

空调负荷参与需求响应的激励机制研究

汤卓凡^{1,2}, 王奎^{3,4}, 赵建立^{1,2}, 王开让⁵, 郑庆荣^{1,2}

1. 国网上海市电力公司, 上海 200030;
2. 上海市智能电网需求响应重点实验室, 上海 200030;
3. 国网电力科学研究院武汉能效测评有限公司, 武汉 430074;
4. 国网电力科学研究院有限公司, 南京 210000;
5. 国家电网有限公司, 北京 100052)

摘要: 随着我国“双碳”目标的推进, 新能源大规模接入使得电力系统供需平衡问题日益突出, 空调负荷的需求响应能力是解决该问题的重要手段之一。我国空调负荷参与需求响应的激励机制并不完善, 无法调动用户参与电网互动的积极性。首先, 基于空调负荷特性, 汲取国内外空调负荷参与需求响应的发展经验, 分析我国在空调负荷参与需求响应方面所面临的挑战。然后, 根据电力市场机制完善度、关键技术成熟度和用户接受度3个维度的发展程度, 将空调负荷参与电网灵活互动分为起步阶段、过渡阶段和成熟阶段, 并提出不同阶段面向空调负荷的需求响应激励机制。最后, 针对不同阶段的激励机制提出配套的实施建议。

关键词: 空调负荷; 需求响应; 激励机制; 电力市场; 负荷管理

DOI: 10.19585/j.zjdl.202502003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A study on incentive mechanisms for air-conditioning loads participating in demand response

TANG Zhuofan^{1,2}, WANG Kui^{3,4}, ZHAO Jianli^{1,2}, WANG Kairang⁵, ZHENG Qingrong^{1,2}

1. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200030, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Smart Grid Demand Response, Shanghai 200030, China;
3. State Grid Electric Power Research Institute Wuhan Efficiency Evaluation Company Limited, Wuhan 430074, China;
4. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210000, China;
5. State Grid Corporation of China, Beijing 100052, China)

Abstract: With the advancement of China's dual carbon goals, the large-scale integration of new energy sources has exacerbated the supply-demand balance in power systems. The demand response capability of air-conditioning loads is one of the crucial means for addressing this issue. However, the incentive mechanisms for air-conditioning loads participating in demand response in China are still underdeveloped, limiting user engagement in grid interaction. This paper first analyzes the challenges China faces in this area by examining the characteristics of air-conditioning loads and drawing insights from both domestic and international demand response practices. It then categorizes the stages of air-conditioning loads participating in grid flexibility into initiation, transition, and maturity phases, based on the development levels of electricity market mechanisms, key technologies, and user acceptance. For each stage, different demand response incentive mechanisms are proposed, along with specific implementation recommendations tailored to each phase.

Keywords: air-conditioning loads; demand response; incentive mechanism; electricity markets; load management

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5400-202340383A-2-3-XG)

0 引言

随着“双碳”目标的推进和中国电力体制改革的深入,可再生能源的大规模接入和化石能源的逐步退出带来的电力供需不平衡问题日益突出。由于电力供应波动加剧,电网调度的复杂度也随之提高,电力系统的稳定运行面临前所未有的挑战。在此背景下,有效提升用户侧资源的需求响应能力以提高电力系统的灵活性和稳定性,成为电力系统调度和管理当务之急。其中,空调负荷的需求响应能力提升对电力系统有显著的优化效果。空调负荷具有季节性、日负荷特性,其峰值与电网负荷峰值高度吻合。此外,空调负荷调节方式简单,对用户影响小,且在全社会用电量占比高^[1],具有巨大的调节潜力。

释放空调负荷参与需求响应的潜力,既要提升空调调控技术,又要完善空调负荷参与需求响应的机制。近年来,空调负荷的运行控制技术快速发展,已有诸多文献研究空调负荷的建模方法^[2]、不同控制方式^[3-4]及参与辅助服务市场的调控技术^[5-6]。在参与市场的策略研究方面,许多学者关注空调负荷参与需求响应的潜力^[7-9],尤其是作为用户侧可调资源,与分布式电源及其他可调资源协同参与需求响应的潜力^[10]。在落地应用方面,全球范围内已有多例空调负荷参与需求响应的试点验证^[11-15]。总之,现阶段空调运行控制技术大多处于探索和示范应用阶段。技术创新是制度运行的结果,而制度则是技术创新的动力,因此在推动空调负荷参与需求响应技术发展的同时,迫切需要探索促进空调负荷参与需求响应的激励机制。目前,我国已有许多针对需求响应机制的研究^[16-24],但在已提出的机制中,空调负荷主要作为一般性负荷聚合商参与市场^[25],未充分考虑空调负荷特性,无法最大程度发挥空调负荷的调节潜力。贾乾罡等提出了基于区块链技术的空调负荷用电权分配模式^[26],但未考虑我国电力市场建设现状和空调调控技术发展现状,该模式目前落地难度较大。东南大学周磊等研究了尖峰电价机制中不同类型空调群的负荷响应特性,提出了时段差别化尖峰电价机制等^[27],未考虑其他激励机制。综上所述,已有的空调负荷参与需求响应的

激励机制未充分考虑空调负荷特性、空调调控技术的成熟度以及电力市场发展程度等因素,因此在调动大规模空调负荷参与需求响应方面的效果有限,需要进一步完善和优化。

为解决上述难题,本文综合考虑电力市场发展程度、空调调控技术成熟度和空调用户接受度的不同阶段,构建面向空调负荷参与电网互动的分阶段激励机制体系,并提出差异化阶段性实施建议,以提升大规模空调负荷参与需求响应的积极性。本文首先分析空调负荷的特点及控制模式,汲取国内外空调负荷参与需求响应的发展经验,分析我国空调负荷参与需求响应时面临的挑战。然后,依据电力市场机制的完善程度、关键技术成熟度以及用户接受度的发展水平,对空调负荷参与需求响应的发展过程进行阶段划分,并构建面向空调负荷的需求响应激励机制。最后,针对不同阶段的激励机制,提出相应的实施建议。

1 空调负荷的特点及控制模式

不同用户群体的空调负荷特性存在差异:工业用户空调负荷占比较低,空调设备运行状态不可随意调整,调控潜力有限;居民用户空调负荷量大,且其负荷高峰与电网负荷晚高峰重合度较高,但由于设备使用量大、分散且随机性强,因此调控难度较大;商业用户空调负荷占比高,调控潜力巨大,更适合参与需求响应^[28-29]。我国许多地区夏季空调负荷占比已经超过50%^[30],通过分析图1某商业用户负荷曲线发现,用户空调负荷曲线形状与用电负荷曲线形状接近,均在白天高峰时段达到峰值,因此削减商业空调负荷可有效缓解高峰时段的用电压力。

不同类型空调负荷的控制模式不同,根据实际需求和操作特性,将空调分为开关控制、温度控制和周期性启停控制三类。开关控制响应速度快,可调容量大,调度时间相对较短,适用于秒级电网调控场景;温度控制调度时间长,可调容量较小,适用于小时级电网调控场景;周期性启停控制周期较长,可调节容量大且响应速度快,适用于分钟级和小时级电网调控场景。综上所述,空调负荷具备参与不同时间尺度电网调控的能力,能够为我国电网的稳定运行提供有力支持^[31]。

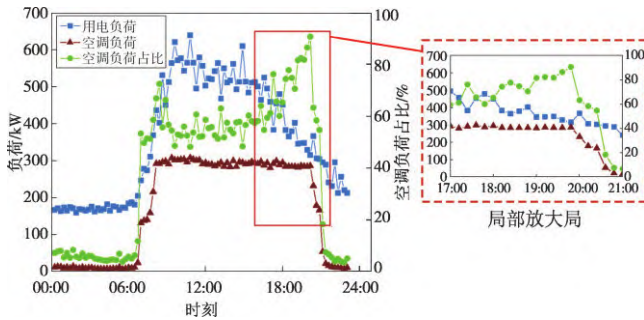


图1 某商业用户夏季高峰典型用电负荷与空调负荷曲线

Fig.1 Curves of typical summer peak loads and air-conditioning loads of a commercial user

2 空调负荷参与需求响应激励机制的现状与挑战

2.1 国内外空调负荷用户参与需求响应现状

为了激励空调负荷参与电网互动,不仅需要推进空调设备改造,提升对其的控制能力,还需要通过完善机制来保障用户可通过调节空调运行方式获利,充分调动用户调节积极性。许多国家已展开了基于控制需求的空调设备改造工程,建立空调负荷监测管理平台,以实现对其的独立监测和统计,并通过项目试点建设推动空调负荷参与电力市场^[32]。

2006年,劳伦斯伯克利国家实验室和加州能源委员会下属的需求响应研究中心在美国太平洋煤气电力公司供电范围内进行了尖峰电价驱动的空调负荷需求响应试点项目,参与用户根据尖峰电价自主设定基于控制系统的响应策略,以降低用电成本^[33]。美国PJM市场中,削减服务提供商通过削减空调负荷参与需求响应市场,截至2023年,空调负荷削减容量占比达6%^[34]。韩国电力公司通过远程管理系统直接控制空调负荷以缓解用电紧张,事后根据负荷削减情况为用户提供响应补贴^[35]。新加坡能源市场管理局和新加坡能源集团计划于2024年下半年启动居民用户需求响应试点项目,通过APP向参与试点项目的居民用户发送负荷削减需求,鼓励用户关闭空调,响应用户将获得补贴。在当前阶段,人们在发掘空调负荷调节潜力的同时,注重用户舒适度。以林肯电气公司为例,该公司在2015年和2016年夏季在内布拉斯加州实施了空调需求响应试点项目,参与试

点的用户安装了Wi-Fi智能恒温器,通过提高高峰时段的室内设定温度和设定启停周期来降低负荷。

在中国,空调负荷参与需求响应的实践应用处于示范阶段,目前空调负荷主要作为一般性用户侧资源参与激励型需求响应。随着分时电价机制执行范围的拓展和技术改造的推进,空调负荷通过价格型需求响应机制参与市场的潜力将被进一步挖掘。国家电网安庆供电公司已建成面向空调用户的分层分区弹性平衡的市级空调负荷控制平台,完成空调整能改造的用户根据需求响应执行情况获得补贴。安徽省印发了《安徽省电力需求响应实施方案(试行)》等文件,鼓励空调负荷参与需求响应。此外,多省份均通过积极推进各项政策实现对空调负荷的有效管理和调控。《上海市经济信息化委关于做好2023年我市电力迎峰度夏工作的通知》强调对商务办公楼宇空调的智能调控和节电监察。江苏省印发了《关于开展迎峰度夏降温负荷节约用电助力电力保供专项行动的通知》,推动负荷资源普查和空调资源建设,并对商业领域空调负荷调控采取技术管控、宣传引导等措施。国网浙江省电力有限公司坚持“政府主导,政企协同”,各级负荷管理中心按照政策规定编制空调负荷调控方案。四川省出台多项空调负荷管理专项政策,建立省、市、县三级负荷管理中心。

2.2 用户参与需求响应机制

总结国内外项目建设与推广经验,空调负荷用户参与需求响应的方式取决于当地需求响应机制^[36-40],如图2所示。

1)激励型需求响应机制。空调负荷用户通过出售高峰时段用电权获得经济补偿或电费折扣。根据响应执行的自主性差异,可分为直接负荷控制、可中断负荷、需求侧竞价和紧急电力需求响应四类。直接负荷控制和可中断负荷模式下,电力公司或服务提供商提前与用户签署协议,可远程控制空调设备,但后者在高峰时段或电网紧急情况下进行,且控制前需征求用户同意,这两类模式更适合对空调设备调节和生产生活影响较小的用户参与。需求侧竞价和紧急电力需求响应模式下,用户可根据市场供需形势和历史出清价格决定是否参与需求响应,这两类模式更适合空调

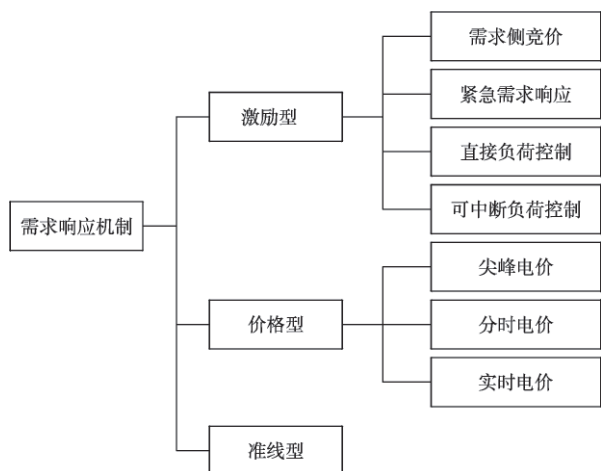


图 2 需求响应机制分类

Fig.2 Classification of demand response mechanisms

设备调节对生产生活影响偏大或不稳定的用户。

2)价格型需求响应机制。空调负荷用户根据各时段的电价,优化空调运行模式,降低用电成本。根据价格引导作用由弱到强,可分为尖峰电价、分时电价和实时电价。通过这一方式参与需求响应的空调负荷用户无需提前签署相关协议,但需对电价有较高敏感性,能够及时获取电价变化信息,并部署对应的智能模块,实现运行模式的优化分析及执行。

3)准线性需求响应机制。由于基于价格和激励的需求响应机制存在难以规模化和常态化的问题,研究者们提出了准线性需求响应机制,以对系统友好的负荷准线作为引导目标和评价标准,引导用户参与需求响应。当前研究提出根据系统节点新能源和刚性负荷等不可调节资源产生的调节需求确定负荷准线。用户对系统的贡献大小取决于其负荷曲线与负荷准线的接近程度,以解决传统需求响应机制难以规模化推广的问题^[41]。由于不同用户资源的非响应负荷曲线与负荷准线的接近程度和调控成本均不相同,空调负荷作为主要的需求响应资源,有必要研究考虑空调调控成本、用户舒适度等因素的准线性需求响应机制。

综上所述,在激励型需求响应机制下,空调负荷用户对于市场需求信息掌握更加及时,电网侧对负荷调控的能力更强。价格型需求响应机制可覆盖更多用户,用户参与市场自主性更高,但需具备一定的市场敏感性,并形成相对成熟的空调运行控制经验。在准线性需求响应机制下,空

调用户无需过多关注实时电价波动,只需根据事先约定的负荷准线来优化自身运行策略,参与门槛相对较低。

2.3 空调负荷参与需求响应面临的挑战

国内外研究和实践已经开始广泛关注空调负荷运行调控技术^[42-43],并推动建立市场机制,引导空调负荷参与电网互动,提高电源投资效率和电网运行可靠性,但具体实施过程往往面临诸多挑战。在中国,主要存在以下三方面需要迫切解决的问题。

1)法规政策及电价机制不完善。中国的电力体制正在经历市场化改革,相关的法规政策尚不完善,缺乏健全成熟的市场体系和运行机制支撑需求响应的实施。在我国,电价通常由政府设定,电价调整周期长,难以反映近期供需形势。因此,如何设计与供需形势匹配的电价机制,激励市场主体参与需求响应是一大挑战。

2)需求响应的技术成熟度不足。通信、能效管理系统及终端等相关技术尚未成熟,难以支撑用户空调负荷的实时采集分析,缺乏准确评估空调负荷的能力。由于难以利用历史空调负荷数据准确估计基线,在需求响应结算环节,结算的准确性和公平性难以保障,难以辨识可能存在的投机行为。因此,如何升级现有基础设施以满足空调的负荷监测、确保电力和通信设施的稳定性以及数据和系统的安全性,是空调负荷参与需求响应实施的第二大挑战。

3)用户需求和接受度低。通过削减空调负荷参与需求响应要求用户改变用电习惯,使用相关新技术,这可能会引发用户的抵触心理。此外,空调用户可能担心参与需求响应会影响舒适度,并产生隐私泄露等问题。因此,如何在满足电力市场需求和保障用户接受度之间找到平衡,也是实施空调需求响应的一项关键挑战。

3 空调负荷参与需求响应的激励机制

总结国内外空调负荷参与需求响应的发展经验、电力市场建设水平和空调运行控制技术应用水平,是空调负荷需求响应激励机制设计的前提和基础。因此,根据不同阶段电力市场环境和技术基础,提出适应不同建设阶段的空调负荷需求

响应激励机制，是激励空调负荷参与电网互动的必经之路。

3.1 设计目标和原则

设计面向空调负荷的需求响应激励机制的目标是激励用户通过调整空调运行方式参与电网互动，以减少高峰时段电网负荷，增加可再生能源利用率，促进能源效率的提高。为保证机制实施的有效性，在机制设计时综合考虑了公平性、经济性、可操作性以及用户友好性等原则。

3.2 空调负荷需求响应的激励机制

随着电力体制改革的推进和电力市场不断完善，空调负荷参与电网灵活互动的方式将逐步从行政手段为主转变为市场化手段为主^[44-45]。这一转变进程受到多重挑战的影响，其中电力市场机制的发展、关键技术的成熟度以及用户接受度最为关键。电力市场机制发展是促进空调负荷参与电网互动关键技术发展的原动力，日益完善的电力市场为空调负荷提供了更加多元化的参与渠道和更为灵活的获益方式，空调负荷参与电网互动的需求将不断提升，从而促进关键技术的加速发展。空调负荷参与电网互动关键技术的成熟为电力市场机制的完善创造条件，如负荷聚合、智能控制、需求响应等关键技术的突破，使得更多类型的空调负荷能够灵活参与电力市场，为电力市场机制的持续完善提供坚实的技术支撑。市场机制和关键技术的协同进步将提升用户接受度，日

臻完善的市场机制将为用户提供更加明确有力的经济激励。同时，智能化技术手段最大限度地保障了用户舒适度，降低参与门槛，极大提升空调用户接受度。综上所述，空调负荷参与电网互动是一个循序渐进、多因素协同推进的过程。因此，本节综合考虑电力市场机制完善度、关键技术成熟度和用户接受度3个维度，将空调负荷参与电网灵活互动分为起步阶段、过渡阶段和成熟阶段，并基于各阶段特征及目标，设计空调负荷参与电网灵活互动激励机制，具体如图3所示。

3.2.1 起步阶段市场机制

在空调负荷参与电网灵活互动的起步阶段：电力市场机制尚不完善，电力市场以中长期交易为主，需求侧资源参与电网互动标准化工作处于起步阶段；空调参与电网互动的关键技术成熟度低，无专门的空调信息采集监测设备支撑空调负荷的监测与分析，空调负荷的可调节潜力分析技术和调控策略技术处于初级阶段，缺乏成熟的技术标准，智能化水平较低；用户接受度低，由于宣传教育不足、缺乏示范项目等原因，用户未建立起通过调整空调运行方式参与电网互动的认识，尤其是居民用户。因此，本阶段的市场机制设计旨在提高集中式工商业空调用户参与电网灵活互动的积极性，鼓励用户开展空调节能改造，使用智能空调或具备响应能力的空调。起步阶段激励机制的特点是以补偿和优惠政策等措施引导用户

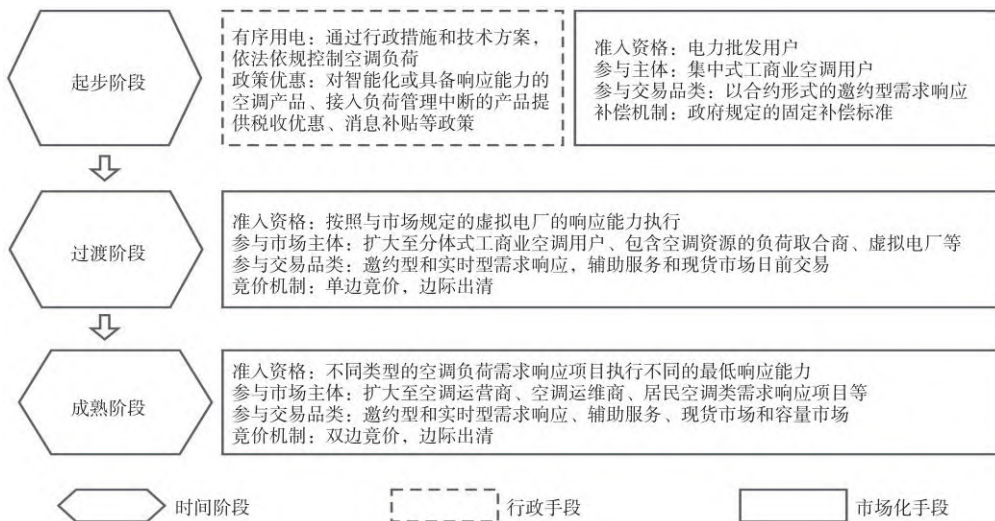


图3 不同阶段的空调负荷参与电网互动的激励机制方案

Fig.3 Incentive mechanisms for air-conditioning loads participating in grid interaction at different stages

通过削减空调负荷参与电网互动,具体参与方式包括:

1)空调负荷参与有序用电,当电力供应紧张时,通过行政措施控制空调负荷。

2)空调负荷参与需求响应,初期主要鼓励集中式工商业空调用户通过削减空调负荷参与固定补偿的邀约型需求响应,政府根据电力系统运行情况,制定削峰类、填谷类需求响应补偿政策,规定需求响应的模式、执行时段和补偿标准。电网公司至少提前一天测算和发布需求响应资源池中各市场主体的基线负荷,发布需求时段、需求容量等信息,电力用户提交相关申报信息。电网公司按照“容量优先”等原则确定需求响应用户,并与各市场主体签订需求响应协议。集中式大型工商业空调用户按照规定在响应时段执行需求响应,并按照固定补偿价格和响应情况进行结算。

3)对智能化或具备响应能力的空调、接入负荷管理终端的空调,实施税收优惠、消费补贴等政策,鼓励用户开展空调改造。

4)制定集中式空调和分体式工商业空调的通信协议、接口等技术标准规范。

3.2.2 过渡阶段激励机制

在空调负荷参与电网灵活互动的过渡阶段:电力市场机制完善度相对较高,电力市场中长期交易、辅助服务市场和现货市场并存,分时电价机制相对完善,需求侧资源参与电网互动的要求和操作流程已基本明确,不同类型空调用户可根据自身负荷特性和用能需求选择差异化的用电价格机制;空调负荷参与电网互动的关键技术成熟度提高,空调参与需求响应的接口逐步实现标准化,初步建成需求响应和负荷管理平台,可实现空调用电信息的单独采集和监测,可调节潜力评估技术和调控策略等已进入示范应用阶段,工商业空调的调控条件优于居民空调用户;用户接受度方面,通过加大宣传力度、创新商业模式等举措,用户熟悉空调参与电网互动的意义及方式,但在舒适性、隐私性等方面的顾虑仍然存在。因此,本阶段市场机制的目标是推动需求响应方式的市场化发展,扩大空调负荷作为需求响应资源在电力市场中的参与度,并持续推动空调智能化技术的升级。

在过渡阶段,空调类需求响应主体以大型工商业空调用户(集中式和分体式)和包含空调资源的负荷聚合商和虚拟电厂等形式为主,其参与的交易品类包括需求响应(邀约型和实时型)、辅助服务和现货市场日前交易。

1)邀约型需求响应的参与流程与起步阶段相同;实时型需求响应的流程与邀约型基本相同,不同点在于交易时段发生在日内且负荷控制增加了直接控制模式。

2)参与辅助服务市场日前交易的流程为:空调类需求响应主体基于电网公司日前发布的各时段调峰辅助服务需求,提交辅助服务的容量范围、调节时段、调节价格等申报信息;电力交易机构综合考虑市场中所有需求响应资源性能和价格等信息,进行边际出清。

3)参与现货市场日前交易的流程为:空调类需求响应主体基于电网公司日前发布的各时段用电曲线,提交执行日响应申报信息,包含削减电力-价格分段曲线、关停费用、执行的最小连续时间长度等信息;电力交易机构考虑需求侧市场主体申报信息及交易限制额度,进行日前市场优化出清,形成分时段出清结果。

上述交易中采用的竞价机制均为单边竞价、边际出清的模式。空调智能化技术的升级方面,制定分体式工商业空调和具备标准化接口的居民空调调控的技术标准规范,便于后续空调负荷大规模接入和调度。

3.2.3 成熟阶段激励机制

在空调负荷参与电网灵活互动的成熟阶段:电力市场机制完善度高,中长期交易、辅助服务、电力现货和容量市场协同运行;空调参与电网互动的关键技术成熟度高,空调状态监测、可调节潜力分析和调控策略等技术成熟,能够实现对空调负荷的精准管理,各类技术与电力市场深度融合;用户接受度高,形成完善的用户服务体系,工商业和居民空调用户的个性化需求得到充分满足,通过智能化手段调整空调运行策略,积极参与电网互动。因此,当前阶段的市场机制设计旨在丰富空调类需求响应主体,完善空调负荷聚合商在辅助服务、现货市场以及容量市场的交易机制,充分发挥空调调节能力。

在成熟阶段,空调类需求响应主体扩大至空调运营商、空调运维商和居民空调类需求响应项目等中小型体量用户,这些主体通过物联网云平台等技术手段,聚合其服务范围内的空调资源,形成规模化的可调节负荷,并以负荷聚合商的身份参与市场。随着空调与电网互动技术的成熟,空调能够支撑秒级、分钟级和小时级别的电网调节需求,参与的交易品类包括邀约型和实时型需求响应、辅助服务、现货市场和容量市场。

空调类需求响应主体参与邀约型和实时型需求响应流程与过渡期相同。由于空调类需求响应主体具备负荷先进预测技术,其在参与辅助服务和现货市场中,能够更新实时运行计划,从仅参与日前交易扩展至参与日内交易,并与所有市场主体共同竞价。随着容量市场的成熟,空调类需求响应主体开始参与容量市场,其流程为:空调类需求响应主体提前进行容量预测和申报,电力交易机构组织拍卖并与中标空调类需求响应主体签订容量合约。除容量市场外,其余交易采用的竞价机制均为双边竞价、边际出清模式。

4 国内空调负荷参与需求响应机制的实施建议

为确保空调负荷在需求响应机制中的有效实施,本文针对各个阶段的激励措施提出以下建议:

1)起步阶段:加强宣传和推广,通过开展针对性的教育活动,提高空调用户对需求响应重要性的认识;推动基础设施建设,鼓励工商业用户安装智能化调控系统,构建空调负荷集中监管平台;支持空调技术创新,促进空调负荷监测与调控技术的研发及试点示范项目;制定集中式空调和分体式工商业空调的通信协议等调控技术标准。

2)过渡阶段:拓展参与需求响应的空调用户群体,培育包含空调资源的需求响应负荷集成商;建立完善的技术标准体系,制定集中式和分体式等不同类型空调数据采集格式和通信协议等技术标准;持续加强基础设施建设和技术创新,推广空调负荷监测和智能调控等技术,研发高度自动化的空调负荷管理系统;构建多元化协作体系,加强政府、电力公司、电力大用户和空调制造商等多方合作,共同推动空调负荷需求响应领域的

发展。

3)成熟阶段:提升参与主体的多样性和广泛性,培育空调运维商、居民空调类需求响应等中小型市场主体;加强商业模式创新,拓展“云云对接”等商业模式,并发展可推广、规模化的空调类需求响应商业模式;强化监管与评估机制,构建动态的空调负荷参与需求响应监管与效果评估体系,指导空调参与需求响应激励机制实施策略的持续优化。

5 结语

本文基于空调负荷的特性和调控方式,通过梳理国内外空调负荷需求响应的发展经验,分析了我国空调负荷参与需求响应激励机制设计与实施面临的挑战。考虑电力市场机制完善度、关键技术成熟度和用户接受度3个维度,设计了适应不同阶段的空调负荷参与需求响应激励机制。在起步阶段,以行政补偿和优惠政策为主,鼓励用户进行空调整能改造,推动智能化空调的普及;在过渡阶段,持续推动空调智能化技术的升级,完善单边竞价、边际出清的竞价机制,推动需求响应方式市场化;在成熟阶段,拓展空调类需求响应主体,完善空调负荷聚合商在辅助服务、现货市场以及容量市场交易机制,采用双边竞价、边际出清的模式,充分发挥空调负荷的调节能力。此外,还提出针对不同阶段需求响应机制建设与实施的相关建议,为我国空调负荷需求响应激励机制的进一步发展和实施提供了有益的参考。

在未来的研究中,将着重探索如下方面:设计空调负荷参与多品类市场协同机制,研究多品类市场价格协同优化及统一结算方法;构建空调负荷用户执行评价体系,并根据评价结果预测空调负荷响应方法;深入探讨空调负荷参与需求响应市场的准入和参与机制。

参考文献

- [1] 孟凯.空调负荷的需求响应机制研究[D].郑州:郑州大学,2018.
MENG Kai. Research on demand response mechanism of air conditioning load [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [2] 宋梦.空调负荷参与电力系统调控关键技术研究[D].南

- 京:东南大学,2018.
- SONG Meng. Research on key technologies of air conditioning loads participating in power system dispatch and control[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [3] 吴桐,惠红勋,张洪财.商业建筑空调系统参与城市电网负荷调控综述[J].中国电力,2023,56(7):1-11.
- WU Tong, HUI Hongxun, Hongcai. Review of commercial air conditioners for participating in urban grid regulation[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 1-11.
- [4] 宿皓.基于负荷不确定性的建筑需求响应优化控制策略研究[D].天津:天津大学,2020.
- SU Hao. Research on building demand response control strategy based on load uncertainty [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [5] 吉用丽.空调负荷参与电网辅助服务关键技术研究[D].南京:东南大学,2022.
- JI Yongli. Research on key technologies of air conditioning loads participating in auxiliary service of power system [D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [6] JI Yongli, XU Qingshan. Frequency regulation support from aggregation of air conditioners based on the trigger value local update strategy [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(16): 3150-3160.
- [7] 张鑫洋,孟庆龙,李辉,等.集中空调系统需求响应潜力分析[J].电力需求侧管理,2023,25(6):57-62.
- ZHANG Xinyang, MENG Qinglong, LI Hui, et al. Analysis of demand response potential of central air-conditioning system [J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(6): 57-62.
- [8] 汤江晖,苏子云,王迎秋,等.考虑5G宏基站空调负荷参与需求响应的潜力分析[J].电力需求侧管理,2022,24(6):77-83.
- TANG Jianghui, SU Ziyun, WANG Yingqiu, et al. Potential analysis of 5G macro base station's air conditioning load participating in demand response [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(6): 77-83.
- [9] 程杰,谢昕怡,杨鑫源,等.需求侧资源聚合参与调峰的双层优化模型研究[J].武汉大学学报(工学版),2024,57(3):338-347.
- CHENG Jie, XIE Xinyi, YANG Xinyuan, et al. Research on two-level optimization model of demand side resource aggregation participating in peak shaving [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 57(3): 338-347.
- [10] 胡志勇,郭雪丽,王爽,等.考虑响应意愿的电动汽车群-空调集群需求响应策略研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(15):109-119.
- HU Zhiyong, GUO Xueli, WANG Shuang, et al. Demand response strategy for electric vehicles and air conditioners considering response willingness [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 109-119.
- [11] 丁胜,徐承美,饶尧,等.楼宇空调需求响应实时控制仿真与实践研究[J].电力需求侧管理,2022,24(6):91-98.
- DING Sheng, XU Chengmei, RAO Yao, et al. Simulation and practice on demand response real-time control of building air conditioning [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(6): 91-98.
- [12] 康靖,李雨桐,郝斌,等.多联机空调柔性负荷参与电力系统需求响应的实证研究[J].供用电,2022,39(8):39-46.
- KANG Jing, LI Yutong, HAO Bin, et al. Empirical study on flexible load of multi connected air conditioning participating in power system demand response [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(8): 39-46.
- [13] 刘衣萍,于鹤洋,王晨旭,等.考虑用户行为的居民空调负荷需求响应[J].浙江电力,2023,42(3):1-8.
- LIU Yiping, YU Heyang, WANG Chenxu, et al. Demand response of residential air conditioning load based on user behavior [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(3): 1-8.
- [14] 张天伟,谢畅,王蓓蓓,等.美国商业建筑空调负荷控制策略及其在自动需求响应系统中的整合应用[J].电力需求侧管理,2016,18(6):60-64.
- ZHANG Tianwei, XIE Chang, WANG Beibei, et al. The commercial building air conditioning load control strategies and its comprehensive application in automated demand response system of the U.S. [J]. Power Demand Side Management, 2016, 18(6): 60-64.
- [15] DA FONSECA A L A, CHVATAL K M S, FERNANDES R A S. Thermal comfort maintenance in demand response programs: a critical review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 141(8): 110847.
- [16] 曾麟,谭娟,向运鲲,等.面向新型电力系统的负荷聚合商功能界定及其需求响应流程[J].科技风,2022,(16):82-84.
- ZENG Lin, TAN Juan, XIANG Yun, et al. Function definition and demand response process of load aggregator for new power system [J]. Technology Wind, 2022, (16): 82-84.
- [17] 文福拴,林鸿基,胡嘉骅.需求响应的商业机制与市场框架初探[J].电力需求侧管理,2019,21(1):4-9.
- WEN Fushuan, LIN Hongji, HU Jiahua. A preliminary investigation on commercial mechanism and market framework for demand response [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(1): 4-9.
- [18] 刘巍峰.新型电力系统的紧急需求响应机制研究[D].扬州:扬州大学,2023.
- LIU Weifeng. Research on emergency demand response mechanism of new power system [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.

- [19] 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, 2019, 33(3):64-71.
- [20] 刘淳,王仕俊,赵燕玲,等.区块链技术在虚拟电厂交易中的应用综述[J].电力建设,2023,44(4):130-144.
LIU Chun, WANG Shijun, ZHAO Yanling, et al. Review of the application of blockchain technology in virtual power plant transactions[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4):130-144.
- [21] 舒征宇,朱凯翔,王灿,等.考虑碳交易的虚拟电厂日前电力市场竞争策略[J].电力工程技术,2024,43(5):58-68.
SHU Zhengyu, ZHU Kaixiang, WANG Can, et al. Virtual power plants participating in day-ahead electricity market bidding strategy considering carbon trading [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(5):58-68.
- [22] 徐慧慧,田云飞,缪猛,等.计及碳交易和需求响应的虚拟电厂低碳经济调度[J].智慧电力,2023,51(8):1-7.
XU Huihui, TIAN Yunfei, MIAO Meng, et al. Low carbon economy dispatch of virtual power plants considering carbon trading and demand response [J]. Smart Power, 2023, 51(8):1-7.
- [23] 刘亚鑫,蔺红.计及碳交易与条件风险值的虚拟电厂竞价策略[J].电力工程技术,2023,42(6):179-188.
LIU Yaxin, LIN Hong. Bidding strategy of virtual power plant considering carbon trading and conditional value at risk[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6):179-188.
- [24] 高建伟,黄宁泊,高芳杰,等.基于改进信息间隙决策理论的考虑决策者风险态度的社区虚拟电厂经济-能源-环境调度策略选择[J].电力建设,2024,45(3):39-57.
GAO Jianwei, HUANG Ningbo, GAO Fangjie, et al. Selection of economics-energy-environment scheduling strategy for a community virtual power plant considering decision-makers' risk attitudes based on improved information gap decision theory [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(3):39-57.
- [25] 杨悦,宋良泰.考虑用户需求响应的空调负荷日前-实时聚合调控[J].全球能源互联网,2023,6(5):529-537.
YANG Yue, SONG Liangtai. Day ahead and real time aggregate regulation of air conditioning load on demand response [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(5):529-537.
- [26] 贾乾罡,陈思捷,严正,等.基于区块链的空调负荷用电权分配:模式与方法[J].中国电机工程学报,2020,40(11):3393-3401.
JIA Qiangan, CHEN Sijie, YAN Zheng, et al. Blockchain-enabled power usage quotas allocation method for air conditioning loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11):3393-3401.
- [27] 周磊,朱明杰,张政,等.针对空调聚合负荷的作用时段差异化尖峰电价机制设计[J].电力需求侧管理,2019,21(3):11-16.
ZHOU Lei, ZHU Mingjie, ZHANG Zheng, et al. Design of progressive time differentiated peak pricing mechanism for aggregated air-conditioning load [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(3):11-16.
- [28] 朱峰.空调负荷需求响应特性及其调控策略研究[D].南京:东南大学,2016.
ZHU Feng. Research on demand response characteristic and control strategy of air conditioning load [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [29] 薛凯.住宅房间空调器使用群体特征及其用能预测方法研究[D].重庆:重庆大学,2022.
XUE Kai. Characteristic of residential room air conditioners usage groups and its energy demand prediction method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [30] 林慧婕,顾琳琳,张宇峰.面向城市楼宇群的温控类柔性负荷优化调度控制方法[J].自动化与仪器仪表,2023(11):150-153.
LIN Huijie, GU Linlin, ZHANG Yufeng. Optimal dispatching control method of temperature control flexible load for urban buildings [J]. Automation & Instrumentation, 2023(11):150-153.
- [31] 姜婷玉,李亚平,江叶峰,等.温控负荷提供电力系统辅助服务的关键技术综述[J].电力系统自动化,2022,46(11):191-207.
JIANG Tingyu, LI Yaping, JIANG Yefeng, et al. Review on key technologies for providing auxiliary services to power system by thermostatically controlled loads [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11):191-207.
- [32] 熊成燕,孟庆龙,奚源.基于交易控制的空调系统电力需求响应策略进展及建议[J].电力需求侧管理,2021,23(06):91-95.
XIONG Chengyan, MENG Qinglong, XI Yuan. Development and suggestions of electricity demand response strategies for air-conditioning systems based on transactive control [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(6):91-95.
- [33] 孔赞,潘棋,王蓓蓓,等.空调自动需求响应控制策略在美国商业建筑中的应用案例分析[J].电力需求侧管理,2017,19(1):60-64.
KONG Yun, PAN Qi, WANG Beibei, et al. The performance analysis of automated demand response control strategies for air conditioning adopted in American com-

- mercial buildings[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(1):60-64.
- [34] MCANANY J. 2023 Demand response operations markets activity report: January 2024 [R]. PJM Demand Side Response Operations, 2023. <https://www.pjm.com/-/media/markets-ops/dsr/2023-demand-response-activity-report.ashx>.
- [35] HWANG H, YOON A, YOON Y, et al. Demand response of HVAC systems for hosting capacity improvement in distribution networks: a comprehensive review and case study[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 187:113751.
- [36] 李彬, 陈京生, 李德智, 等. 我国实施大规模需求响应的关键问题剖析与展望[J]. 电网技术, 2019, 43(2):694-704. LI Bin, CHEN Jingsheng, LI Dezhi, et al. Analysis and prospect of key issues in China's demand response for further large scale implementation [J]. Power System Technology, 2019, 43(2):694-704.
- [37] 杨旭英, 周明, 李庚银. 智能电网下需求响应机理分析与建模综述[J]. 电网技术, 2016, 40(1):220-226. YANG Xuying, ZHOU Ming, LI Gengyin. Survey on demand response mechanism and modeling in smart grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1):220-226.
- [38] 祁琪, 石富岭, 陈宋宋, 等. 居民负荷参与电力系统调控关键技术综述与展望[J]. 电网技术, 2024, 48(2):809-818. QI Qi, SHI Fuling, CHEN Songsong, et al. Review and prospect of key technologies for residential loads participating in power system dispatch and control [J]. Power System Technology, 2024, 48(2):809-818.
- [39] 赵晓东, 王娟, 邓良辰, 等. 电力市场化改革下我国需求响应价格形成机制研究[J]. 价格理论与实践, 2024(2):142-147. ZHAO Xiaodong, WANG Juan, DENG Liangchen, et al. Study on the price formation mechanism of demand response under the electricity market reform in China [J]. Price: Theory & Practice, 2024(2):142-147.
- [40] 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.
- [41] 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, 47(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, 47(13):28-39.
- [42] 陆旦宏, 李思琦, 杨婷, 等. 中央空调负荷精细化调控双层优化技术研究[J]. 电力需求侧管理, 2024, 26(1):23-30. LU Danhong, LI Siqi, YANG Ting, et al. Research on refined regulation for two-layer optimization technology of central air-conditioning load [J]. Electric Power Demand Side Management, 2024, 26(1):23-30.
- [43] 石坤, 李德智, 杨斌, 等. 面向市场化的智能楼宇互动调控技术[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3):114-120. SHI Kun, LI Dezhi, YANG Bin, et al. Market oriented interactive control technology for intelligent building [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3):114-120.
- [44] CORBIN C D, MAKHMALBAF A, HUANG S, et al. Transactive control of commercial building HVAC systems[R]. Richland WA, USA: Pacific Northwest National Laboratory, 2016.
- [45] RAMDASPALLI S, PIPATTANASOMPORN M, KUZLU M, et al. Transactive control for efficient operation of commercial buildings[C]//2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe). Ljubljana, Slovenia: IEEE, 2016:1-5.

收稿日期: 2024-05-20; 修回日期: 2024-06-25

作者简介:

汤卓凡(1993), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为负荷管理、需求侧管理、虚拟电厂等。

(本文编辑: 方明霞)