑电、气、热、冷等不同能源形式之间耦合响应效益。综合DR通过不同能源形式之间的转换来向电网提供灵活性,相比于纯电力DR,综合DR的响应灵活性更强但响应机理更加复杂。为充分利用多能互补特性激活综合能源网络的DR潜力,对综合DR中能量转化设备的响应速度、响应持续时间等性能指标提出了更高的要求。相应的,需求侧资源DR潜力的内涵不应局限于容量这个单一指标,而应该是包含响应容量、响应时延、响应精度、响应持续时间、平均响应速率、响应恢复速率等诸多指标在时间上的分布,即构成DR潜力评估的综合性能指标体系。

2)从“电”视角转变为“电碳耦合”视角。已有DR潜力评估多从“电”视角出发,评估DR资源的负荷调控潜力。针对新的应用范围,DR资源的DR潜力应包含负荷调控潜力和负荷减碳潜力两部分。随着电力系统碳计量研究的深入,现有研究已经可以实现电力系统全过程碳排放的计量,为评估DR资源的减碳潜力提供基础。与当前单一“电”视角下的

DR潜力相比,探究“电碳耦合”视角下的DR潜力问题有利于充分发挥DR资源的减碳潜力,助力“双碳”目标的实现,属于面向新型电力系统的应用范围拓展。

3)从“离线静态评估”转变为“在线动态评估”。已有DR潜力评估多是离线静态的,较少考虑资源DR潜力的动态变化。因为动态DR最终要服务于电网动态过程品质的改善,需求侧资源DR潜力也不应仅仅局限在离线的静态层面,而需要对负荷资源的DR潜力进行在线动态评估,方可支撑基于动态DR的各类功能及其相关业务应用。

4 研究重点展望

随着新型电力系统的发展,未来DR将具备如下4个特征:1)综合化,即可实现电、气、热、冷等不同能源形式的耦合响应;2)低碳化,即促进电力系统碳减排;3)动态化,即具有更快的响应速度;4)常态化,即长时间持续地开展DR。在上述背景下,DR潜力评估被赋予了新的要求,本章从多能源虚拟电厂DR潜力评估、电碳耦合背景下的DR潜力评估、动态DR背景下的DR潜力评估和常态化DR背景下的DR潜力评估4个方面对DR潜力评估的未来研究重点进行展望。

4.1 多能源虚拟电厂DR潜力评估

当前DR潜力评估研究多局限于电力这一种能源形式,随着电、气、热、冷等不同能源形式之间耦合的不断加深,未来包含分布式电源(分布式光伏、微型燃气轮机、冷热电联产系统等)、分布式储能、柔性负荷、电动汽车的多能源虚拟电厂将得到快速发展。然而,一方面,不同能流特性差异大,且不同能流之间存在相互转换,相互耦合作用,其响应机理更加复杂;另一方面,不同能流响应时表现出不同的时间尺度,因此多能源虚拟电厂具有多时间尺度的特点^[135],需要协调不同响应时间尺度上的DR潜力。未来可从以下两方面展开研究:

1)多能流虚拟电厂的响应机理研究。需要分析能流的响应特性及不同能流之间的转换特性,在此基础上建立多能流耦合的综合响应机理模型。此外,由于气-热网络的动态特性^[135],需提出多能流虚拟电厂的动态响应机理模型。

2)多能流虚拟电厂DR潜力时空分布研究。需要分析不同能流响应的的时间尺度差异,研究多能流虚拟电厂协调不同时间尺度的DR资源方式,并在此基础上评估多能流虚拟电厂DR潜力的时空分布特性。

4.2 电碳耦合背景下的DR潜力评估

随着电碳耦合的不断深入,电力用户将逐步纳入碳市场中,为有效促进DR资源在碳市场下的交易,科学评估负荷在碳市场下的减碳潜力至关重要,未来可从以下3个方面展开研究:

1)面向低碳DR的碳排放计量研究。需要分析不同网络拓扑下DR资源运行的直接碳排放和间接碳排放,结合碳排放流等理论开展面向低碳DR的碳排放计量研究,提出动态碳排放因子的科学计量方法,为评估DR资源的减碳潜力提供依据。

2)面向碳减排核算的碳基线估计研究。传统DR中负荷基线估计只需考虑用户用电行为的不确定性,是一个单不确定性问题。对于低碳DR,需要考虑碳排放从源侧向荷侧的时空转移,因此,碳基线(即如果用户不参与DR本该消耗的负荷所对应的碳排放量)的估计涉及源网荷各个环节,源侧和网侧的不确定性也会影响碳基线估计的精度。因此,需要研究源、网、荷不确定性对碳基线估计的影响,提出碳基线的科学估计方法。

3)DR资源的减碳潜力评估研究。需要结合上述碳排放计量研究和碳基线估计研究,针对不同应用场景,从时间和空间两个维度开展DR资源的减碳潜力评估及影响因素分析研究。

4.3 动态DR背景下的DR潜力评估

动态DR潜力评估对评估的时效性与准确性提出了更高的要求。然而,一方面,负荷资源的调节过程存在时序耦合约束,其响应特性随时间不同而发生变化,前序动作会影响后序调节能力的大小。另一方面,负荷调节受到天气、用户行为等多重因素影响,负荷调节潜力本身具有很强的时变特性,其DR潜力难以准确评估。未来可从以下两方面展开研究:

1)适应小样本特性的动态DR潜力评估。据统计,2019年中国8省市累计组织实施DR共25次,虽然这一数字在2021年提升至61次,但总体来看国内开展DR的次数仍然十分有限^[136]。因此,用户真实的响应数据积累较少,且试点用户的响应规律还难以直接推广到其他用户上。动态DR潜力评估这一小样本特性使得依赖数据的评估方法难以奏效,因此,适应小样本特性的动态DR潜力评估方法成为DR潜力评估的关键问题。已有学者关注到这一问题并针对性开展了相关研究,如采用迁移学习方法将已有用户数据迁移到未知用户上^[137],或者采用分布鲁棒的方法充分提取小样本数据中的分布信息,再利用行业共性与用户个性相结合的方式实现由典型用户到一般用户的大规模DR潜力推演^[138],

未来也可考虑数据增强的方法如生成对抗网络来解决这一问题。

2) 概率性动态 DR 潜力评估。由于动态 DR 潜力受到多种耦合因素的影响,具有很强的不确定性,确定性评估无法在需求侧资源优化调度和辅助服务市场投标策略制定等实时运行场景中给予准确参考。因此,需要开展概率性动态 DR 潜力评估相关研究,通过区间、概率密度函数、分位数等形式给出 DR 潜力未来的变化趋势,从而为决策者提供更多参考信息,降低决策风险。

4.4 常态化 DR 背景下的 DR 潜力评估

在未来常态化 DR 的背景下,基于过去历史数据的基线负荷估计难以适用,为 DR 潜力评估带来了新的挑战。有研究提出,准线型 DR 在面向常态化 DR 背景时具有更好的适应性和可持续性^[139],有望通过准线解决常态化 DR 背景下的 DR 潜力评估难题,未来可从以下两方面展开研究:

1) 面向常态化 DR 的准线优化研究。准线型 DR 的目标是引导用户成为有助于高比例新能源消纳的电网友好型用户,负荷准线形态将直接决定 DR 用户平抑系统波动的效果^[140]。因此,需要研究负荷准线的形态对用户响应行为的影响机理以及不同负荷准线平抑系统波动效果的差异,从而探究面向常态化 DR 的准线优化方法。

2) 基于准线的 DR 潜力评估研究。基于基线的 DR 潜力评估方法关注用户以基线负荷为基准调整负荷量的大小,其估计的准确性会因为负荷侧面临各种复杂的实际场景而面临挑战^[141-143]。而基于准线的 DR 潜力评估方法则关注用户接近负荷准线趋势的程度。因此,需研究如何基于准线与负荷特性量化用户的 DR 潜力大小,并探究不同负荷准线对用户 DR 潜力的影响。

5 结语

DR 资源潜力挖掘是提高新型电力系统的可控性及可调度性、降低系统附加建设投资成本的一种有效手段。随着 DR 市场化的不断深入,未来将会有更多类型的用户参与 DR。准确的 DR 资源潜力评估在电力系统规划、调度、市场交易等方面具有重要作用。本文分别从评估的 DR 潜力类型、评估的时间尺度、评估的空间尺度以及评估的思路框架 4 个维度梳理了 DR 潜力评估的研究进展,并分析了不同维度下 DR 潜力评估的应用场景;总结了 DR 潜力评估的实际项目应用,以典型项目为例进行重点剖析,并通过国内外案例对比分析中国 DR 潜力评估项目未来的发展方向;介绍了综合 DR、低碳 DR

和动态 DR 这 3 类新型 DR,并在此基础上对 DR 潜力评估面向新型电力系统的应用范围扩展进行分析。最后,从多能源虚拟电厂 DR 潜力评估、电碳耦合背景下的 DR 潜力评估、动态 DR 背景下的 DR 潜力评估和常态化 DR 背景下的 DR 潜力评估 4 个方面展望了未来的研究方向。考虑到未来的发展需求,对 DR 潜力评估研究提出以下几点建议:

1) 结合国内 DR 市场进程完善 DR 潜力评估机制,建立 DR 潜力评估数据库并评估负荷在不同 DR 项目、不同应用场景下的 DR 潜力。

2) 结合新型 DR 概念深入开展 DR 潜力评估研究。如结合综合 DR 概念开展多能源虚拟电厂 DR 潜力评估研究,结合动态 DR 概念开展动态 DR 潜力评估研究。

3) 深入调研实际 DR 潜力评估应用的需求,加强理论研究与实际应用的联系。

参考文献

- [1] 中国工程院. 我国碳达峰碳中和战略及路径[EB/OL]. [2023-04-26]. https://www.cae.cn/cae/html/main/col1/2022-04/02/20220402174046345475198_1.html. Chinese Academy of Engineering. The strategy and path of China's carbon peaking and carbon neutrality[EB/OL]. [2023-04-26]. https://www.cae.cn/cae/html/main/col1/2022-04/02/20220402174046345475198_1.html.
- [2] 舒印彪,陈国平,贺静波,等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69. SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [3] 张勇军,羿应棋,李立涅,等. 双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 1-12. ZHANG Yongjun, YI Yingqi, LI Licheng, et al. Prospect of new low-voltage distribution system technology driven by carbon emission peak and carbon neutrality targets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 1-12.
- [4] LU X X, LI K P, XU H C, et al. Fundamentals and business model for resource aggregator of demand response in electricity markets[J]. Energy, 2020, 204: 117885.
- [5] 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.
- [6] 葛鑫鑫,付志扬,徐飞,等. 面向新型电力系统的虚拟电厂商业模式与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 129-146. GE Xinxin, FU Zhiyang, XU Fei, et al. Business model and key technologies of virtual power plant for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 129-146.
- [7] 郑若楠,李志浩,唐雅洁,等. 考虑居民用户参与度不确定性的

- 激励型需求响应模型与评估[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 154-162.
- ZHENG Ruonan, LI Zhihao, TANG Yajie, et al. Incentive demand response model and evaluation considering uncertainty of residential customer participation degree [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 154-162.
- [8] 任惠, 陈萍, 韩璐, 等. 共享电动汽车可调度容量时空预测[J/OL]. 电网技术: 1-11[2023-04-26]. <http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotat-DWJS20220505001.htm>.
- REN Hui, CHEN Ping, HAN Lu, et al. Spatial and temporal forecasting of schedulable capacity of shared electric vehicles [J/OL]. Power System Technology: 1-11[2023-04-26]. <http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotat-DWJS20220505001.htm>.
- [9] 孙毅, 毛烨华, 李泽坤, 等. 面向电力大数据的用户负荷特性和可调节潜力综合聚类方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6259-6271.
- SUN Yi, MAO Yehua, LI Zekun, et al. A comprehensive clustering method of user load characteristics and adjustable potential based on power big data [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6259-6271.
- [10] 徐青山, 丁一帆, 颜庆国, 等. 大用户负荷调控潜力及价值评估研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6791-6800.
- XU Qingshan, DING Yifan, YAN Qingguo, et al. Research on evaluation of scheduling potentials and values on large consumers [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6791-6800.
- [11] SCHULLER A, FLATH C M, GOTTWALT S. Quantifying load flexibility of electric vehicles for renewable energy integration [J]. Applied Energy, 2015, 151: 335-344.
- [12] WANG F, XIANG B, LI K P, et al. Smart households' aggregated capacity forecasting for load aggregators under incentive-based demand response programs [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56: 1086-1097.
- [13] LI K P, WANG F, MI Z Q, et al. Capacity and output power estimation approach of individual behind-the-meter distributed photovoltaic system for demand response baseline estimation [J]. Applied Energy, 2019, 253: 113595.
- [14] WANG F, LI K P, LIU C, et al. Synchronous pattern matching principle-based residential demand response baseline estimation: mechanism analysis and approach description [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6972-6985.
- [15] LI K P, YAN J C, HU L, et al. Two-stage decoupled estimation approach of aggregated baseline load under high penetration of behind-the-meter PV system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 4876-4885.
- [16] 王珂, 姚建国, 姚良忠, 等. 电力柔性负荷调度研究综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 127-135.
- WANG Ke, YAO Jianguo, YAO Liangzhong, et al. Survey of research on flexible loads scheduling technologies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 127-135.
- [17] 高赐威, 李倩玉, 李慧星, 等. 基于负荷聚合商业的需求响应资源整合方法与运营机制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 78-86.
- GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Huixing, et al. Methodology and operation mechanism of demand response resources integration based on load aggregator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 78-86.
- [18] LU X X, GE X X, LI K P, et al. Optimal bidding strategy of demand response aggregator based on customers' responsiveness behaviors modeling under different incentives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4): 3329-3340.
- [19] ROOS A, BOLKESJØ T F. Value of demand flexibility on spot and reserve electricity markets in future power system with increased shares of variable renewable energy [J]. Energy, 2018, 144: 207-217.
- [20] Public Law 110th Congress. Energy independence and security act of 2007 [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-110publ140/pdf/PLAW-110publ140.pdf>.
- [21] DRANKA G G, FERREIRA P. Review and assessment of the different categories of demand response potentials [J]. Energy, 2019, 179: 280-294.
- [22] 王蓓蓓. 面向智能电网的用户需求响应特性和能力研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3654-3663.
- WANG Beibei. Research on consumers' response characteristics and ability under smart grid: a literatures survey [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3654-3663.
- [23] 李章允. 电力需求响应潜力评估及其应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- LI Zhangyun. Evaluation of power demand response potential and its application [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [24] MÜLLER T, MÖST D. Demand response potential: available when needed? [J]. Energy Policy, 2018, 115: 181-198.
- [25] WOHLFARTH K, KLOBASA M, GUTKNECHT R. Demand response in the service sector—theoretical, technical and practical potentials [J]. Applied Energy, 2020, 258: 114089.
- [26] GILS H C. Assessment of the theoretical demand response potential in Europe [J]. Energy, 2014, 67: 1-18.
- [27] PANG Y X, HE Y X, JIAO J, et al. Power load demand response potential of secondary sectors in China: the case of western Inner Mongolia [J]. Energy, 2020, 192: 116669.
- [28] KWON P S, ØSTERGAARD P. Assessment and evaluation of flexible demand in a Danish future energy scenario [J]. Applied Energy, 2014, 134: 309-320.
- [29] PAULUS M, BORGGREFFE F. The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany [J]. Applied Energy, 2011, 88(2): 432-441.
- [30] GREIN A, PEHNT M. Load management for refrigeration systems: potentials and barriers [J]. Energy Policy, 2011, 39(9): 5598-5608.
- [31] 叶秋子. 面向风电消纳的温控负荷控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- YE Qiuzi. Research on temperature control load control strategy for wind power consumption [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [32] QIN, CHENG L, XU H L, et al. Practical demand response potential evaluation of air-conditioning loads for aggregated

- customers[J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 71-81.
- [33] 李彪, 万灿, 赵健, 等. 基于实时电价的产消者综合响应模型[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(7): 81-88.
LI Biao, WAN Can, ZHAO Jian, et al. Real-time electricity price based integrated response model for prosumers [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(7): 81-88.
- [34] 张聪, 张祥文, 夏俊荣, 等. 电动汽车实时可调度容量评估方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(22): 99-106.
ZHANG Cong, ZHANG Xiangwen, XIA Junrong, et al. Research on estimation of electric vehicles real-time schedulable capacity [J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(22): 99-106.
- [35] 王溪. 基于大数据分析方法的温控负荷可调度容量预测及应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
WANG Xi. Prediction and application of dispatchable capacity of temperature control load based on big data analysis method [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [36] 张亚朋, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 电动汽车虚拟电厂的多时间尺度响应能力评估模型[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(12): 94-103.
ZHANG Yapeng, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Response capability evaluation model with multiple time scales for electric vehicle virtual power plant [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(12): 94-103.
- [37] XIANG B, LI K P, GE X X, et al. Day-ahead probabilistic forecasting of smart households' demand response capacity under incentive-based demand response program [C]// 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), November 21-23, 2019, Beijing, China: 1078-1083.
- [38] 王蓓蓓, 杨雪纯, 杨胜春. 基于中长期时间维度的需求响应潜力及效果的系统动力学分析[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(24): 6368-6377.
WANG Beibei, YANG Xuechun, YANG Shengchun. Demand response performance and potential system dynamic analysis based on the long and medium time dimensions [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(24): 6368-6377.
- [39] 李亚平, 王珂, 郭晓蕊, 等. 基于多场景评估的区域电网需求响应潜力[J]. *电网与清洁能源*, 2015, 31(7): 1-7.
LI Yaping, WANG Ke, GUO Xiaorui, et al. Demand response potential based on multi-scenarios assessment in regional power system [J]. *Power System and Clean Energy*, 2015, 31(7): 1-7.
- [40] AFZALAN M, JAZIZADEH F. Residential loads flexibility potential for demand response using energy consumption patterns and user segments [J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 113693.
- [41] 宋杰, 陈振宇, 杨阳, 等. 考虑资源相关性和不确定性的负荷需求响应决策研究[J]. *电力建设*, 2019, 40(6): 132-138.
SONG Jie, CHEN Zhenyu, YANG Yang, et al. Research on load demand response decision considering resource correlation and uncertainty [J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(6): 132-138.
- [42] 齐宁, 程林, 田立亭, 等. 考虑柔性负荷接入的配电网规划研究综述与展望[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(10): 193-207.
QI Ning, CHENG Lin, TIAN Liting, et al. Review and prospect of distribution network planning research considering access of flexible load [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(10): 193-207.
- [43] LINDBERG C F, ZAHEDIAN K, SOLGI M, et al. Potential and limitations for industrial demand side management [J]. *Energy Procedia*, 2014, 61: 415-418.
- [44] 何方波, 赵明, 王楷, 等. 考虑需求响应的源荷协调多目标优化方法[J]. *电网与清洁能源*, 2021, 37(10): 51-58.
HE Fangbo, ZHAO Ming, WANG Kai, et al. A multi objective optimization method of source load coordination considering demand response [J]. *Power System and Clean Energy*, 2021, 37(10): 51-58.
- [45] 张海静, 周颖, 王为帅, 等. 典型高耗能工业用户发用电经济优化建模及调节潜力研究[J]. *电力需求侧管理*, 2021, 23(2): 16-21.
ZHANG Haijing, ZHOU Ying, WANG Weishuai, et al. Study on economic optimization modeling and regulation potential of power generation and consumption for typical high energy consumption industrial users [J]. *Power Demand Side Management*, 2021, 23(2): 16-21.
- [46] 姚明涛, 胡兆光, 张宁, 等. 工业负荷提供辅助服务的多智能体响应模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(25): 4219-4226.
YAO Mingtao, HU Zhaoguang, ZHANG Ning, et al. Multi-agent response simulation of industrial loads for ancillary services [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(25): 4219-4226.
- [47] GAN L, CHEN X Y, WU L, et al. A method to evaluate the power dispatching potential of energy intensive steel enterprises [C]// 2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), July 13-15, 2020, Weihai, China: 290-295.
- [48] ALCÁZAR-ORTEGA M, ÁLVAREZ-BEL C, ESCRIVÁ-ESCRIVÁ G, et al. Evaluation and assessment of demand response potential applied to the meat industry [J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 84-91.
- [49] SUN Z Y, LI L. Potential capability estimation for real time electricity demand response of sustainable manufacturing systems using Markov decision process [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 65: 184-193.
- [50] 代家强. 面向工商业负荷的智能用电能量管理建模及优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
DAI Jiaqiang. Research on modeling and optimization of intelligent energy management for industrial and commercial load [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [51] GERAMI N, GHASEMI A, LOTFI A, et al. Energy consumption modeling of production process for industrial factories in a day ahead scheduling with demand response [J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2021, 25: 100420.
- [52] 周博曦, 张国静, 徐家恒, 等. 需求侧负荷可调度潜力分析及供需协调策略研究[J]. *山东电力技术*, 2021, 48(1): 1-5.
ZHOU Boxi, ZHANG Guojing, XU Jiaheng, et al. Schedulable potential analysis as well as supply and demand coordination strategy for demand side load [J]. *Shandong Electric Power*, 2021, 48(1): 1-5.
- [53] MOR G, CIPRIANO J, GRILLONE B, et al. Operation and energy flexibility evaluation of direct load controlled buildings equipped with heat pumps [J]. *Energy and Buildings*, 2021, 253: 111484.
- [54] 陆斌. 空调负荷辅助参与配电网经济调压策略研究[D]. 南京:

- 南京师范大学,2018.
- LU Bin. Research on economic voltage regulation strategy of distribution network assisted by air conditioning load [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2018.
- [55] 王怡岚,童亦斌,黄梅,等.基于需求侧响应的空调负荷虚拟储能模型研究[J].电网技术,2017,41(2):394-401.
- WANG Yilan, TONG Yibin, HUANG Mei, et al. Research on virtual energy storage model of air conditioning loads based on demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 394-401.
- [56] LI Y P, ZUO J, QIAN T T, et al. Demand response potential estimation for commercial buildings [C]// 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), September 17-19, 2018, Tianjin, China: 2999-3003.
- [57] 张强.面向需求响应的楼宇空调负荷可控潜力评估模型[J].电工技术,2021(9):38-40.
- ZHANG Qiang. Demand response oriented assessment model for controllable potential of building air conditioning load [J]. Electric Engineering, 2021(9): 38-40.
- [58] ZHANG P, LU X X, LI K P. Achievable energy flexibility forecasting of buildings equipped with integrated energy management system [J]. IEEE Access, 2021, 9: 122589-122599.
- [59] UTAMA C, TROITZSCH S, THAKUR J. Demand-side flexibility and demand-side bidding for flexible loads in air-conditioned buildings[J]. Applied Energy, 2021, 285: 116418.
- [60] 涂京,周明,宋旭帆,等.居民用户参与电网调峰激励机制及优化用电策略研究[J].电网技术,2019,43(2):443-453.
- TU Jing, ZHOU Ming, SONG Xufan, et al. Research on incentive mechanism and optimal power consumption strategy for residential users' participation in peak shaving of power grid [J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 443-453.
- [61] 颜伟杰.考虑电动汽车参与的综合能源系统优化研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- YAN Weijie. Research on optimization of comprehensive energy system considering the participation of electric vehicles [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [62] WANG F, LU X X, CHANG X Q, et al. Household profile identification for behavioral demand response: a semi-supervised learning approach using smart meter data [J]. Energy, 2022, 238: 121728.
- [63] LI K P, CAO X, GE X X, et al. Meta-heuristic optimization-based two-stage residential load pattern clustering approach considering intra-cluster compactness and inter-cluster separation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(4): 3375-3384.
- [64] LIN S F, LIN M C, LIU D F, et al. An evaluation method for the response flexibility of aggregated inverter air conditioners [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021, 31(1): 12689.
- [65] 崔屹峰,李珍国,贾清泉,等.基于参数辨识与状态估计的温控负荷响应能力动态评估[J].电力系统自动化,2021,45(1): 150-158.
- CUI Yifeng, LI Zhenguo, JIA Qingquan, et al. Dynamic evaluation of response potential of thermostatically controlled load based on parameter identification and state estimation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 150-158.
- [66] 惠红勋.温控负荷参与电力系统动态响应的建模与控制方法研究[D].杭州:浙江大学,2020.
- HUI Hongxun. Research on modeling and control method of temperature control load participating in dynamic response of power system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [67] XIE D J, HUI H X, DING Y, et al. Operating reserve capacity evaluation of aggregated heterogeneous TCLs with price signals[J]. Applied Energy, 2018, 216: 338-347.
- [68] 楼家辉.定频空调负荷聚合建模及其调控策略研究[D].杭州:浙江大学,2018.
- LOU Jiahui. Research on load aggregation modeling and control strategy of constant frequency air conditioning [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [69] 王蓓蓓,朱峰,嵇文路,等.中央空调降负荷潜力建模及影响因素分析[J].电力系统自动化,2016,40(19):44-52.
- WANG Beibei, ZHU Feng, JI Wenlu, et al. Load cutting potential modeling of central air-conditioning and analysis on influencing factors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 44-52.
- [70] 王明深,穆云飞,贾宏杰,等.考虑用户出行时间和补偿价格的电动汽车集群响应能力评估模型[J].华北电力技术,2017(3): 23-31.
- WANG Mingshen, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Response capacity evaluation model of EV aggregator considering the travelling time and compensation price [J]. North China Electric Power, 2017(3): 23-31.
- [71] 詹祥澎,杨军,韩思宁,等.考虑电动汽车可调度潜力的充电站两阶段市场投标策略[J].电力系统自动化,2021,45(10): 86-96.
- ZHAN Xiangpeng, YANG Jun, HAN Sining, et al. Two-stage market bidding strategy of charging station considering schedulable potential capacity of electric vehicle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 86-96.
- [72] ZHANG H C, HU Z C, XU Z W, et al. Evaluation of achievable vehicle-to-grid capacity using aggregate PEV model [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 784-794.
- [73] 钱甜甜,李亚平,郭晓蕊,等.基于时空活动模型的电动汽车充电功率计算和需求响应潜力评估[J].电力系统保护与控制,2018,46(23):127-134.
- QIAN Tiantian, LI Yaping, GUO Xiaorui, et al. Calculation of electric vehicle charging power and evaluation of demand response potential based on spatial and temporal activity model [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 127-134.
- [74] CHEN Q F, WANG F, HODGE B M, et al. Dynamic price vector formation model-based automatic demand response strategy for PV-assisted EV charging stations [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2903-2915.
- [75] 王岩.佛山电力需求响应关键技术研究及平台实现[D].北京:华北电力大学,2017.
- WANG Yan. Research on key technologies of Foshan power demand response and platform implementation [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [76] 刘军会,杨钦臣,齐苗苗.河南省主要行业电力需求侧响应削

- 峰潜力评估[J].河南电力,2020(增刊2):52-57.
- LIU Junhui, YANG Qinchen, QI Miaomiao. Evaluation of peak-shaving potential of power demand side response in main industries of Henan Province[J]. Henan Electric Power, 2020 (Supplement 2): 52-57.
- [77] GILS H C. Economic potential for future demand response in Germany—modeling approach and case study [J]. Applied Energy, 2016, 162: 401-415.
- [78] DRANKA G G, FERREIRA P. Load flexibility potential across residential, commercial and industrial sectors in Brazil [J]. Energy, 2020, 201: 117483.
- [79] ANJO J, NEVES D, SILVA C, et al. Modeling the long-term impact of demand response in energy planning: the Portuguese electric system case study[J]. Energy, 2018, 165: 456-468.
- [80] 吴界辰,艾欣,胡俊杰.需求侧资源灵活性刻画及其在日前优化调度中的应用[J].电工技术学报,2020,35(9):1973-1984.
- WU Jiechen, AI Xin, HU Junjie. Methods for characterizing flexibilities from demand-side resources and their applications in the day-ahead optimal scheduling [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(9): 1973-1984.
- [81] WEN Y L, HU Z C, YOU S, et al. Aggregated feasible region of heterogeneous demand-side flexible resources—part I: theoretical derivation of the exact model[EB/OL]. [2023-03-01]. <https://arxiv.org/abs/2111.04963>.
- [82] 孙毅,李泽坤,许鹏,等.异构柔性负荷建模调控关键技术及发展方向研究[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7146-7158.
- SUN Yi, LI Zekun, XU Peng, et al. Research on key technologies and development direction of heterogeneous flexible load modeling and regulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7146-7158.
- [83] 李章允,王钢,丁茂生,等.考虑负荷用电统计特性的需求响应潜力评估[J].中国科技论文,2017,12(5):529-536.
- LI Zhangyun, WANG Gang, DING Maosheng, et al. Demand response potential quantitative evaluation considering load statistical characteristics[J]. China Sciencepaper, 2017, 12(5): 529-536.
- [84] 李亚平,姚建国,雍太有,等.居民温控负荷聚合功率及响应潜力评估方法研究[J].中国电机工程学报,2017,37(19):5519-5528.
- LI Yaping, YAO Jianguo, YONG Taiyou, et al. Estimation approach to aggregated power and response potential of residential thermostatically controlled loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5519-5528.
- [85] 陈敏,高赐威,陈宋宋,等.考虑数据中心用电负荷调节潜力的双层经济调度模型[J].中国电机工程学报,2019,39(5):1301-1314.
- CHEN Min, GAO Ciwei, CHEN Songsong, et al. Bi-level economic dispatch modeling considering the load regulation potential of internet data centers[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1301-1314.
- [86] SHILJKUT V M, RAJAKOVIC N L. Demand response capacity estimation in various supply areas[J]. Energy, 2015, 92: 476-486.
- [87] 伍子东.需求响应关键技术研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- WU Zidong. Research on key technologies of demand response [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [88] 王媛,周明.居民用户对分时电价的响应潜力评价方法[J].电力建设,2017,38(11):48-54.
- WANG Yuan, ZHOU Ming. Demand response potential evaluation method of time-of-use price for residential community [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(11): 48-54.
- [89] BLOMGREN E M V, EBRAHIMY R, POURMOUSAVI KANI A, et al. Behind-the-meter energy flexibility modelling for aggregator operation with a focus on uncertainty[C]// 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), October 18-21, 2021, Espoo, Finland: 1-6.
- [90] ZIRAS C, HEINRICH C, PERTL M, et al. Experimental flexibility identification of aggregated residential thermal loads using behind-the-meter data [J]. Applied Energy, 2019, 242: 1407-1421.
- [91] WANG K, YIN R X, YAO L Z, et al. A two-layer framework for quantifying demand response flexibility at bulk supply points[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3616-3627.
- [92] QI N, CHENG L, XU H L, et al. Smart meter data-driven evaluation of operational demand response potential of residential air conditioning loads [J]. Applied Energy, 2020, 279: 115708.
- [93] BAI Y, ZHONG H W, XIA Q. Real-time demand response potential evaluation: a smart meter driven method[C]// 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), July 17-21, 2016, Boston, USA: 1-5.
- [94] HU J J, ZHOU H, ZHOU Y H, et al. Flexibility prediction of aggregated electric vehicles and domestic hot water systems in smart grids[J]. Engineering, 2021, 7(8): 1101-1114.
- [95] 朱天怡,艾芊,贺兴,等.基于数据驱动的用电行为分析方法及应用综述[J].电网技术,2020,44(9):3497-3507.
- ZHU Tianyi, AI Qian, HE Xing, et al. An overview of data-driven electricity consumption behavior analysis method and application[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3497-3507.
- [96] 韩啸,张瀚海.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.
- [97] ZENG B, ZHAO D B, SINGH C, et al. Holistic modeling framework of demand response considering multi-timescale uncertainties for capacity value estimation[J]. Applied Energy, 2019, 247: 692-702.
- [98] SONG Z F, SHI J, LI S J, et al. Data-driven and physical model-based evaluation method for the achievable demand response potential of residential consumers' air conditioning loads[J]. Applied Energy, 2022, 307: 118017.
- [99] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering staff report (2006) [EB/OL]. [2023-04-26]. https://cms.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/demand-response_4.pdf.
- [100] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering staff report (2008)

- [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://cms.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/12-08-demand-response.pdf>.
- [101] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering staff report (2009) [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://cms.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/sep-09-demand-response.pdf>.
- [102] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering staff report (2011.2) [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://cms.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/2010-dr-report.pdf>.
- [103] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering staff report (2011.11) [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://cms.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/11-07-11-demand-response.pdf>.
- [104] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering staff report (2012) [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://cms.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/12-20-12-demand-response.pdf>.
- [105] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering staff report (2014) [EB/OL]. [2023-04-26]. https://cms.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/demand-response_3.pdf.
- [106] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering staff report (2015) [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://cms.ferc.gov/media/dec-2015-demand-response>.
- [107] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering staff report (2016) [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://www.ferc.gov/media/2628>.
- [108] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering staff report (2017) [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://www.ferc.gov/media/dram-report2017pdf>.
- [109] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering staff report (2018) [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://www.ferc.gov/media/2621>.
- [110] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering staff report (2019) [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://cms.ferc.gov/media/4120>.
- [111] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering staff report (2020) [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://www.ferc.gov/media/2020-assessment-demand-response-and-advanced-metering>.
- [112] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering staff report (2021) [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://www.ferc.gov/media/2021-assessment-demand-response-and-advanced-metering>.
- [113] HOCH L, CHATTOPADHYAY D, FAZIO J, et al. Assessing the value of demand response in the NEM [EB/OL]. [2023-04-26]. https://www.researchgate.net/publication/355198190_Value_of_Demand_Response_in_the_Australian_National_Electricity_Market_Prepared_for_Australian_IEA_Task_XIII_Team_in_2006.
- [114] The Commission for Energy Regulation. Electricity smart metering customer behaviour trials (CBT) findings report [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://www.cru.ie/wp-content/uploads/2011/07/cer11080ai.pdf>.
- [115] Element Energy Limited. Demand side response in the non-domestic sector [EB/OL]. [2023-04-26]. <http://www.element-energy.co.uk/wordpress/wp-content/uploads/2012/07/Demand-Side-Response-in-the-non-domestic-sector.pdf>.
- [116] Department of Energy and Climate Change. Electricity demand reduction initial impact assessment [EB/OL]. [2023-04-26]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/66214/Electricity_demand_reduction_-_initial_impact_assessment.pdf.
- [117] Puget Sound Energy. Conservation potential assessment (2013) [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://www.pse.com/>.
- [118] STARKE M, ALKADI N. Assessment of industrial load for demand response across U. S. regions of the western interconnect [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub45942.pdf>.
- [119] Sia Partners. Demand response: a study of its potential in Europe [EB/OL]. [2023-04-26]. https://www.sia-partners.com/system/files/document_download/file/2020-06/20141218_Article_DR-potential-in-Europe-1.pdf.
- [120] The Brattle Group. GB electricity demand—2010 and 2025 initial brattle electricity demand-side model-scope for demand reduction and flexible response [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://www.sustainabilityfirst.org.uk/>.
- [121] 牛津大学环境变化研究所,牛津能源研究所.上海需求响应市场潜力及效益评估[EB/OL].[2023-04-26].<http://www.nrdc.cn/Public/uploads/2016-12-03/5842cbe9e6dc4.pdf>. Environmental Change Institute of Oxford University, Oxford Institute for Energy Studies. Shanghai demand response market potential and benefit assessment [EB/OL]. [2023-04-26]. <http://www.nrdc.cn/Public/uploads/2016-12-03/5842cbe9e6dc4.pdf>.
- [122] 牛津大学环境变化研究所,牛津能源研究所.上海市冬夏季节商用楼宇需求响应潜力后续分析报告[EB/OL].[2023-04-26]. <http://www.nrdc.cn/Public/uploads/2016-12-03/5842cfe9e6dc4.pdf>. Environmental Change Institute of Oxford University, Oxford Institute for Energy Studies. Follow-up analysis report on the demand response potential of commercial buildings in winter and summer in Shanghai [EB/OL]. [2023-04-26]. <http://www.nrdc.cn/Public/uploads/2016-12-03/5842cfe9e6dc4.pdf>.
- [123] Puget Sound Energy. Conservation potential assessment (2017)[EB/OL]. [2023-04-26]. <https://www.pse.com/>.
- [124] LARSEN E M. ECOGRID 2.0 [EB/OL]. [2023-04-26]. <http://www.ecogrid.dk/>.
- [125] POTTER J, STUART E, CAPPERS P. Barriers and opportunities to broader adoption of integrated demand side management at electric utilities [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://emp.lbl.gov/publications/barriers-and-opportunities-broader>.
- [126] VANDETTE J J. Assessment of demand response capability and effectiveness [EB/OL]. [2023-04-26]. <https://www.encyclopedia.com/Assessment%20of%20Demand%20Response%20Capability>

- ility%20and%20Effectiveness.pdf.
- [127] CREG. Respuesta de la demanda estrategia para la mitigación de gases de efecto invernadero [EB/OL]. [2023-04-26]. https://pigccme.minenergia.gov.co/public/uploads/web_documentos/62fb737d7974.pdf.
- [128] 张永伟,朱晋,熊英,等.电动汽车与电网互动的商业前景 [EB/OL]. [2023-04-26]. <http://www.nrdc.cn/Public/uploads/2020-06-02/5ed5f5072dc18.pdf>. ZHANG Yongwei, ZHU Jin, XIONG Ying, et al. Business prospects for electric vehicle-grid interaction [EB/OL]. [2023-04-26]. <http://www.nrdc.cn/Public/uploads/2020-06-02/5ed5f5072dc18.pdf>.
- [129] North American Electric Reliability Corporation. 2020 Summer reliability assessment (2021) [EB/OL]. [2023-04-26]. https://www.nerc.com/pa/RAPA/ra/Reliability%20Assessments%20DL/NERC_SRA_2020.pdf.22.
- [130] 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):7194-7205. XU Zheng, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7194-7205.
- [131] 李姚旺,张宁,杜尔顺,等.基于碳排放流的电力系统低碳需求响应机制研究及效益分析[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2830-2842. LI Yaowang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Mechanism study and benefit analysis on power system low carbon demand response based on carbon emission flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2830-2842.
- [132] 周磊.空调负荷的动态需求响应理论及其应用研究[D].南京:东南大学,2017. ZHOU Lei. Dynamic demand response theory of air conditioning load and its application [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [133] HUANG Q Q, ROOZBEHANI M, DAHLEH M A. Efficiency-risk tradeoffs in electricity markets with dynamic demand response [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 279-290.
- [134] 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.
- [135] 孙宏斌,潘昭光,郭庆来.多能流能量管理研究:挑战与展望 [J].电力系统自动化,2016,40(15):1-8. SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8.
- [136] 范帅,危怡涵,何光宇,等.面向新型电力系统的需求响应机制探讨[J].电力系统自动化,2022,46(7):1-12. FAN Shuai, WEI Yihan, HE Guangyu, et al. Discussion on demand response mechanism for new power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 1-12.
- [137] 孔祥玉,刘超,王成山,等.基于深度子领域自适应的需求响应潜力评估方法[J].中国电机工程学报,2022,42(16):5786-5797. KONG Xiangyu, LIU Chao, WANG Chengshan, et al. Demand response potential assessment method based on deep subdomain adaptation network [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5786-5797.
- [138] 王蓓蓓,胥鹏,王宣元,等.需求响应分布鲁棒建模及其大规模潜力推演方法[J].电力系统自动化,2022,46(3):33-41. WANG Beibei, XU Peng, WANG Xuanyuan, et al. Distributionally robust modeling of demand response and its large-scale potential deduction method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 33-41.
- [139] 孟琰,肖居承,洪居华,等.计及需求响应不确定性的节点负荷准线:概念与模型[J].电力系统自动化,2023,49(13):28-39. MENG Yan, XIAO Jucheng, HONG Juhua, et al. Nodal customer directrix load considering demand response uncertainty: concept and model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 49(13): 28-39.
- [140] 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.
- [141] 付文杰,王喻玺,申洪涛,等.基于拉丁超立方抽样和场景消减的居民用户基线负荷估计方法[J].电网技术,2022,46(6):2298-2307. FU Wenjie, WANG Yuxi, SHEN Hongtao, et al. Residential customer baseline load estimation based on Latin hypercube sampling and scenario subtraction [J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2298-2307.
- [142] TAO P, XU F, DONG Z B, et al. Graph convolutional network-based aggregated demand response baseline load estimation [J]. Energy, 2022, 251: 123847.
- [143] XUAN Z M, GAO X, LI K P, et al. PV-load decoupling based demand response baseline load estimation approach for residential customer with distributed PV system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(6): 6128-6137.

王飞(1973—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:需求响应与虚拟电厂、新能源预测、电力市场与综合能源等。E-mail:feiwang@ncepu.edu.cn

李美颐(1999—),女,硕士研究生,主要研究方向:需求响应潜力评估。E-mail:meiyili@ncepu.edu.cn

张旭东(1974—),男,正高级工程师,主要研究方向:需求侧管理、电力营销数字化。E-mail:zxd@he.sgcc.com.cn

(编辑 鲁尔姣)

Assessment Methods for Demand Response Resource Potential and Their Application and Prospect

WANG Fei¹, LI Meiyi¹, ZHANG Xudong², CHEN Songsong³, LI Kangping⁴, YAO Liangzhong⁵, WANG Junlong²

- (1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Baoding 071003, China;
2. Department of Marketing, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050022, China;
3. Beijing Key Laboratory of Demand Side Multi-Energy Carriers Optimization and Interaction Technique (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China;
4. College of Smart Energy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
5. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The potential assessment of demand response (DR) resources refers to a quantitative estimation of the DR potential for a specific object in a certain period participating in a DR project with an appointed control mode. As a key fundamental issue in DR research, the DR potential assessment plays an important role in many respects, such as the aggregation of flexible resources, the decision-making of market trading and the optimal operation of virtual power plants. Firstly, the research progress of the DR potential assessment is expounded from the aspects of DR potential types, time dimension and spatial dimension of assessment, and thought framework. Meanwhile, the application scenarios of different dimensions of DR potential assessment are analyzed. Secondly, the actual projects of DR potential assessment are summarized, the typical projects are used as examples to highlight the analysis, and the demonstration projects of DR potential assessment at home and abroad are compared and analyzed to estimate the future development direction of the projects in China. Thirdly, the three new types of DR, i.e. the integrated DR, low-carbon DR, and dynamic DR, are introduced, and the application extension of DR potential assessment for new power system is extended on this basis. Finally, the future development directions of DR potential assessment are prospected.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52107103), Key R&D Projects of Xinjiang Uygur Autonomous Region of China (No. 2022B01020-2) and State Grid Corporation of China (No. 5108-202218280A-2-383-XG).

Key words: demand response (DR); potential; assessment; new power system; application

