



以可再生能源为主的多能互补集成应用 现状及发展研究

李海玲^{1*}, 吕 芳², 王一波¹, 胡润青³, 张昕宇⁴, 石文辉⁵, 张占奎⁵

(1. 中国科学院太阳能热利用与光伏系统重点实验室, 中国科学院电工研究所, 北京 100190;

2. 北京计科电可再生能源技术开发中心有限公司, 北京 100190; 3. 国家发展与改革委员会能源研究所, 北京 100038;

4. 中国建筑科学研究院, 北京 100013;

5. 中国电力科学研究院有限公司新能源与储能运行控制国家重点实验室, 北京 100192)

摘 要: 梳理了国内外现有的与多能互补相关的政策与商业模式, 并针对我国具有大规模发展潜力的大型综合能源基地类和终端集成一体化类(产业园区、城镇/农村、大型公共建筑)多能互补集成应用类型的适用范围和推广障碍进行了分析, 重点从源、网、荷、储的角度研究了每类应用类型的配置原则, 最后从政策环境、价格机制、商业模式、管理机制等方面提出措施建议。

关键词: 可再生能源; 多能互补; 冷热电联供; 措施

中图分类号: O59

文献标志码: A

0 引言

发展可再生能源已成为全球能源转型及实现应对气候变化目标的重大战略举措。全球能源转型的基本趋势是实现化石能源体系向低碳能源体系的转变, 最终进入以可再生能源为主的能源可持续时代。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)、国际能源署(IEA)和国际可再生能源署(IRENA)等机构的报告均指出, 发展可再生能源是实现应对气候变化目标的重要措施。为此, 许多国家提出了以发展可再生能源为核心内容的能源转型战略, 联合国气候变化《巴黎协定》签约国中90%以上的国家都设定了可再生能源发展目标, 欧盟及美国、日本、英国等发达国家都把发展可再生能源作为温室气体减排的重要措施^[1]。在我国中央财经领导小组第六次会议上, 习近平总书记发表重要讲话时强调, 要着力发展非煤能源, 形成煤、油、气、核、新能源、可再生能源多轮驱动的能源供应体系, 必须通

过比目前更有力的举措实施推动, 切实实现可再生能源的持续规模化增速开发和经济性提升。

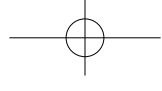
“十二五”期间, 我国可再生能源的利用水平大幅提高, 多项技术的应用规模位居全球首位。截至2015年底, 全国水电装机容量为3.2亿kW^[1], 风电、光伏发电并网装机容量分别为1.29亿kW^[1]和4318万kW^[1], 太阳能热利用面积超过4.0亿m^[1], 应用规模全都位居全球首位。全部可再生能源发电量达1.38万亿kWh^[1], 约占当年全社会用电量的25%^[1]; 全部可再生能源发电量中, 非水可再生能源发电量的占比为5%^[1]。生物质能继续向多元化发展, 各类生物质能的年利用量约为3500万tce^[1]。

可再生能源大规模应用是我国能源发展的必经之路。随着可再生能源, 尤其是光伏发电和风电技术在国内的大规模应用, 虽然其装机规模得到大幅提升, 但整体发展也遇到了严重挑战。1)

收稿日期: 2019-11-21

基金项目: 国家重点研发计划“风电场、光伏电站生态气候效应和环境影响评价研究”(2018YFB1502805); 国家电网公司总部科技项目“未来电网前瞻技术布局研究”(NYB17201800314)

通信作者: 李海玲(1978—), 女, 博士、高级工程师, 主要从事可再生能源政策及光伏衰减机理方面的研究。lihaijing@mailieac.cn



可再生能源的大型发电基地出现严重的弃水、弃风、弃光现象。可再生能源发电大规模并网仍存在技术障碍，可再生能源电力的全额保障性收购政策难以有效落实，导致大型发电基地的弃水、弃风、弃光现象严重^[1]。以风电为例，2016年风电的发电量为2410亿kWh，而弃风电量为497亿kWh，弃风率达17%，部分地区如甘肃，弃风率更是高达43%。2)终端应用侧的分布式应用市场发展缓慢，可再生能源应用的规模和比例提高困难。分布式应用一直是我国可再生能源应用大力发展的方向，其可就地生产、就近消纳，但受限于资源有限、融资困难、缺乏商业模式等因素，其发展低于预期。以光伏发电为例，截至2016年底，分布式光伏发电累计装机容量占光伏发电总累计装机容量的比例仅达到13%。

多能互补可因地制宜地将多种能源通过组合应用来缓解能源供需矛盾，并可通过大量使用的可再生能源促进生态环境良性循环。多能互补集成应用系统就是将多种能源输入、多种产品输出、多重能量转换单元融于一体的复杂能量系统，尤其在可再生能源大规模发展的今天，其对可再生能源的消纳和输送具有重大意义。

本文总结了国内外以可再生能源为主的多能互补集成应用(下文简称“多能互补集成应用”)的技术现状及政策现状，并在此基础上分析了我国具有大规模发展潜力的大型综合能源基地类和终端集成一体化类(如产业园区、城镇/农村、大型公共建筑)多能互补集成应用类型，以及各自的适用范围，重点从源、网、荷、储的角度分析了每类集成应用的配置方案、推广障碍，并从宏观政策环境、价格机制、商业模式、管理机制、技术条件等方面提出促进多能互补集成应用的措施及建议。

1 多能互补集成应用的现状及相关政策分析

1.1 国内外多能互补集成应用的现状

根据我国国家发展和改革委员会、国家能源

局《关于推进多能互补集成优化示范工程建设的实施意见》(发改能源[2016]1430号)(以下简称《意见》)^[2]中的定义，“多能互补集成优化示范工程主要有2种模式：一是面向终端用户电、热、冷、气等多种用能需求，因地制宜、统筹开发、互补利用传统能源和新能源，优化布局建设一体化集成供能基础设施，通过天然气冷热电三联供、分布式可再生能源和能源智能微网等方式，实现多能协同供应和能源综合梯级利用；二是利用大型综合能源基地的风能、太阳能、水能、煤炭、天然气等资源组合优势，推进风光水火储多能互补系统建设运行。”该《意见》还提出，要达到“有利于提高能源供需协调能力，推动能源清洁生产和就近消纳，减少弃风、弃光、弃水、限电，促进可再生能源消纳，提高能源系统综合效率”的目的。

1.1.1 大型综合能源基地的多能互补集成应用现状

国际上针对大型综合能源基地的多能互补集成应用也展开过相关研究和构想。如“Desertec”项目^[3]，该项目计划在非洲、中东和欧洲一些地区，利用广阔的沙漠地带和丰富的太阳能及风能资源，建立太阳能发电及风力发电基地；然后利用高压直流输电技术，将清洁电力输送到欧洲地区，整个输电工程横跨地中海。另一个相关构想是“亚洲超级电网计划”，即利用俄罗斯远东地区、蒙古国，以及中国西部、北部地区丰富的太阳能资源、风能资源及戈壁资源，开发可再生能源发电，将充裕的清洁电力远距离输送到对电力需求旺盛的中国东部、韩国和日本。

目前以可再生能源为主的大型综合能源基地的示范与应用主要集中在中国。在中国“十二五”期间，以风能和太阳能为主的可再生能源主要以大型发电站的形式得到了大规模应用，这些电站集中建设在新疆维吾尔自治区、青海省、甘肃省、内蒙古自治区、宁夏回族自治区等西北部地区。虽然随着规模的增长，这些地区的弃风、弃光现象越来越严重，但西北、西南等地拥有丰富的可再生能源，具备多能互补集成应用的可能。对此，



在科技部支持下,“十二五”期间中国已经开展了相关科技攻关,从技术上对含风、光、水、储等多种电源形式的多能源系统的协调、调度、控制技术进行了研究,包括多能源电力系统的规划和设计方法、多能源电力系统的优化运行策略、不同类型电源的互补特性的分析法、利用互补特性提高系统灵活可控能力的技术等;“十二五”期间还开展了一些工程示范,示范形式主要包括风光储互补系统、水光互补系统、水风光互补系统这3种,涉及到的项目包括张家口风光储输工程、青海省龙羊峡水光互补项目、云南水/光/风互补示范工程等。

1.1.2 面向终端用户的多能互补集成应用系统的现状

面向终端用户的多能互补集成应用系统集中在用户侧,是一种建立在用户端的能源生产和供应方式,可将用户的多种能源需求与资源配置状况进行系统整合和优化。

面向终端用户的多能互补集成应用系统的一种应用形式为终端一体化社区能源站,这种应用形式主要集中在北欧。社区能源站为社区内的用户提供热能(包括热水和取暖),采用热电联产(CHP)技术,在供暖的同时还可以发电,并可将电力卖入大电网中。丹麦超过一半的家庭都使用来自区域供暖的热量进行采暖,德国、瑞典等一些国家也都实现了这一应用形式。社区能源站主要采用生物质能、太阳能、燃气等多种能源。由于该多能互补集成应用系统中包含有蓄热系统,当电价较低时,用户可从电网买电,并将电能转换为热能并蓄热,这为电力系统消纳更多的具有间歇性、波动性的风电和光伏发电提供了解决方案,增加了电网的灵活性,并提高了可再生能源利用效率,因此,这些技术的发展得到了政府研发基金的支持。

中国也开展了一些面向终端用户的多能互补集成应用,应用在产业园区、大型公共建筑等区域的系统实现了冷、热、电的自发自用。如南京

工业大学采用集成了太阳能集热器、生物质锅炉等的集成系统为校园提供生活用热水与采暖。

多能互补集成应用系统的另一种应用形式为由多种能源构成的微电网。

美国能源部将微电网视为未来电力系统的重要技术之一,并将其列入了美国“Grid 2030”计划。

加拿大政府针对微电网的研究启动了“Integrated Community Energy Solutions(ICES)”研究计划,重点关注微电网技术在各类社区供能环节中的应用,并着重强调各类分布式能源的集成利用及其与社区公共设施(交通、医疗、通信等)的相互支撑。在ICES研究计划的资助下,加拿大先后建立了包括Kasabonika微电网、Bella Coola微电网、Ramea微电网、Nemiah微电网、Quebec微电网、Utility微电网、Hydro Boston Bar微电网及Calgary微电网等在内的诸多示范工程,并计划在2020年前在加拿大构建2000余个ICES系统。

欧盟微电网项目(European Commission Project Microgrids)包含以下几个方面:含冷热电三联供,配有储能装置;利用一次能源,使用微型电源。该项目作为欧洲2020年及后续的电力发展目标,提出要充分利用分布式能源、智能技术、先进电力电子技术等,实现集中供电与分布式发电的高效紧密结合,并积极鼓励社会各界广泛地参与到电力市场中,共同推进电网的发展。

日本由于能源短缺,一直致力于发展风能和太阳能,但是由于这类新能源的随机性降低了电能的质量和供电的可靠性,限制了其应用,所以日本在微电网方面的研究更注重控制系统与储能方面,着眼于能源供给多样化、满足用户的个性化电力需求和减少对环境的污染,以期更好地实现环境友好和能源高效利用。

中国在“十二五”期间也开展了微电网的相关研究,以提高分布式能源利用效率和电网接纳能力为目标。比如,浙江东福山岛微电网、珠海东澳岛微电网、蒙东太平林场微电网、内蒙古陈



巴尔虎旗微电网、江苏盐城大丰微电网、青海玉树微电网等一批微电网工程已经投运，目前还有一批微电网工程正在建设中。2015年7月，国家能源局出台了《关于推进新能源微电网示范项目建设的指导意见》，强调因地制宜、多能互补，将各类分布式能源、储电蓄热（冷）及高效用能技术相结合，通过智能电网及综合能量管理系统，形成以可再生能源为主的高效一体化分布式能源系统。

在微电网中考虑冷、热供应后，可将微电网转变为微能源网。微能源网以能源的优化利用为导向，具备较高的新能源和可再生能源接入比例，可通过能量存储和优化配置实现本地能源生产与用能负荷的基本平衡，以充分利用当地的风能、太阳能、天然气等各类能源进行互补，并可根据需要与公共能源网进行灵活互动。如丹麦的伯恩霍姆岛实现了 588 km² 居住面积、2.8 万名海岛居民用户的生活电力和热力的自给自足；美国加州大学圣地亚哥分校、中国天津中新生态城等，

都实现了冷热电联供的综合考虑。

1.2 国内外多能互补集成应用相关政策的梳理

国内外与多能互补集成应用相关的政策可归纳为 3 个方面：1) 良好的宏观政策环境，包括能源税、碳税、投资税收抵扣政策、电力市场和辅助服务政策等；2) 可再生能源相关政策，包括固定上网电价政策、可再生能源配额制等；3) 多能互补集成应用激励政策，用于支持多种能源互补、提高能源效率等。

1.2.1 宏观政策环境

宏观政策环境包括能源税、碳税、投资税收抵扣政策、电力市场和辅助服务政策等，良好的宏观政策环境为可再生能源及多能互补集成应用的发展提供了适宜的土壤。相关宏观政策汇总如表 1 所示。

1.2.2 可再生能源相关政策

为促进可再生能源的发展，世界各国出台了种类繁多的激励政策与机制，覆盖财政、税收、价格、监管等诸多方面，具体如表 2 所示。

表 1 宏观政策汇总

Table 1 Summary of macropolicies

政策类别	简要内容	应用国家
能源税	对使用煤、石油等化石能源征税	丹麦、瑞典等
碳税	按 CO ₂ 排放量 (t) 征税，与化石燃料中的 CO ₂ 含量直接挂钩	丹麦、瑞典等
环境税	按照氮、硫等排放量征税，提高化石能源的使用成本	丹麦、瑞典等
投资税收抵扣政策	对国家鼓励的能源项目进行投资的企业，实施生产税、所得税等税收方面的抵扣	美国等
竞争性电价机制	电能生产者和使用者通过市场机制，就电能及相关产品进行交易，通过市场竞争确定价格和数量	美国、德国、丹麦、西班牙等

表 2 可再生能源相关政策汇总

Table 2 Summary of renewable energy policies

政策类别	简要内容	应用国家
上网电价	对风能、太阳能等可再生能源发电实行按区域平均成本统一定价的电价政策	德国、丹麦、法国、中国等
初投资补贴	对可再生能源项目建设所需资金给予一定数量的补贴	丹麦、德国、美国、中国等
可再生能源配额	政府制定强制的可再生能源配额目标，以法律、法规形式对可再生能源市场份额做出强制性规定	美国、欧盟等
税收优惠	对于可再生能源应用项目，从所得税、生产税、增值税等方面给予优惠	美国、德国、中国等

1.2.3 多能互补集成应用激励政策

与多能互补集成应用直接相关的政策较少，

间接与其有关的政策主要有支持热电联产的相关政策，如投资补贴、电价补贴、税收、强制性安



装等。值得一提的是,德国于 2007 年出台的“技术中性”招标专项,首次明确提出了对风光联合项目给予支持。

1) “技术中性”招标专项。德国是全球可再生能源发展的领头羊。2016 年 7 月 8 日,德国政府出台了其《可再生能源法》的最新修订案——2017 年版《可再生能源法》。此次改革的一个根本性特征即是从由政府确定的法定上网电价补贴机制转向由竞争性流程(招标)确定的补贴机制。新版《可再生能源法》规定,从 2017 年 1 月开始,可再生能源发电上网电价补贴将通过针对特定技术的招标(投标)来决定,包括陆上风电场、海上风电场,以及光伏发电、生物质发电的所有较大型电站,都必须参与招标。同时,专门设置了“技术中性”招标专项,用于特别支持可再生能源电站互补项目,包括促进电网友好型和系统友好型的风光组合型发电项目、创新型可再生能源技术系统集成项目(不限技术种类)。

2) 热电联产相关激励政策。从 20 世纪 80 年代开始,丹麦、瑞典、美国等国家就开始大力支持热电联产应用,且大幅提高了热电联产应用的比例。丹麦的燃气分布式热电联产技术,使燃气分布式能源的占有率在其整个能源系统中已经接近 60%。丹麦推动热电联产应用的政策措施主要包括补贴、税收和监管等。欧洲的终端一体化热电联产系统应用较多,可为区域内的用户提供电能和热能,大幅提高了能源系统效率。

2 我国多能互补集成应用的现状与推广模式研究

我国地域辽阔,资源丰富,由于多能互补集成应用具有因地制宜、就地取材、可根据用户需求定制设计的特点,使该技术拥有广阔的应用空间。从我国多能互补集成应用的现状来看,应用规模上包含单体建筑、工业厂区、居民社区,以及乡/镇/县、产业园区,甚至整个省;应用范围上既有农村,也有城市,显示出多能互补集成

应用无论是在供应居民生活用能方面,还是在工业用热、用电方面,均具有广泛的适应性和可行性。

2.1 大型综合能源基地风、光、水、火、储类

我国可再生能源丰富,技术可开发量大,具有非常大的开发潜力,且很多地区具有建设大型综合能源基地的潜力。比如,黄河上游的水电站所在地附近的太阳能资源丰富,金沙江等的水电基地附近的风能、太阳能资源等也较为丰富,甘肃酒泉、新疆哈密、内蒙古等地的风电基地内的太阳能资源也十分丰富,青海海西、海南地区的光电基地内也都有一定规模的风能、太阳能资源等。因此,通过能源之间的互补运行,提高可再生能源利用率,从而可以缓解我国现阶段集中式风力发电和光伏发电面临的严重弃风、弃光问题。

针对大型综合能源基地的多能互补集成应用,建议配置原则为:

1) 以大比例消纳风电、光伏发电为目标来设计多能互补集成应用系统。由于风电、光伏发电输出的间歇性和随机性,接入电网后会给电网安全带来不利影响,且当前电网接纳能力有限,导致弃风率、弃光率增加,因此,多能互补集成应用系统应利用多种能源互相补充,利用水电、火电等电源的调节能力来最大比例地消纳风电和光伏电力,有效减少弃风、弃光现象,这样有利于促进风电、光伏发电的规模化利用。

2) 水电、火电以满足调度需求的目标进行配置,在大型综合能源基地的多能互补集成应用系统中,优先考虑具备灵活性调节能力的火电机组、流域梯级水电站。未来,火电、水电等将逐步由基荷电源向调峰电源转变。水电作为一种清洁的发电形式,在调节电源配置中应优先考虑。

3) 配置的储能系统以功率型为主,容量尽量小,达到分钟级快速响应即可实现平抑波动的功能。大型综合能源基地多能互补集成应用系统中配置储能系统,主要功能为平抑风电、光伏发电的随机性、波动性。储能配置类型以功率型为主,



考虑到储能系统的经济性，储能配置容量可尽量小，满足快速响应能力达到分钟级要求即可。

2.2 产业园区类

城市产业园区经济发展较好且用能需求较大，可大量安装分布式可再生能源，但可再生能源的波动性给电网运行和控制带来了诸多不利影响。通过多能互补集成应用将地域相近的分布式能源、储能装置与负荷进行整合，在满足用户供电需求的同时，还能满足供热、制冷、湿度控制和生活用水等多种需求，可通过多能互补集成应用系统内部不同分布式电源的互补特性及内部储能装置的控制，平滑分布式电源输出功率的波动，增加多能互补集成应用系统对配电网的友好性，可减少各类分布式电源直接并网对大电网造成的影响，从而加快我国可再生能源的发展。

多能互补集成应用系统的组成方式与各种能源容量的优化配置需根据因地制宜的原则，结合当地的资源和用电负荷情况进行具体规划设计，以实现当地可再生能源的充分利用，并保障当地负荷的可靠用能。

一般来说，产业园区的多能互补集成应用的优化配置需满足以下几个基本原则：

1) 应充分利用当地的资源条件和能源消耗特点，确定可配置的可再生能源和清洁能源的类型。在日照强度较大且拥有大面积无遮挡的屋顶、车棚的产业园区，可选择配置大容量的光伏发电系统；在风资源好且地势开阔、地质条件好的产业园区或周边，可配置安装风电机组；在风、光资源在时间和空间分布上均具备互补性的产业园区，可配置安装风光互补发电系统。

2) 在有天然气供应且热能需求量较大的产业园区，配置优先选用热电联产的燃气轮机；在实施区域集中供暖且地热资源丰富的京、津、冀、鲁、豫及毗邻地区，应推动中深层地热供暖项目建设。在经济发达、夏季制冷需求高的长江经济带地区，应整体推进浅层地热能项目；在靠近河流的产业园区，宜采用水源热泵建设集中供冷、

供热系统；在有余热的工业场合，可通过对中高温余热进行多种余热回收利用的方式节约燃料，提高经济性，还可进行多种低温余热的综合利用。

3) 储能的选择。储能在产业园区中安装运行的模式多样，可利用工商业用户用电峰谷电价差，采用削峰填谷的模式，为园区节省用电成本。此外，储能接入配电网还可实现孤岛运行、系统调频、系统调压、热备用、阻尼控制、电能质量治理和间歇式可再生能源并网控制等功能。

4) 通过需求侧管理和需求侧响应机制，采取适当措施对用电负荷有计划地进行限制和调整，以保证电力供需之间的平衡。

5) 对电能质量开展专项研究，根据用电负荷特点配置电能质量调控设备。拥有纺织类和精细化工类等敏感性负载的产业园区对电能质量的要求较高，增加波动性可再生能源后，需要配置有源滤波器等电能治理调控装置；有些产业园区的供电质量较差、电网阻抗大，光伏发电和风电等不能并网，此时需要配置储能、有源滤波器等电能质量调节装置进行调节。

2.3 城镇 / 农村类

我国处在加快城镇化的进程中，强调节约集约、生态宜居、和谐发展等基本特征，迫切需提高能源供应量，并实现绿色发展，但面临着城镇 / 农村能源网较弱的问题。通过将可再生能源与城镇 / 农村建设相结合，实现发电与供暖、热水的综合应用，既可以有效解决城镇用户日常用电、生活用热水，以及家庭冬季供暖或夏季供冷的需求，也可以满足一般性公共设施的用电、用热、用冷需求，在满足当地用能需求的同时实现了环境保护。

针对城镇 / 农村类多能互补集成应用，建议配置原则为：

1) 考虑到当地电网较薄弱的实际情况，建议以“就地消纳、少量上网”为原则；同时优先使用可再生能源，尽可能减少储能电池的容量。建议可再生能源比重占用能消费上限 50%。

2) 充分发挥冷、热、电负荷的时空耦合关系，



实现多种能源冷热电联产联供。

3) 对供电可靠性要求高的有重要负荷的系统, 需配备储能, 形成既可独立又可并网的双模式微网。

2.4 大型公共建筑类

公共建筑是指人们进行各种公共活动的建筑, 包含办公楼、教室、旅馆、商场、医院、交通枢纽、文体活动场所等建筑类型。从单体建设规模来看, 当公共建筑的单体建筑面积超过 2万 m^2 时, 称为大型公共建筑。此类公共建筑多采用玻璃幕墙等全密闭形式, 并配以中央空调系统, 其单位建筑能耗指标是普通公共建筑的 $2\sim 3$ 倍, 且用能特点明显区别于普通公共建筑。

根据统计年鉴数据显示^[4], 我国的公共建筑面积已经从 1996 年的 27.6亿 m^2 增长到 2014 年的 107亿 m^2 。截至 2014 年, 全国公共建筑用能 (不含北方供暖) 为 2.35亿 tce , 占建筑总能耗的 27% , 其中, 电力消耗为 5889亿 kWh 。

公共建筑总面积的增加、大型公共建筑占比的增长, 以及用能需求增长等因素导致近年来公共建筑能耗总量大幅增长。根据统计年鉴数据显示^[4], 2001~2014 年, 我国公共建筑能耗增长了 1.5 倍以上, 单位建筑能耗由 16.8kgce/m^2 增长至 21.9kgce/m^2 , 能耗强度增长约 30% 。

随着我国城镇化进程和基础设施建设的加快, 公共建筑无论是建设规模, 还是能耗强度, 都将呈现高增长态势。因此, 根据不同类型公共建筑的用能特点, 在满足正常生产、生活的基础上, 通过建筑节能、可再生能源多能互补集成应用等技术手段, 辅以可行的长效激励机制, 可从根本上降低公共建筑对传统用能的依赖, 从而可对我国的可持续发展起到重要的支撑作用。

针对大型公共建筑多能互补集成应用提出的建议配置原则为:

1) 在被动式节能方面, 应通过建筑本体节能设计, 最大程度降低本体用能需求。

2) 在主动式供能系统的节能方面, 应重点针

对源、输、配, 以及末端利用系统进行深入分析, 以便最大程度地提高空调、照明、通风等供能系统的整体运行效率。

3) 应充分结合负荷侧分析, 考虑燃气冷热电联供, 利用太阳能热发电、光伏、热泵等多种能源的有机互补, 满足室内环境营造, 通过全生命周期分析方法, 在确保经济性要求的前提下最大程度地降低对传统能源地消耗。

4) 对于新建公共建筑, 实施以“能耗量”为约束目标贯穿全过程的节能管理; 对于既有公共建筑, 实施控制“实际能耗量”的节能管理。

3 多能互补集成应用的推广障碍与推进措施研究

3.1 推广障碍

3.1.1 缺乏明确定义和界定

国际上不同科研机构对微网都有自己明确的定义, 其中一些定义在国际范围内被广泛采纳, 从而帮助业内明确微网在大能源网中的定位和未来的技术发展路线。多能互补集成应用系统目前尚无明确定义, 包括能源互补原则、系统与大能源网的功率交换模式、可再生能源占比等。由于定义不明确, 对多能互补集成应用项目的评选和后评估、未来技术路线的选择, 以及其在能源网中的定位等都造成了影响。

3.1.2 缺乏相应的计算工具和平台来优化多能互补集成应用系统

多能互补集成应用系统中各个子系统互相耦合、互相匹配, 需要通过详细的计算来实现配置优化和输出稳定可靠。计算时, 往往需要以动态负荷为基础, 结合资源条件动态计算系统匹配情况, 但目前国内的相关计算工具较为匮乏, 少数功能强大的计算工具和平台操作起来较为繁琐, 而多数应用尚处于科研层面, 导致具体项目推进较为困难。

3.1.3 缺乏相应的评价方法对系统进行评估

多能互补集成应用系统如何评估是影响其大规



模推广的关键因素，只有在多能互补集成应用系统得到合理、公正评价的前提下，社会大众才会真正大规模地参与此类系统的应用。多能互补集成应用项目通常会同时涉及不同的能源利用形式，如冷、热和电，具有不同的效率和成本的计算方法及单位。由于多能互补集成应用的复杂性，目前国内还缺乏相关评价方法，不利于其在中国的应用发展。

3.1.4 行业间利益不一致带来的协调问题

多能互补集成应用系统涉及到多种能源方式，突破了传统能源的界限，会同时涉及电力、热力及燃气等不同行业，不可避免的要进行多个行业之间的交流和沟通。由于各行业对待各种能源采取的政策和态度不一致，导致多能互补集成应用系统在运行期遇到种种障碍。

3.1.5 投资和建设成本较高，限制了多能互补集成应用系统的大规模发展

多能互补集成应用系统由于系统集成复杂、涉及大量可再生能源和清洁能源，且多数系统需要配备储能，因此较高的投资和建设成本也是目前制约其发展的重要因素。如光伏发电、风力发电、生物质发电等都需要国家补贴，同时我国天然气价格较高，且仍处于上涨阶段，其价格也不具备竞争优势。

3.2 相关措施研究

3.2.1 完善宏观政策环境

从欧盟的经验来看，欧盟承诺的可再生能源和温室气体减排目标是所有国家和地区推动可再生能源区域能源系统的原动力。丹麦、瑞典等国家高额能源税、碳税等的征收，以及环境成本内部化的社会经济影响评价方法的实施，大幅提高了化石能源的使用成本，形成了有利于可再生能源应用的市场环境。

多能互补集成应用在中国尚处于探索、示范应用阶段，成本较高，尤其是在不考虑环境等外部因素的影响下，与传统化石能源供能相比，其还缺乏竞争力。从政策框架上来说，完善宏观政策环境

是对多能互补集成应用系统的最大政策支撑。

因此，需要重点关注和推动的宏观政策包括：

1) 能源消费总量控制：应加强对能源消费总量控制的力度。

2) 温室气体减排激励机制的建立：尽快研究出台温室气体减排激励机制，出台碳税或是建立碳交易平台；研究实施能源税、环境税等，使化石能源外部成本内部化，为以可再生能源为主的多能互补集成应用系统的发展创造公平的市场竞争环境。

3) 节能：将以可再生能源为主的多能互补集成应用系统纳入建筑节能的要求，明确要求新建建筑和小区采用高效的多能互补集成应用系统，且要求其中可再生能源的应用应达到一定标准。

4) 污染控制：将多能互补集成应用系统纳入大气污染控制的支持范畴，特别是将多能互补集成应用系统用于区域供热纳入北方城镇供暖替代燃煤的技术目录；在环境约束较强的地区，限制燃煤等化石能源供热应用，从而推动多能互补区域供热系统的发展。

3.2.2 改革价格机制

1) 建立竞争性电力交易市场。对于提供电力的多能互补集成应用项目，可利用多能互补能源基地内各类能源系统之间的互补运行，保障供电质量和供电可靠性的优势，探索建立辅助服务分担共享新机制、完善市场化电力交易机制，以及可再生能源综合利用各种体制，为进一步深化电力体制改革提供有益的借鉴。

2) 尝试构建电力市场体系。在发电侧，形成能够反映不同电源灵活性价值的价格体系，针对不同季节、不同时间段、不同电力质量，采用不同的电力价格；在用户侧，将电力负荷作为一种资源，形成能够调动负荷参与电力平衡，分时电价体系，提升需求侧的能源效率；建立由市场决定电价的机制，以价格信号引导不同资源的有效开发和合理利用。

3) 完善区域供热价格政策。对于终端一体化的多能互补集成应用系统，应建立完善的区域供



热价格政策。供热价格的核定需要考虑环境外部性问题,多能互补集成应用系统供热管网建设和改造费用应纳入城市基础配套费,按常规能源供热管网建设的收费标准收取。终端采暖价格应以地方政府召开听证会等方式确定,商业用热和工业用热价格则可采取企业间谈判的方式确定,地方政府可根据当地的实际情况确定指导价格,可再生能源供热价格应参照天然气供热价格执行。对于可再生能源多能互补集成应用项目,应理顺燃料价格、上网电价及热冷价政策之间的关系,逐步实现气电联动、气暖联动等市场定价机制。

3.2.3 创新激励机制

1) 推动财税支持。对于多能互补集成应用项目建设,尤其是区域性供能项目,应按规定享受相关税收优惠和节能补贴政策。区域供热项目和区域能源站应参照公共基础设施项目和供热企业享受相关的税收优惠政策。鼓励各地方政府结合本地区实际情况制定并实施与能源利用效率挂钩的多能互补集成应用项目的退税奖励办法,促进本地区多能互补集成应用项目的发展。而对于应用可再生能源的区域供能项目,可根据项目所利用的资源种类,享受同类资源利用项目的税收优惠;当可再生能源贡献占比超过80%(含)时,可享受增值税“即征即退”的政策。

2) 部分实行以奖代补政策。统筹制定不同种类多能互补集成应用系统的技术标准,对于技术先进、能源利用效率较高的多能互补集成应用系统,应在现有电力和热力价格政策框架内给予一定的财政补贴。财政补贴包括:对大型基地类多能互补集成应用试点系统参与调峰的电源给予一定的价格补贴;对终端一体化的多能互补集成应用试点系统给予初投资一定比例的奖励,并在系统运行达到要求后发放。

3) 创新投融资机制。银行等金融机构应将多能互补集成应用项目纳入融资优先的范畴,并给予利息优惠。对于终端一体化多能互补集成应用项目,开展小额贷款、项目抵押贷款、项目股权

投资等新型投融资模式。探索建立多能互补集成应用项目投融资平台,支持建设高效多能互补集成应用项目。推动金融保险机构与项目开发商的互利合作,完善相关服务体系。

3.2.4 鼓励多种商业模式

1) 通过特许经营权方式推动终端一体化多能互补集成应用项目。按照我国在集中供热领域大力推广的特许经营权模式,推动多能互补集成应用项目开发公司通过与政府签署协议,获得区域供能系统的特许经营协议,为区域提供能源。通过合同方式确定供能服务内容和要求,明确供能电价、热价及其他能源价格,同时也获得中央及地方政府的补贴和税收优惠政策。

2) 通过“政府和社会资本合作(Public-Private Partnership, PPP)”、“建设—经营—转让(Build-Operate-Transfer, BOT)”等商业模式推动多能互补集成应用项目的建设。积极引入社会资本,调动社会积极性,在可再生能源资源丰富、用能负荷大、用能品质要求高的区域,采取BOT、OT等模式,引入专业化的公司,建设能吸纳更多可再生能源的高效多能互补集成应用系统,促进可再生能源与常规能源系统的融合。

3) 以能源合同管理模式推动终端一体化多能互补集成应用项目。结合我国节能领域应用能源合同管理模式的经验教训,积极采用能源合同管理模式,采取集中式与分布式相结合的方式为区域供能。推动社会资本采用PPP模式参与到多能互补集成应用项目的投资建设当中。

3.2.5 理顺管理机制

1) 简化备案程序。对于符合要求的大型综合能源基地类多能互补集成应用系统,从项目备案、立项、审批等环节予以支持。简化项目备案流程,依据“集中备案、统一处理”的原则,由省级政府统一开展备案,项目备案后可分批开展项目建设。将多能互补集成应用示范项目纳入国家及省级规划,大型综合能源基地类多能互补集成应用系统的备案项目规模应优先纳入国家分配的各省



(区)电源装机容量、可再生能源发展规模及补贴等总量指标中。

2) 优化管理流程。省级地方政府对于多能互补集成应用系统项目建设前的相关规划、环保、安监等事项,以及项目建成后的竣工验收和运营期的电费结算、补贴发放、质量监督等事宜,实行全过程“一站式”服务,并制定各项服务的管理流程,指导企业开展工作,切实提高服务效率。强化项目质量管理和监督,对多能互补集成应用示范项目开展动态监管。对示范项目的建设、并网和调度运行、价格结算、补贴发放开展全过程监管,确保项目“依法、合规、高效、安全”建设。

4 结论

以可再生能源为主的多能互补集成应用是国内外能源领域的热点,是提高能效、促进可再生能源发展的重要措施,对于建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系具有重要的现实意义和深远的战略意义。

本文分析了我国具有大规模发展潜力的大型综合能源基地类、产业园区类、城镇/农村类、大型公共建筑类多能互补集成应用类型各自的适用范围,重点从源、网、荷、储的角度分析了每种类型的配置方案和推广障碍,并从宏观政策环境、价格机制、商业模式、管理机制、技术条件等方面提出了促进多能互补集成应用发展的措施及建议。主要结论如下:

1) 以可再生能源为主的多能互补集成应用在国内外整体尚处于示范推广阶段。由于国际上的可再生能源应用以分布式为主,因此以可再生能源为主的大型能源综合基地的示范与应用主要集中在国内,且整体尚处于科技示范阶段。在面向终端用户的多能互补集成应用系统方面,多种能源构成的微电网、微能源网是主要应用形式,在北美、欧洲、日本及中国都建立了大量示范工程,有离网型也有联网型,逐步从单纯的微电网转向含冷、热、电的微能源网,整体处于示范推广阶

段。北欧地区的多能互补集成应用是社区能源站,在满足以社区供暖为主的同时采用 CHP 技术实现了冷热电联供,丹麦、德国、瑞典等一些国家都实现了这一应用,并且由于当地政策环境的支持实现了商业应用。中国在产业园区、大型公共建筑等方面也开展了不同形式的多能互补集成应用,满足了部分冷、热、电的用能需求。

2) 多能互补集成应用是未来重要发展方向,国家多部门相关政策仍需整合,以形成合力,共同促进多能互补集成应用的发展。我国在可再生能源方面的相关政策正在逐步完善,近些年陆续出台了光伏发电、垃圾焚烧发电、海上风电电价政策,公布了太阳能热发电示范电站电价,并在投融资、技术标准、土地使用、财税、检测、认证、标准等方面进行了逐步完善。但多能互补集成应用系统涉及到多种能源方式,突破了传统能源的界限,同时涉及电力、热力及燃气等不同行业,不可避免的要导致多个行业之间的交流和沟通,而各行业的能源采取政策和态度不一致,往往导致多能互补集成应用系统在运行期遇到种种障碍,需要多部门形成合力。

3) 中国相关的市场机制改革正在进行,需要创新的商业模式和价格机制。以可再生能源为主的多能互补集成应用属于新兴事物,从已有的国内外案例来看,目前仍以政府投资或大型企业集团赞助为主,在实现商业化运行的非常少。以可再生能源为主的多能互补集成应用系统的建设投资较高,在现有政策环境及价格机制下经济性较差。中国正在进行的电力体制改革为多能互补集成应用带来了机会,使综合能源服务商、特许经营权等新兴商业模式成为可能,同时也带来了新的认证、监管等方面的需求。

4) 需要更多的技术创新和示范,带动多能互补集成应用的发展。多能互补集成应用不是多种技术的简单堆叠,需要考虑可再生能源的强波动性对整个系统的影响、考虑供能与用能的时空平衡,以及从能量流的角度综合考虑冷、

热、电的能量分配,从而才能形成一个强耦合性的综合系统。另一方面,多能互补集成应用具有因地制宜的特点,无统一的标准技术和装备,因此需要更多的技术创新和示范,从而带动多能互补集成应用的发展。

[参考文献]

[1] 国家发展和改革委员会. 关于印发《可再生能源发展

“十三五”规划》的通知 非书资料:发改能源[2016]2619号[S]. 北京,2016.

[2] 国家发展和改革委员会,国家能源局. 关于推进多能互补集成优化示范工程建设的实施意见 非书资料:发改能源[2016]1430号[S]. 北京,2016.

[3] DESERTEC[EB/OL]. (2019-11-10). <http://baike.baidu.com/item/desertec/2462796?fr=aladdin>.

[4] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告(2015)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2015: 20-21.

STATUS AND DEVELOPMENT RESEARCH OF INTEGRATED APPLICATION OF MULTI-ENERGY COMPLEMENTARY SYSTEM BASED ON RENEWABLE ENERGY

Li Hailing¹, Lv Fang², Wang Yibo¹, Hu Runqing³, Zhang Xinyu⁴, Shi Wenhui⁵, Zhang Zhankui⁵

(1. The Key Laboratory of Solar Thermal Energy and Photovoltaic System, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Science (CAS), Beijing 100190, China;

2. Beijing JKD Renewable Energy Technology Development Center, Beijing 100190, China;

3. Energy Research Institute National Development and Reform Commission, Beijing 100038, China;

4. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China;

5. State key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: This paper reviews the domestic and foreign existing policies and business models on multi-energy complementary system. After analysis, several sectors with high potential to develop multi-energy complementary integration application based renewable energy combined cooling heating and power are selected. They are industrial park, urban/rural, large public buildings, island, and large-scaled energy base. The scopes of application and promotion barriers are analyzed. The configuration principles of each category are studied from the point of view of energy source, power network, load and storage. Finally, measurements and suggestions are put forward in many sides, such as policy environment, price mechanism, business mode and management mechanism.

Keywords: renewable energy; multi-energy complementary system; combined cooling heating and power; measures