

能源互联网背景下电能替代负荷的应用展望与思考

李洪涛¹, 万宇翔², 程 林², 郭艳飞²

(1. 国家电网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075;
2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京 100084)

摘要: 电能替代技术综合经济优势不明显是其推广的重要障碍之一,而能源互联网利用先进的前沿信息技术及控制技术,实现电、气、热等多种能量需求与供给侧的灵活双向互动,可实现用户侧增量价值的挖掘。因此,能源互联网的建设赋予了电能替代负荷新的应用思路。本文针对能源互联网发展背景下电能替代负荷参与综合需求响应展开深入分析和总结,调研了国内外电能替代技术的发展现状并给出了其推行障碍的几点思考,介绍了能源互联网中应对电能替代负荷接入问题的新途径,总结了电能替代负荷参与综合需求响应的基本实施方式;并对可调潜力分析建模、优化策略、效益评估、支撑平台等关键技术进行总结,给出了未来进一步的研究方向,以期为我国电能替代负荷应用及能源互联网的发展提供参考。

关键词: 电能替代负荷; 能源互联网; 综合需求响应

DOI: 10.12067/ATEEE1808059 **文章编号:** 1003-3076(2019)11-0046-14 **中图分类号:** TM715

1 引言

随着化石能源趋于枯竭、环境不断恶化,传统能源消费结构已经成为制约经济发展的重要因素^[1]。在新的一轮能源革命进程中,人们不得不更多关注规模化的可再生能源发展,但其出力存在着不确定性、间歇性等特点,能源消纳也面临着巨大挑战^[2]。为此,亟需寻找更多新的解决方案调整能源消费结构,减少化石能源使用并促进清洁能源的发电消纳。

“电能替代”战略是指将以煤炭、天然气等化石能源作为直接终端能源消耗的形式转化成消耗优质高效的电能,可有效提高清洁的二次能源(电能)在终端能源消费的比重^[3]。随着我国电力改革逐步深入,电能替代的实施推进也得到了高度重视。国务院印发的《大气污染防治行动计划》明确指出要加快清洁能源对化石能源的替代和利用,推广使用地源热泵、冷热电三联供等高效用能技术;《关于推进电能替代的指导意见》和《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》进一步丰富了电能替代的

内涵,指出实施过程中应综合考虑电力体制改革、能源系统智能化等因素的影响,并将电能替代的主要对象明确为散烧煤用户。

目前,电能替代主要从“以电代煤”和“以电代油”两方面开展^[4]。在电能替代的实施过程中,为满足电能替代后的用电需求,通常需要配套改造供电设施。“以电代油”的电动汽车负荷需要配套建设大量充电桩,“以电代煤”的供暖负荷则势必需要投入大量热泵等清洁采暖设备,一次性投入及后续用电成本居高不下^[5]。但这些新型负荷的需求特性显然与传统负荷存在差别,如电动汽车能够与电网实现双向互动,热泵、电锅炉面向的暖负荷由于自身的热存储特性,也可以根据激励调节用电需求。随着配电网智能化水平逐步提升,这些具有一定柔性调节能力的负荷均可参与系统的运行控制^[6,7]。利用这些规模化电能替代负荷创造后期运行的增量价值,有利于平衡电能替代的发展需求目标与经济效益目标。

能源互联网是一个以电力系统为核心,以可再

收稿日期: 2018-08-31
基金项目: 国家自然科学基金项目(51777105)、国家电网公司总部科技项目“适应电能替代规模化应用的配电网建设改造关键技术研究”(5202011600U2)
作者简介: 李洪涛(1975-),男,北京籍,教授级高级工程师,硕士,从事电力系统自动化和电网技术的研究和管理;
万宇翔(1995-),男,江西籍,硕士研究生,主要研究方向为负荷可调潜力分析、可靠性分析(通讯作者)。

生能源为主要一次能源,与天然气网络、热力网络等紧密耦合而形成的复杂多能流系统^[8],已得到国内外的广泛关注和研究。美国早在 2001 年就提出了能源集成系统发展计划,并通过国会立法要求新建和改造用户侧供能项目^[9];欧盟是最早提出综合能源系统概念并付诸实施的地区,先后在第五、第六和第七框架下对其予以重点和持续资助^[10];中国仅 2017 年就公示了 55 个能源互联网示范项目,其中面向用户多种能源需求的能源互联网项目占 12 个^[11]。能源互联网可利用先进的前沿信息技术及控制技术,实现电、气、热等多种能源需求与供给侧的灵活互动^[12],充分发挥各类能源形式的互补优势和协同效益,创造增量价值。因此,如何在能源互联网背景下,深入挖掘规模化接入的电能替代负荷可调特性,实现资源的协调运行控制,促进可再生能源的出力消纳,对“电能替代”战略和能源互联网的协同推进和发展有着重要的意义。

本文针对能源互联网背景下电能替代负荷的应用问题对现有研究进行综述。首先综述并分析了现有电能替代的发展现状以及实施过程中的问题,然后阐述了能源互联网中综合需求响应(Demand Response, DR)技术对电能替代负荷应用带来的推动和契机,并总结了电能替代负荷参与综合需求响应涉及的关键技术问题,最后针对电能替代负荷应用过程中存在的若干问题进行了探讨,以期为后续的研究工作提供参考。

2 电能替代技术研究现状与实施障碍

本节主要对国内外有关电能替代负荷应用的研究与实践情况进行了总结,并分析了当前电能替代推行过程中面临的障碍,以及能源互联网引入后给电能替代负荷应用带来的新发展契机。

2.1 国内外电能替代研究现状

2.1.1 国外情况

美国是最早开展电能替代工作的国家,2008 年开始就陆续成立了新能源汽车的专项计划,大力推动电动汽车充电桩的建设,对安装充电设施的企业或个人进行补贴,开展“以电代油”的电能替代战略,并通过对消费终端负荷的需求响应来获得电能替代的效益^[4]。由于美国电力市场发展较为成熟,智能电网建设水平较高,已早早开展了对于各类负荷的需求响应控制来挖掘负荷侧的可调特性,创造增量价值。例如南加州爱迪生电力公司(Southern

California Edison, SCE)将工商业用户的蓄冷空调运行分为多个档位,并给予对应的补偿价格;艾克西尔能源公司(Xcel Energy, XE)建立实时电价项目,利用各类能效管理和需求响应项目来对用户的空调、热水器、冰箱等负荷进行远程控制,实现用电曲线的优化。

亚洲地区在“以电代油”方面成果较为突出的是日本电动汽车的发展,其新能源汽车的销量占全世界销量的 90%以上,政府也大力扶持推广充电桩的建设^[13]。欧洲对于电能替代方面的研究主要集中在发展清洁的供暖技术,最具代表性的是热泵市场的发展。英国的热泵技术发展相对成熟,在 2012 年出台了相关的热泵扶持政策,热泵市场的增长速度最高达 21%。欧洲学者也围绕空气源热泵、地源热泵等负荷特性展开了大量研究^[14,15]。

2.1.2 国内情况

煤炭是我国主要的消费能源,作为我国北方地区冬季采暖的主要一次能源,其燃烧时产生的污染气体是造成冬季雾霾的主要原因,“以电代煤”是解决这一难题的有效途径之一^[16]。目前,电能替代项目正在京津冀的农村地区广泛开展,主要通过地源热泵、空气源热泵、电蓄热锅炉以及电热膜四种方式对原有的燃煤供暖模式进行取代^[17]。北京城区供电公司从 2003 年以来,一直在推进“煤改电”的建设改造工程,并形成了相关的技术原则,有效指导北京范围内电采暖方式的进一步推广。

而对于“以电代油”战略的推进,由于我国电动汽车发展相较欧美国家较晚,保有量较少,主要集中在关键技术的攻关以及控制系统开发等方面。目前大量的基础设施建设已在多个省份地区展开,在北京地区,截止 2017 年已建 800 余座充电站,并自主研发了兼顾电网安全与智能服务的电动汽车有序充电控制管理系统,成功实现了充电桩体的实时有序调控^[18]。

2.2 当前电能替代技术推行障碍与发展契机

虽然电能替代能有效优化能源结构,规模化的电能替代负荷接入也为新能源的出力消纳提供了途径,但电能替代的发展速度仍旧较为缓慢,具体原因可以归结为以下几点^[16-20]:

(1) 电能替代项目的实施伴随着配电网建设改造,电能替代技术的综合经济优势不明显。一方面,我国电能替代项目的实施多集中在农村和城郊地区,这类地区配电网较为薄弱,供电长线路在接入电

采暖和电动汽车这类负荷后,会严重影响电能质量,配电网面临着改造升级的压力;同时,如电采暖等设备的使用存在季节性周期,非采暖季设备利用率低,投资成本较高。另一方面,能源价格政策有待完善,电采暖的用电总价相比直接使用天然气、煤供暖偏高,如在河北省的电价环境下,电采暖费用高于集中供暖费用的30%^[20],导致用户的接受意愿较低。

(2) 规模化电能替代负荷的接入对配电网的供电能力要求大幅提升,现有电力调度调整裕度有限,电网运行压力过大。电能替代的实施会导致用电负荷持续增长,使局部的供需矛盾进一步加深。例如电采暖负荷、电动汽车充电负荷具有功率大、刚性强且时间集中的特点,一旦与现有负荷高峰时段重叠,可能会引起局部配电网的阻塞。此外,可再生能源出力的波动性及反调峰特性也会进一步增大电网峰谷差,需要进一步丰富电网调度运行的调节手段。

(3) 电能替代战略涉及新的控制管理技术,现有支撑技术不够完善,使得部分电能替代项目的推行缺乏一定的可操作性。如“以电代油”的电动汽车存在着基数大、分布广的特点,并且由于储能技术存在的壁垒,导致充电速率受限,充电桩的选址定容存在较大困难。此外,大规模的电能替代负荷的集中启动会对电网产生过大的冲击,需要有先进的计量、通信和控制技术为有序用电、优化调控等策略的实施提供支撑。

综上所述,要进一步推动电能替代的发展,应当充分调动电能替代负荷的可调特性,改进运行控制技术,引导电能替代负荷参与电网运行调控以创造更大的效益,从而弥补配电网建设改造的巨大投入。

能源互联网的建设为解决上述问题带来了新的契机。实际上,电力长期有效存储的技术经济壁垒是可再生能源难以消纳、电网高峰时段运行压力大的重要因素之一。而能源互联网打破了供电、供气、供热/冷独立规划和运行的格局,利用气、热系统的惯性将电力转化成其他形式的能源存储,极大地丰富了电能替代负荷优化调控的手段,将有效改善整个能源系统的运行经济效益;同时,多种能源的统筹考虑可以在更大范围内实现资源优化配置,可一定程度降低系统冗余备用,提高设施利用率;最后,在能源互联网中,各类能源服务商和能量转化设备运营商往往可以对用户侧分散的电能替代负荷进行集中管理,也为可控资源参与需求响应提供了渠道以及动力。

3 能源互联网发展对电能替代负荷应用的推动

能源互联网的建设将有效挖掘电能替代负荷的应用潜力,本节将具体分析能源互联网中存在的电能替代负荷及可应用于协调控制的可控资源,总结分析能源互联网中电能替代负荷参与系统调控的基本方式以及层次架构。

3.1 能源互联网中电能替代的物理基础

多能互补系统是能源互联网的物理基础,典型的能源互联网组成如图1所示,包含电气、电热、气热等多种能源耦合环节,多代理技术将被广泛应用于对这些分布式能源的控制,各类设备和负荷都可由能源服务商直接进行整合管理。

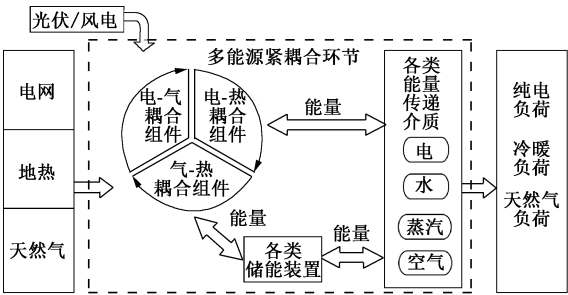


图1 典型的能源互联网多能源系统
Fig.1 Representative multi-energy physical system of Energy Internet

实际上,能源互联网中存在着许多的电能替代技术,典型的技术应用如表1所示。不难看出,电能替代技术多被应用于多能源系统的电热耦合环节或作为单纯的电负荷。

表1 能源互联网中典型的电能替代技术

Tab.1 Typical electric energy substituting technology in Energy Internet			
电能替代技术	能源耦合环节	替代对象	替代途径
蓄热电锅炉	电热耦合	燃煤锅炉	以电代煤
电炊具	电热耦合	燃煤锅炉	以电代煤
分布式电采暖	电热耦合	燃气锅炉	以电代气
热泵	电热耦合	燃气锅炉	以电代气
电水泵	电负荷	油泵	以电代油
电窑炉	电热耦合	燃油窑炉	以电代油
电动汽车	储能装置/电负荷	燃油汽车	以电代油

这些技术不仅能有效实现能源间的相互替代,还能够促进可再生能源的消纳。例如热泵是一种冷暖兼备的节能性空调系统,可高效地从空气、水或地下热源中吸收热能,提供给用户消耗或存储^[21],由

于热的天然存储特性,能有效利用间歇性的电力供应^[22]。蓄热电锅炉则通常以新能源发电系统作为电源,可以将电能转化成热能,并通过蓄热介质进行能量的存储与释放,可有效应对新能源出力的波动^[23]。电动汽车作为一种典型的可双向互动的新型负荷,合理的控制策略可以用来缓解分布式太阳能等新能源发电所造成的供电质量问题^[24]。

能源互联网中还存在其他能源耦合设备,如电转气技术^[25,26]、冷热电三联供技术^[27]、燃气轮机^[28,29]、压缩空气储能装置^[30]等,这些设备虽然不属于电能替代技术,但是能够针对多种用能需求,进行灵活能源供应和互补转换,对大规模电能替代负荷接入后的灵活调控提供了更多的控制途径与方法^[31]。例如电转气技术可以将常常被废弃的可再生能源出力转化成人造天然气的形式加以储存,在电能替代负荷集中启动时再利用,并且能够充分利用现有天然气管道和储气设备,具有良好的经济性^[32]。多样化的储能方式丰富了能量存储的形式和手段,能节约储能设备的投资成本,有助于实现电能替代负荷的友好并网。

3.2 能源互联网中电能替代负荷参与调控的途径

需求响应技术是一种先进的负荷侧资源管理技术,是指通过价格信号或者激励机制引导负荷用户对电网调度指令做出相应响应,从而参与到电力系统的实时平衡调控中^[33-35]。电能替代负荷多属于电热耦合环节或电动汽车这类可调负荷,是理想的需求响应资源,通过参与需求响应项目,能充分挖掘负荷的可调特性及应用价值^[36]。传统的DR技术主要针对单一能量载体系统(电力系统),但柔性负荷是否参与系统调度往往取决于用户的意愿。

在能源互联网中,多能源系统可以实现多种能源的转换、分配与有机协调,各类能源通过不同的耦合环节相关联,能量产生、转换、分配、传递的过程手段和形式丰富多样,也为需求响应提供了更多的调控方式。有文献提出可以进一步将用户对冷、热等多种能源的需求纳入广义需求侧资源的范畴中,形成能源互联网环境下的综合需求响应(Integrated Demand Response, IDR)^[37],文献[38]对IDR的概念以及关键问题进行了阐述,文献[39]中给出了一种考虑电能替代的综合需求响应方案。

目前电能替代负荷参与综合需求响应主要有以下几种途径^[40,41]:

(1)从负荷用户的角度来看,主要是利用电能

替代负荷自身的热、气供应惯性,合理调整用户自身的用电计划,例如将能源消耗从峰时段转移到谷时段或通过有序用电适当削减,以缓解电能供应压力,如电动汽车^[24]、热泵^[42]、集中式蓄冷空调^[43]等。

(2)从能量供应的角度来看,综合需求响应可以拓展到不同能源载体间的相互替代和转换,使用户等效地具备某类能源的需求响应能力,如在天然气价格较高的时段,用户可选择放弃燃气锅炉供暖而直接使用电锅炉供暖等,此时无需调整自身的用能需求,降低了对用户舒适度产生的影响,只需改变消费能源类型,利用能源之间的替代来缓解某类能源的供应压力。

(3)同时结合供能侧能源类型调整和负荷侧自身的可调潜力参与需求响应。

3.3 电能替代负荷参与综合需求响应的层次架构

参与综合需求响应的主体主要可以分为三层,如图2所示。顶层为系统操作者,包括综合能量管理调度中心、交易中心等;中间层为顶层主体提供各类需求响应项目,主要包括各种综合能源服务商,可以是独立的大型负荷聚合商、设备代理,也可以是集成了各类分布式资源的虚拟电厂;底层为执行需求响应项目的主体,包括各类参与响应的电能替代负荷集群以及各类能源转换设备。

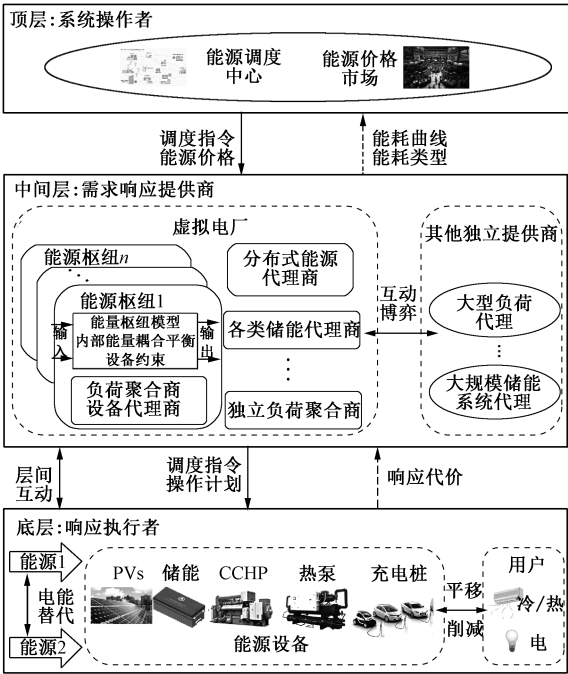


图2 综合需求响应的互动层次架构
Fig.2 Hierarchical structure of IDR interaction

其中,虚拟电厂可以对多个分布式能源进行协

调优化运行,更有利于资源的合理优化配置及利用^[44]。这里的分布式能源可以是分布式发电机组、分布式储能设备,也可以是用户侧的需求响应资源。由于虚拟电厂更多强调的是整体的集成效果以及产生的经济效益,并且无需进行过多的网架改造,因此可以与电网公司、市场交易中心形成更好的互动,降低分布式能源并网造成的不利影响,提高了系统运行的稳定性^[45]。

3.4 综合能源市场化对电能替代负荷的积极影响

综合能源服务是实现能源互联网的重要途径之一,在当前深化电力体制改革的背景下,电力企业加快向综合能源服务转型。电网企业可以广泛运用云计算、大数据技术,售电业务上游承载发电、输配电、分布式等供给端,下游承接工商业、居民、园区等多维度客户,可掌握海量电力大数据资源,充分了解用户形式多样的能源诉求,为用户定制创新的综合能源解决方案。同时,随着储能、电动汽车、热泵等电能替代技术的发展和普及,电力用户以电能替代负荷为载体,和电网企业实现良性互动,供能侧与用能侧通过大数据和云计算分析平台智能交互,供能侧基于数据分析为用户量身设计用能方案,同时响应用户侧各种用能诉求。从而实现综合能源服务的不断创新迭代,产生新的商业价值,进一步推动电能替代负荷的发展。

4 电能替代负荷参与综合需求响应的关键技术

本节针对电能替代负荷参与综合需求响应过程中所涉及的关键技术,从模型基础、优化策略、支撑技术以及综合效益评估四个方面进行综述总结。

4.1 建模与可调潜力分析

4.1.1 运行设备可调潜力分析

对电能替代负荷的运行和调节特性进行建模分析是参与综合需求响应的前提,需要充分考虑多种能源在转化方法和需求特性上的差异性以及能源转化设备的可调特性^[46]。文献[47]采用黑箱法分析空气源热泵和地源热泵负荷特点和热容特性。国内关于电能替代负荷特性的研究较少,文献[48]引入灰色关联度分析方法对影响负荷特性变化的因素进行了定量分析,给出了对负荷特性的变化影响较大的因素。其他研究多从其经济性出发,研究其应用价值^[49]。电能替代负荷参与需求响应的效果量化指标方面,文献[50]讨论了用户基本负荷的计算原

则与方法,分析了绝对值法与相对指标法评价用户响应性能的方法。文献[51]研究了基于室内外温差的变频空调基线计算方法,量化空调用户参与需求响应的效果。

通常,多能源耦合环节中关键的能量耦合组件可分为电-热耦合元件、电-气耦合元件以及气-热耦合元件,某典型的多能源物理系统组成如图3所示。

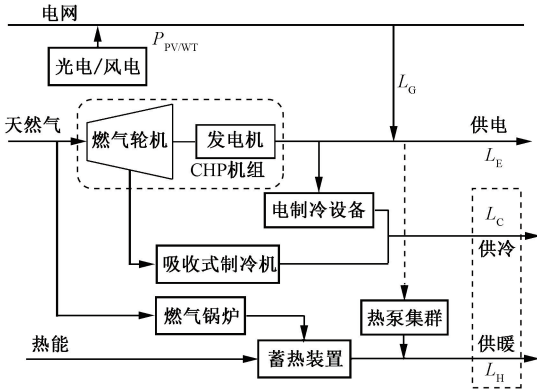


图3 典型的多能源物理系统组成

Fig.3 Typical multi-energy physical system

在多能源系统中,大量文献针对各类大型的能源转化设备运行特性分析展开研究,如热电联产(CHP)机组运行特性^[52,53]、电锅炉^[23,54]、蓄热装置^[55]等。对于单个大型设备而言,其工作特性约束相对较为简单。但对于一些由分散负荷聚合而成的集群模块,如热泵负荷集群需要需求响应,其可调特性分析则涉及建模、控制策略、控制模式等多方面的问题^[56]。

对于热泵这类温控型负荷建模,主要包含两部分内容:①建立室内温度与制冷(热)量的模型,需要充分考虑建筑物内、外部环境等因素,得到温控负荷所属建筑物的热力学模型^[57,58];②构建温控负荷的能耗模型,需要充分分析设备内部电热转化机理^[59,60]。最终综合两部分得到负荷的室温与电功率的关系。此外,热泵负荷分布范围广,单个热泵的功率调节显得微不足道,需要建立聚合模型,通常根据设备的功率差别^[56]、可关断时间^[61],设置温度^[62]等参数作为决策对象,常采用的聚合技术有K-means聚类^[56,61]、模糊聚类^[63]等低维聚合算法、蒙特卡洛模拟法^[64]、Fokker-Planck方程组^[65]等方法。

4.1.2 能量枢纽模型

针对图3所示的复杂多能源耦合系统,除了需要考虑各个耦合环节自身的运行特性,综合需求响

应还关注能源之间的耦合等效关系。能源枢纽 (Energy Hub, EH) 通过定义一个转换矩阵来描述多能源系统中不同能量载体的分配、转换和存储过程, 是研究多能源系统中多种能源载体之间交互关系的有效建模方法^[66]。

实际上, 无论耦合环节的结构多么复杂, 都需要以某种形式的能源输入, 转化成为某种形式的能源输出。能量枢纽构建的关键环节即是利用耦合矩阵 C 来描述多能源系统输入到输出的函数关系, 具体的数学表达式为:

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $P_i (i=1, 2, \dots, m)$ 和 $L_j (j=1, 2, \dots, n)$ 分别为各类输入、输出能源量大小; c_{ij} 为耦合因子, 表示第 i 种形式能源输入与第 j 种形式能源输出的比值。除此之外, 文献[67]根据能量传递介质的类型, 将电、气、热等各种能源介质定义成集中母线, 耦合环节中各类设备与集中母线之间存在着一定的能量流动关系。根据各设备在能量转化过程中发挥的作用进行分类, 以此为基础可以得到耦合环节的能量通用架构。

通过构建能量虚拟母线来描述各类能源耦合元件的结构及能量转化关系, 再利用标准化矩阵的构建, 最终可将通用架构中复杂的能量耦合关系等效成为一个输入输出转换模型, 如图 4 所示。考虑各设备特性以及能量传输特性, 能量枢纽模型将更为精确^[68]。

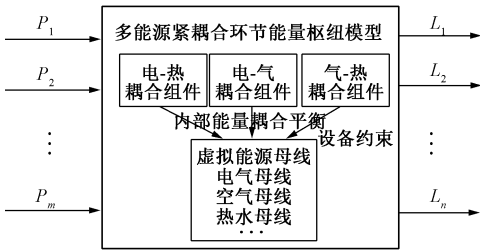


图 4 能源枢纽示意图

Fig.4 Schematic of energy hub

4.2 协调控制与互动策略

在整个综合需求响应执行过程中, 根据图 2 的互动决策架构, 需求响应的协调控制和优化策略也可以主要分为三个阶段。

4.2.1 负荷集群响应控制策略

首先是底层各个模块的运行优化策略, 其中较为复杂的是电能替代负荷的集群控制策略, 典型研究包括热泵负荷集群^[56]、电动汽车充电站^[69]。大型的负荷集群可以直接通过独立的负荷聚合商参与到系统调控, 也可以作为虚拟电厂的集成模块间接参与。现常用的调控策略通常包括直接负荷控制 (Direct Load Control, DLC)、需求侧竞价 (Demand Side Bidding, DSB) 和可中断负荷 (Interruptible Load, IL) 三种^[70]。

以我国目前北方煤改电工程最典型的电能替代负荷热泵为例, 这类温控负荷参与需求响应目前使用最广泛的控制策略为直接负荷控制, 热泵 DLC 方案又可分为开关控制^[71-73]和温度控制^[56, 62]。开关控制的决策变量一般为空调的开关状态, 根据不同的开关状态组合优化达到调控的目标。周期性暂停控制^[61]是一种特殊的开关控制方式, 根据用户的舒适度设置温度带, 改变运行温度上下限, 使得空调处在一个周期性启停的运行状态。文献[73]针对这种控制策略完善了一种基于排序的控制模型, 也被称为轮停控制, 这种控制方式较适合负荷聚合商针对聚合均匀的热泵负荷群展开控制^[74]。

温度控制通常改变热泵室内设置温度, 每一种温度对应一个耗电功率, 根据系统的运行状态来调节热泵设置温度大小, 达到灵活调控的目的。文献[62]为聚合均匀的温控负荷集群建立了双线性状态空间模型, 将其温度设定点作为控制输入信号, 实现了良好的功率跟踪。

上述热泵负荷参与需求响应的控制策略中, 决策模型的目标函数一般以负荷削减量^[61]、最大化负荷聚合商收益^[62, 74]等为主, 约束条件包括负荷平衡、控制时间约束、温度调节范围、用户满意度等。以控制时间约束为例说明, 假设用户要求室温不超出范围 $[T_{\min}, T_{\max}]$, 最大温度范围下的启停周期为 $\tau_c = \tau_{\text{on}} + \tau_{\text{off}}$, 则可以将温度约束转化成各个负荷群的启停时间约束, 即第 i 个负荷群的连续开启时间 τ_{on}^i 和连续关停时间 τ_{off}^i 需要满足以下约束:

$$\tau_{\text{off}}^i(t) \leq \tau_{\text{off}} \quad (2)$$

$$\frac{\sum_{k=0}^t \tau_{\text{on}}^i(k)}{\sum_{k=0}^t \tau_{\text{off}}^i(k)} \geq \frac{\tau_{\text{on}}}{\tau_{\text{off}}}, \quad \sum_{k=0}^t \tau_{\text{off}}^i(k) \neq 0 \quad (3)$$

式中, $\tau_{\text{on}}^i(t)$ 表示第 i 个负荷群在 t 时刻连续开启的时间; $\tau_{\text{off}}^i(t)$ 表示第 i 个负荷群在 t 时刻连续关断的时间。 $\tau_{\text{on}}^i(0)$ 、 $\tau_{\text{off}}^i(0)$ 需要根据每个负荷群的初始状态确定。针对这种复杂的优化模型,可采用混合整数线性规划 (Mixed Integer Linear Programming, MILP)^[75] 以及各类启发式算法^[74]。

4.2.2 基于能量枢纽的综合需求响应优化策略

第二阶段是整合电能替代负荷以及其他能源设备资源后,各类需求响应提供者内部的协同优化,如智能住宅这种分布式能源站^[76],这类系统可以通过构建能量枢纽来分析各类设备资源之间的能量转换关系。通过能量枢纽内的能源转化过程,用户不仅可以价格激励或其他奖励调整用能负荷,还可以在不改变需求的前提下,通过调整能源生产及转换方式,使用户等效地具备需求响应的能力。而各个能量枢纽之间的协同可以通过虚拟电厂这类集成性代理来控制^[78]。

现有研究主要围绕能源枢纽内部的需求响应潜力分析^[46,76,77] 和优化运行^[79-82] 展开。在可响应潜力分析方面,文献[68]考虑了电锅炉这类电能替代设备,结合 CHP 机组及光伏发电装置,分析了这类家庭小型供能系统的综合需求响应能力。文献[46]研究了多能源系统的可移峰负荷的概念,建立多能源系统移峰潜力评价解析化模型,评估了多能源系统不同移峰深度下的成本及效益。在优化运行方面,文献[79]建立了多能源系统综合需求响应的随机性模型,考虑了环境温度、热水消耗及电力系统备用成本的不确定性模型,提出一种综合能源系统响应系统不平衡量的控制方法。文献[82]研究了考虑能量转换、储存和需求侧管理的单个能源枢纽的优化运行方案,借助蒙特卡洛模拟方法计算能源中心在输入输出端的能源载体价格不确定情况下的优化调度方案。文献[80,81]则对多能源系统的经济调度问题进行建模和求解。各类文献中,考虑综合需求响应后的优化模型通常可抽象成如下形式:

$$\begin{cases} \min f(P_{e,t}, H_{e,t}, G_{e,t}, P_t) \\ \text{s.t.} \\ P_{e,t} + W_{e,t} + P_t = L_{e,t} + \Delta L_{e,t} \\ H_{e,t} + H_{e,t} = L_{h,t} + \Delta L_{h,t} \\ G_{e,t} + G_{e,t} = L_{g,t} + \Delta L_{g,t} \\ g(W_{e,t}, H_{e,t}, G_{e,t}) \leq 0 \\ h(\Delta L_{e,t}, \Delta L_{h,t}, \Delta L_{g,t}) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $P_{e,t}$ 、 $H_{e,t}$ 和 $G_{e,t}$ 分别为 t 时刻流入系统的电功

率、热功率以及燃气量; $W_{e,t}$ 、 $H_{e,t}$ 和 $G_{e,t}$ 分别为 t 时刻系统内部的能量转化; P_t 为新能源发电出力; $L_{i,t}$ ($i=e, h, g$) 分别为 t 时刻电能、热能和天然气的刚性需求; $\Delta L_{i,t}$ ($i=e, h, g$) 分别为相应参与综合需求响应的电能、热能和天然气需求; 不等式 g 和 h 分别代表元件运行特性约束以及需求响应大小的上下限约束。

4.2.3 考虑 IDR 的虚拟电厂调度优化策略

第三阶段是虚拟电厂或代理商与调度中心的顶层优化,两者之间可通过双边交易或集中竞价形式,签订需求响应合同,实现日前调度计划的优化^[44]。

传统的虚拟电厂主要针对各类发电机组、储能设备的协同运行展开^[83],也有文献对于考虑不确定性需求响应资源的虚拟电厂调度运行展开研究。文献[42]提出了考虑用户舒适约束的聚合家居温控负荷的控制策略的虚拟电厂模型,为系统提供旋转备用。文献[84]对由电动汽车、可控负荷等分布式能源组成的虚拟电厂进行聚合管理,以提供频率控制等功能。

对于考虑综合需求响应的虚拟电厂研究相对较少,实际上,考虑综合需求响应的虚拟电厂优化运行本质上是对多个能源枢纽的协调控制。文献[85,86]基于非合作博弈理论,研究多个能源枢纽之间的相互作用,以天然气、电力价格为能源枢纽中综合需求响应的引导,并采用分布式算法求解,但未考虑终端的灵活负荷的调节。文献[87]为住宅型能源枢纽的能量管理系统设计了一种适用于参与竞争性电力市场的算法,通过调整电负荷和热负荷曲线,实现最小化运行成本及不舒适度。文献[88]利用能量枢纽同时调整电能和天然气的消耗,将需求响应的概念扩展到综合需求响应,并采用非合作博弈理论对综合需求响应项目实施下的智能能源中心之间的互动进行建模研究。如若进一步扩展到多个虚拟电厂之间的协同调度问题,优化策略的制定就转变成典型的机组组合问题。

4.3 综合需求响应支撑技术

目前,需求响应需要有高级量测系统、先进的通信系统和信息数据平台等服务技术支撑^[39]。其中,构建能源信息数据服务平台,能够有效完成能量管理、协同优化,是实现综合需求响应服务功能的有效途径。

统一的数据平台能够有效集成优化能源业务及服务功能,实现分散式的电能替代负荷灵活接入以

荷参与需求响应控制策略的实施,最重要的前提就是基线负荷预测,代理商只有根据基线负荷才能衡量具体的可调潜力。现有针对基线负荷预测的研究较少,多采用拟合回归的思想确定负荷曲线^[94,95]。如何基于电采暖、电动汽车等电能替代负荷的渗透率、时空分布特性,建立配电网电能替代负荷的梯级聚合模型,获取基线负荷有待进一步深入地研究。

(3) 电能替代负荷规模化应用的响应策略与机制研究。规模化电能替代负荷的接入,将带来峰值负荷的大幅提高。同时在能源互联网背景下有着丰富的能量转化手段,响应策略如何结合各类能源之间的互补特性,构建更适用于规模化电能替代负荷接入的激励机制和电价引导机制,实现系统的优化运行控制,以达到新能源消纳、削峰填谷、资产利用率提升、供电能力提升等目的,是综合需求响应实施的价值所在。

(4) 支撑电能替代负荷规模化应用的电网改造技术。为满足大规模电能替代的增容需求以及支撑需求响应的通信控制需求,需要进行配电网新建或升级改造,包括供电能力提高、网络结构完善、智能控制系统安装等方面。升级改造的策略和技术方法既要满足供电能力和可靠性的要求,同时造价水平应在可承受范围。

6 结论

电能替代的成功推广一方面需要政府的大力支持,通过各类扶持政策及补贴,推动技术市场的发展;另一方面能源公司也应充分发挥市场的作用,引导日益增长的电能替代负荷参与系统的调控,建立一系列的增值服务,从用户层面挖掘更多的价值。能源互联网发挥各类能源形式之间的互补优势和协同效益,创造增量价值。本文针对能源互联网背景下电能替代负荷的应用进行了展望。通过对现有电能替代的发展现状及实施障碍进行分析,阐述了能源互联网中综合需求响应技术给电能替代负荷应用带来的新契机,并对综合需求响应的基本概念和关键技术进行了分析总结。最后给出了对电能替代负荷参与综合需求响应的现行问题的思考,可为今后电能替代负荷应用的相关工作提供一定的参考。

参考文献 (References):

[1] 白建华, 辛颂旭, 刘俊, 等 (Bai Jianhua, Xin Songxu, Liu Jun, et al.). 中国实现高比例可再生能源发展路径

研究 (Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (14): 3699-3705.

[2] 刘吉绩 (Liu Jiji). 大规模新能源电力安全高效利用基础问题 (Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (16): 1-8.

[3] 国家电网公司 (State Grid Corporation). 国家电网公司2015年全面深入推进电能替代行动计划 (The action plan of State Grid Corporation to comprehensively promote the electric energy alternative in 2015) [Z]. 北京: 国家电网公司 (Beijing: State Grid Corporation), 2015.

[4] 国际电能替代经验 (International experience in electric energy substitution) [J]. 国家电网 (State Grid), 2013, (10): 54-55.

[5] 孙毅, 许鹏, 单葆国, 等 (Sun Yi, Xu Peng, Shan Baoguo, et al.). 售电侧改革背景下“互联网+”电能替代发展路线 (Road map for “Internet Plus” energy substitution in electricity retail market reform in China) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2016, 40 (12): 3648-3654.

[6] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等 (Yao Jianguo, Yang Shengchun, Wang Ke, et al.). 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架 (Concept and research framework of “source-grid-load” interactive operation and control) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2012, 36 (21): 1-6.

[7] 孙国强, 李逸驰, 卫志农, 等 (Sun Guoqiang, Li Yichi, Wei Zhinong, et al.). 智能用电互动体系构架探讨 (Discussion on interactive architecture of smart power utilization) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 39 (17): 68-74.

[8] 程林 (Cheng Lin). 能源互联网理念与实践 (The concept and practice of Energy Internet) [J]. 供用电 (Distribution & Utilization), 2017, 34 (2): 11-13.

[9] National Renewable Energy Laboratory. Energy systems integration facility [EB/OL]. <http://www.nrel.gov/esif/>. 2018-03-15.

[10] European Commission. Horizon 2020 - Societal challenges: Secure, clean and efficient energy [EB/OL]. <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/>. 2014-03-28.

[11] 国家能源局 (National Energy Board of China). 国家能源局公布首批智慧能源 (能源互联网) 示范项目的通知 (Notice of the first batch of smart energy (Energy Internet) demonstration project) [EB/OL]. <http://zfxgk.nea.gov.cn/auto83/>. 2017-06-28.

- [12] 倪琳娜 (Ni Linna). 能源互联网环境下需求响应资源协调优化及相关问题研究 (Research on coordination optimization of demand response resources and related issues in Energy Internet environment) [D]. 杭州: 浙江大学 (Hangzhou: Zhejiang University), 2017.
- [13] 王冠 (Wang Guan). 发电侧与用电侧参与电能替代的效益分析与优化研究 (Benefit analysis and optimization research on power generation side and power side participating in energy substitution) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2017.
- [14] Alejandro N E, Pierluigi M. Probabilistic modeling and assessment of the impact of electric heat pumps on low voltage distribution networks [J]. Applied Energy, 2014, 127: 249-266.
- [15] Wiryadinata S, Modera M, et al. Technical and economic feasibility of unitary, horizontal ground-loop geothermal heat pumps for space conditioning in selected California climate zones [J]. Energy & Building, 2016, 42: 127-132.
- [16] 张云 (Zhang Yun). 电能替代走清洁、环保、可持续发展之路 (Energy substitution: Clean, environmentally friendly, sustainable development) [J]. 国家电网 (State Grid), 2013, 9 (2): 36-40.
- [17] 曾欢 (Zeng Huan). 京津冀农村地区电能替代的技术经济分析及政策研究 (Technical and economic analysis and policy research on electric energy substitution in rural areas of Beijing, Tianjin and Hebei) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2017.
- [18] 杨延志 (Yang Yanzhi). 北京地区电动汽车充电站项目设计优化问题研究 (Research on design optimization of electric vehicle charging station project in Beijing) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2014.
- [19] 郭炳庆, 沈瑜, 钟鸣, 等 (Guo Bingqing, Shen Yu, Zhong Ming, et al.). 电能替代技术应用的商业模式 (Business models for promotion of electric power substitution technology) [J]. 中国电力 (Electric Power), 2018, 51 (9): 1-7.
- [20] 全志强 (Tong Zhiqiang). 河北南网实施电能替代相关问题研究 (Research on the implementation of electric energy substitution in Hebei south network) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2016.
- [21] Huo Da, Liu Yinghan, Gu Chenghong, et al. Optimal flow of energy-hub including heat pumps at residential level [A]. 2015 50th International Universities Power Engineering Conference [C]. 2015. 1-5.
- [22] 荆树春, 朱群志, 张静秋, 等 (Jing Shuchun, Zhu Qunzhi, Zhang Jingqiu, et al.). 光伏光热一体化装置与热泵结合系统的影响因素分析 (Analysis of influencing factors for a hybrid photovoltaic/thermal and heat pump system) [J]. 可再生能源 (Renewable Energy Resources), 2013, 31 (6): 1-4.
- [23] 李李佳, 胡林献 (Li Jiajia, Hu Linxian). 基于二级热网电锅炉调峰的消纳弃风方案研究 (Research on accommodation scheme of curtailed wind power based on peak-shaving electric boiler in secondary heat supply network) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39 (11): 3286-3291.
- [24] Cheng L, Yao C, Renle H. Mitigating voltage problem in distribution system with distributed solar generation using electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6 (4): 1475-1484.
- [25] Clegg S, Mancarella P. Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas (P2G) on electrical and gas transmission networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6 (4): 1234-1244.
- [26] Giulio G, Stefano C, Matteo C R. Power-to-gas plants and gas turbines for improved wind energy dispatchability: Energy and economic assessment [J]. Applied Energy, 2015, 147: 117-130.
- [27] Wang Jiangjiang, Jing Youyin, Zhang Chunfa. Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm [J]. Applied Energy, 2010, 87 (4): 1325-1335.
- [28] Xu X, Jia Hongjie, Chiang H D, et al. Dynamic modeling and interaction of hybrid natural gas and electricity supply system in microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30 (3): 1212-1221.
- [29] 王成山, 马力, 郭力 (Wang Chengshan, Ma Li, Guo Li). 微网中两种典型微型燃气轮机运行特性比较 (Comparison of operation characteristics between two types of microturbines in microgrid) [J]. 天津大学学报 (Journal of Tianjin University), 2009, 42 (4): 316-321.
- [30] 杨承, 王旭升, 张驰, 等 (Yang Cheng, Wang Xusheng, Zhang Chi, et al.). 太阳能与压缩空气耦合储能的燃气轮机 CCHP 系统特性 (Performances of gas turbine-based CCHP system combined with solar and compressed air energy storage) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (18): 5350-5358.
- [31] 朱永强, 赵娜, 王福源, 等 (Zhu Yongqiang, Zhao Na, Wang Fuyuan, et al.). 能源互联网中多种储能的协调 (Energy storage coordination among various energy net-

- works in Energy Internet) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (3): 10-16.
- [32] Stephen C, Pierluigi M. Storing renewables in the gas network: Modelling of power-to-gas seasonal storage flexibility in low-carbon power systems [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10 (3): 566-575.
- [33] Palensky P, Dietrich D. Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7 (3): 381-388.
- [34] Farrokh R, Ali I. Demand response as a market resource under the smart grid paradigm [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1 (1): 82-88.
- [35] 王蓓蓓, 李扬, 高赐威 (Wang Beibei, Li Yang, Gao Ciwei). 智能电网框架下的需求侧管理展望与思考 (Demand side management outlook under smart grid infrastructure) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2009, 33 (20): 17-22.
- [36] 肖安南, 张蔚翔, 张超, 等 (Xiao Annan, Zhang Weixiang, Zhang Chao, et al.). 需求侧响应下的微网源-网荷互动优化运行 (Optimal interactive operation of microgrid under demand response) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (9): 71-79.
- [37] Aras S, Mohammad R, Shahab B, et al. Integrated demand side management game in smart energy hubs [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6 (2): 675-683.
- [38] 曾鸣, 武庚, 李冉, 等 (Zeng Ming, Wu Geng, Li Ran, et al.). 能源互联网中综合需求侧响应的关键问题及展望 (Key problems and prospects of integrated demand response in Energy Internet) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2016, 40 (11): 3391-3398.
- [39] 艾芊, 郝然 (Ai Qian, Hao Ran). 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战 (Key technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2018, 42 (4): 2-11.
- [40] Pazouki S, Haghifam M R. Optimal planning and scheduling of energy hub in presence of wind storage and demand response under uncertainty [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2016, 89 (1): 219-239.
- [41] Rezaei N, Kalantar M. Smart microgrid hierarchical frequency control ancillary service provision based on virtual inertia concept: An integrated demand response and droop controlled distributed generation framework [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 92 (1): 287-301.
- [42] Dan W, Parkinson S, Miao W, et al. Online voltage security assessment considering comfort-constrained demand response control of distributed heat pump systems [J]. Applied Energy, 2012, 96 (3): 104-114.
- [43] He H, Borhan M S, Kameshwar P, et al. Aggregate flexibility of thermostatically controlled loads [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30 (1): 189-198.
- [44] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等 (Wei Zhinong, Yu Shuang, Sun Guoqiang, et al.). 虚拟电厂的概念与发展 (Concept and development of virtual power plant) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2013, 37 (13): 1-9.
- [45] 刘思源, 艾芊, 郑建平, 等 (Liu Siyuan, Ai Qian, Zheng Jianping, et al.). 多时间尺度的多虚拟电厂双层协调机制与运行策略 (Bi-level coordination mechanism and operation strategy of multi-time scale multiple virtual power plants) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 2 (5): 753-761.
- [46] Pierluigi M, Gianfranco C. Real-time demand response from energy shifting in distributed multi-generation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4 (4): 1928-1938.
- [47] Alejandro N E, Pierluigi M. Probabilistic modeling and assessment of the impact of electric heat pumps on low voltage distribution networks [J]. Applied Energy, 2014, 127: 249-266.
- [48] 霍成军 (Huo Chengjun). 电力系统负荷特性分析研究 (Analysis of power system load characteristics) [D]. 天津: 天津大学 (Tianjin: Tianjin University), 2007.
- [49] 孙勇, 严干贵, 郑太一, 等 (Sun Yong, Yan Gangui, Zheng Taiyi, et al.). 电力市场背景下蓄热式电采暖消纳弃风的经济性分析 (Economic analysis of electrical heating with heat storage using grid integrated wind power) [J]. 储能科学与技术 (Energy Storage Science and Technology), 2016, 5 (4): 532-538.
- [50] 赵鸿图, 朱治中, 于尔铿 (Zhao Hongtu, Zhu Zhizhong, Yu Erkeng). 电力市场中用户基本负荷计算方法与需求响应性能评价 (Demand response performance evaluation and basic load calculation method for customers in electricity market environment) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2009, 33 (19): 72-78.
- [51] 丁小叶 (Ding Xiaoye). 变频空调参与需求响应的调控策略与效果评估 (The strategy for the inverter air conditioners participating in demand response and effect evaluation) [D]. 南京: 东南大学 (Nanjing: Southeast University), 2016.
- [52] 程耀华, 张宁, 康重庆, 等 (Cheng Yaohua, Zhang

- Ning, Kang Chongqing, et al.). 低碳多能源系统研究框架及展望 (Prospects of low-carbon electricity) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (14): 4060-4069.
- [53] Chen Xinyu, Kang Chongqing, O'Malley Mark, et al. Increasing the flexibility of combined heat and power for wind power integration in China: modelling and implication [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2015, 30 (4): 1848-1857.
- [54] 吕泉, 姜浩, 陈天佑, 等 (Lv Quan, Jiang Hao, Chen Tianyou, et al.). 基于电锅炉的热电厂消纳风电方案及其国民经济评价 (Wind power accommodation by combined heat and power plant with electric boiler and its national economic evaluation) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 38 (1): 6-12.
- [55] 徐飞, 闵勇, 陈磊, 等 (Xu Fei, Min Yong, Chen Lei, et al.). 包含大容量储热的电-热联合系统 (Combined electricity-heat operation system containing large capacity thermal energy storage) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (29): 5063-5072.
- [56] He H, Sanandaji M B, Poolla K, et al. Aggregate flexibility of thermostatically controlled loads [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30 (1): 189-198.
- [57] Lu N. An Evaluation of the HVAC load potential for providing load balancing service [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (3): 1263-1270.
- [58] Molian A, Gabaldon A, Fuentes J A, et al. Implementation and assessment of physically based electrical load models: Application to direct load control residential programs [J]. IET Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2013, 150 (1): 61-66.
- [59] Hao H, Corbin D C, Kalsi K, et al. Transactive control of commercial buildings for demand response [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32 (1): 774-783.
- [60] Lin Y, Barooah P, Meyn S, et al. Experimental evaluation of frequency regulation from commercial building HVAC systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6 (2): 776-783.
- [61] 徐青山, 吴泉, 杨斌 (Xu Qingshan, Wu Xiao, Yang Bin). 考虑状态差异性聚类的空调负荷直接负荷控制动态优化方法 (Dynamic optimization method of direct load control for air-conditioning load considering status diversity clustering) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2016, 40 (14): 33-42.
- [62] Hu J, Cao J, Yong T, et al. Demand response load following of source and load systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25 (5): 1586-1598.
- [63] 楼家辉, 杨欢, 王京, 等 (Lou Jiahui, Yang Huan, Wang Jing, et al.). 考虑异质性的定频空调负荷聚合建模及功率跟踪策略 (Constant frequency air conditioning load aggregated modeling and its power tracking strategy considering heterogeneity) [J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2017, 38 (11): 55-64.
- [64] 李娜, 褚晓东, 张文, 等 (Li Na, Chu Xiaodong, Zhang Wen, et al.). 考虑参数空间差异的多区域空调负荷聚合模型 (Aggregation model of multi-zone air conditioning load considering spatial differences of parameters) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EP-SA), 2012, 24 (5): 19-24.
- [65] Malhame R, Chong C Y. Electric load model synthesis by diffusion approximation of a high-order hybrid-state stochastic system [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1985, 30 (9): 854-860.
- [66] Geidl M, Koeppl G, Favre P P, et al. Energy hubs for the future [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5 (1): 24-30.
- [67] 王成山, 洪博文, 郭力, 等 (Wang Chengshan, Hong Bowen, Guo Li, et al.). CCHP 冷热电联供微网优化调度通用建模方法 (A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power micro-grid) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (31): 26-33.
- [68] Liu M, Shi Y, Fang F. Optimal power flow and PGU capacity of CCHP systems using a matrix modeling approach [J]. Applied Energy, 2013, 102: 794-802.
- [69] Cheng L, Chang Y, Wu Q, et al. Evaluating charging service reliability for plug-in EVs from the distribution network aspect [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5 (4): 1287-1296.
- [70] 宋梦, 高赐威, 苏卫华, 等 (Song Meng, Gao Ciwei, Su Weihua, et al.). 面向需求响应应用的空调负荷建模及控制 (Modeling and controlling of air-conditioning load for demand response applications) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2016, 40 (14): 158-167.
- [71] Wai H C, Beaudin M, Zareipour H, et al. Cooling devices in demand response: A comparison of control methods [J]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2015, 6 (1): 249-259.
- [72] 周磊, 李扬, 高赐威 (Zhou Lei, Li Yang, Gao Ciwei). 聚合空调负荷的温度调节方法改进及控制策略 (Improvement of temperature adjusting method for aggregated air-conditioning loads and its control strategy) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34

- (31): 5579-5589.
- [73] Lu N, Chassin P D. A state-queueing model of thermostatically controlled appliances [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (3): 1666-1673.
 - [74] 高赐威, 李倩玉, 李扬, 等 (Gao Ciwei, Li Qianyu, Li Yang, et al.). 基于 DLC 的空调负荷双层优化调度和控制策略 (Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (10): 1546-1555
 - [75] Asensio M, Delgado M G, Contreras J. Bi-level approach to distribution network and renewable energy expansion planning considering demand response [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32 (3): 4298-4309.
 - [76] Patteeuw D, Bruninx K, Arteconi A, et al. Integrated modeling of active demand response with electric heating systems coupled to thermal energy storage systems [J]. Applied Energy, 2015, 151: 306-319.
 - [77] Salimi M, Ghasemi H, Adelpour M, et al. Optimal planning of energy hubs in interconnected energy systems: A case study for natural gas and electricity [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9 (8): 695-707.
 - [78] Ruiz N, Cobelo I, Oyarzabal J, et al. A direct load control model for virtual power plant management [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24 (2): 959-966.
 - [79] Good N, Karangelos E, Espinosa N A, et al. Optimization under uncertainty of thermal storage-based flexible demand response with quantification of residential users' discomfort [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6 (5): 2333-2342.
 - [80] Bahrami S, Safe F. A financial approach to evaluate an optimized combined cooling, heat and power system [J]. Energy & Power Engineering, 2013, 5 (5): 352-362.
 - [81] Moeini-Aghtaie M, Abbaspour A, Fotuhi-Firuzabad M, et al. A decomposed solution to multiple-energy carriers optimal power flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29 (2): 707-716.
 - [82] Kienzle F, Ahcin P, Andersson G. Valuing investments in multi-energy conversion, storage, and demand-side management systems under uncertainty [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2 (2): 194-202.
 - [83] Shropshire D, Purvins A, Papaioannou I, et al. Benefits and cost implications from integrating small flexible nuclear reactors with off-shore wind farms in a virtual power plant [J]. Energy Policy, 2012, 46: 558-573.
 - [84] Galus D M, Koch S, Andersson G. Provision of load frequency control by PHEVs, controllable loads, and a co-generation unit [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (10): 4568-4582.
 - [85] Sheikhi A, Rayati M, Bahrami S, et al. A cloud computing framework on demand side management game in smart energy hubs [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 64: 1007-1016.
 - [86] Bahrami S, Sheikhi A. From demand response in smart grid toward integrated demand response in smart energy hub [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7 (2): 650-658.
 - [87] Kamyab F, Bahrami S. Efficient operation of energy hubs in time-of-use and dynamic pricing electricity markets [J]. Energy, 2016, 106: 343-355.
 - [88] Sheikhi A, Bahrami S, Ranjbar A M. An autonomous demand response program for electricity and natural gas networks in smart energy hubs [J]. Energy, 2015, 89: 490-499.
 - [89] Mistry D K, Roy R. Impact of demand response program in wind integrated distribution network [J]. Electric Power Systems Research, 2014, 108: 269-281.
 - [90] Macedo M N Q, Galo J J M, de Almeida L A L, et al. Demand side management using artificial neural networks in a smart grid environment [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 128-133.
 - [91] Miara A, Tarr C, Spellman R, et al. The power efficiency: Optimizing environmental and social benefits through demand side management [J]. Energy, 2014, 76: 502-512.
 - [92] Krause T, Andersson G, Frohlich K, et al. Multiple-energy carriers: Modeling of production, delivery, and consumption [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99 (1): 15-27.
 - [93] Kou Y N, Zheng J H, Li Z, et al. Many-objective optimization for coordinated operation of integrated electricity and gas network [J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2017, 5 (1): 350-363.
 - [94] 张良杰 (Zhang Liangjie). 电力系统柔性负荷的建模与控制策略研究 (Research on modeling and control strategy of power system flexible load) [D]. 南京: 东南大学 (Nanjing: Southeast University), 2016.
 - [95] 林兼 (Lin Jian). 台区负荷特性分析及基线负荷预测研究 (Analysis of power load characteristic in transformer areas and a study on baseline load forecasting) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2017.

Outlook and thought of application of electric energy substituting loads under background of Energy Internet

LI Hong-tao¹, WAN Yu-xiang², CHENG Lin², GUO Yan-fei²

(1. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The comprehensive economic advantage of electric energy substituting technology is not obvious, which is one of the important obstacles to its promotion. The Energy Internet (EI) can realize the flexible interaction between various energy demand and supply via advanced technology to create incremental value on the user side. Hence, the EI can introduce new ideas to the application of electric energy substituting loads. This paper analyzes the integrated demand response (IDR) of energy substituting load under the background of the EI. The development status of energy substitution and some thoughts on its obstacles are given. The new way to deal with the problem of energy substitution is introduced. Basic concept of IDR and the technical route for energy substituting loads to participate in IDR are given. In addition, some key technologies such as adjustable potential analysis, optimization strategy, benefit evaluation and support platform are summarized. Finally, some directions for future researches are given to provide some suggestions for the application of energy substituting loads and the EI in China.

Key words: energy substituting loads; Energy Internet; integrated demand response