

多能互补系统国际发展态势分析^{*}

郭楷模^{1,2} 岳芳^{1,2} 陈伟^{*,1,2,3} 马廷灿^{1,2,3} 欧桂燕^{1,2,3} 耿笑颖⁴

(1. 中国科学院武汉文献情报中心, 武汉 430071; 2. 科技大数据湖北省重点实验室, 武汉 430071;
3. 中国科学院大学经济与管理学院, 北京 100190; 4. 中国科学院大连化学物理研究所, 大连 116000)

摘要:多能互补系统通过多种能源之间的相互补充和梯级利用以提升能源系统的综合利用效率, 具有缓解能源供需矛盾, 实现新型低碳、高效能源系统构建, 多能协同利用等优点, 世界主要国家均给予高度关注, 纷纷制定多能互补能源发展战略, 并开展了相关技术研发和试点项目。本文从国际相关的多能互补系统战略布局、项目部署、关键前沿技术进展等几个方面对多能互补能源系统国际发展态势进行分析, 并从专利计量的角度深入分析国内外分布式能源技术专利申请趋势、地区分布、研究热点、主要专利权人等信息, 进而提出中国多能互补能源系统未来发展对策建议。

关键词:多能互补系统; 战略规划; 分布式能源; 专利计量

DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2020.04.019

International Development Trend Analysis of Multi-energy Complementary System^{*}

GUO Kaimo^{1,2} YUE Fang^{1,2} CHEN Wei^{*,1,2,3} MA Tingcan^{1,2,3}
OU Guiyan^{1,2,3} GENG Xiaoying⁴

(1. Chinese Academy of sciences, Wuhan Library, Wuhan 430071, China; 2. Hubei Key Laboratory of Big Data in Science and Technology, Wuhan 430071, China; 3. School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
4. Chinese Academy of Sciences, Dalian Institute of Chemical Physics, Dalian 116000, China)

Abstract: Multi-energy Complementary System (MECS) can make full use of multiple energy resources and improve the comprehensive energy efficiency by complementary and gradient utilization of energy. It is of great significance to construct a low-carbon, safe, efficient energy system and ease the contradiction between energy supply and demand. Given the above benefits of MECS, strategic plans, research and demonstration work of MECS are being developed in major countries and regions of the world. At present, many achievements in various fields have been made, such as renewable energy grid connection, smart grid, smart community, demand-side management and so on. This article mainly analyzes the international development trend of MECS from aspects of international relevant strategic planning, research projects deployment, research progress and key frontier technologies. Meanwhile, the trend, regional distribution, research hotspot and main patentee of distributed energy technology at home and abroad are analyzed through patent bibliometric. Based on the above analysis, several suggestions for MECS development in our country are put forward.

Keywords: Multi-energy Complementary Systems; Strategic Plans; Distributed Energy Resources; Patent Analysis

^{*} 中国科学院变革性洁净能源关键技术与示范战略性先导科技专项战略研究课题(XDA21010103), 中国科学院文献情报能力建设专项(E0290001), 中国科学院战略研究和决策支持系统建设专项(GHJ-ZLZX-2019-35), 中国科学院青年创新促进会项目(2017221), 中国科学院自主部署项目(Y6ZG83)

^{**} E-mail: chenw@mail.whlib.ac.cn; Tel: 027-87199180

随着全球新一轮能源革命的不断深化,当前以化石能源为主的供能模式将发生重大变革,能源结构逐步向低碳化、多元化转型,多种能源形式协同互补发展,以提升能源利用效率,这已成为应对气候变化、实现可持续发展目标的必然选择。因此,因地制宜、贴近用户,将多种能源互相补充和梯级利用,形成多能互补系统,发挥不同能源的优势和潜能,缓解能源供需矛盾,实现资源配置和能源利用最大化成为了当下各国能源发展重点关注领域。为此,世界主要国家纷纷制定了多能互补能源发展战略,并开展了相关技术研发和试点项目,目前已在可再生能源并网、智能电网、智慧社区、需求侧管理等方面取得了一系列的成功经验。

多能互补系统的核心在于融合,包括了能源供给侧互补、用户需求侧融合和能源输配网络(电/气/热网)融合等,是在能源系统层面进行整体协调和互补,通过生产、输配、消费、存储等各环节的时空耦合和互补替代,实现多能协同利用。多能互补的不同电源存在多种互补形式,主要有时间互补、热互补和热化学互补,其中时间互补和热互补已应用到工程中,而热化学互补尚处于理论分析和试验研究阶段^[1]。目前,国内外对于多能互补系统尚无统一定义,混合能源系统(Hybrid Energy System)、综合能源系统(Integrated Energy System)、多能系统(Multi-energy Complementary System)、多能量载体系统(Multi-vector Energy System)、区域能源系统(District Energy System)等概念中均包含多能协同互补的含义。另外,多能互补与智慧能源、能源互联网有内在联系,多能互补强调多种能源的协调互补和梯级利用,能源互联网侧重于能源与互联网技术的深度融合。能源互联网技术是多能互补的重要支持与实施前提,

利用互联网为多能互补提供信息支撑,而多能互补是能源互联网的落脚点之一,是智慧能源的物理基础。

当前,全球能源系统已经呈现出去中心化、物联化、智能化等演变趋势,注定要颠覆现有的能源系统和行业运营模式,能源横向和纵向上的互补协调是能源系统未来发展的必然趋势,多能互补能源系统研究具有前瞻性和巨大的工程应用价值,由此全球范围内掀起了探索多能互补能源系统的应用研究热潮。为此,本文对世界主要国家近年来的多能互补系统政策发展新动向、相关前沿技术的重要进展和新趋势进行系统梳理分析,同时借助专利计量分析了多能互补代表性关键技术的竞争态势,以期为我国准确把握世界多能互补系统发展态势和趋势,优先谋划和布局提供重要参考依据。

1 主要国家/地区战略布局

纵览主要国家/地区的多能互补系统发展战略可知,纵然各国/地区资源禀赋和国情不同,但各国/地区均不约而同地将发展多能互补系统置于能源战略的核心位置。就具体技术而言,智能电网技术、不同能源系统耦合集成技术、多能互补分布式供能技术、多能混合建模、协调优化控制系统等技术是目前备受各国重视的发展方向,以实现能源系统级高效整合、协同优化、智能互联,从而提高能源供需协调能力和能源利用效率。但各国/地区依据国情和资源禀赋不同,具体的发展侧重点略有不同:美国从智能电网出发,着力发展核能-可再生能源混合能源系统;欧盟大力发展各类低碳能源技术,以“能源系统集成”和“智能电网”为抓手,以建立一个低碳、安全和灵活的泛欧综合能源系统;中国着力发展多能互补的分布式供能

技术,部署多能互补集成优化示范工程,推进能源供给侧结构改革,实现多种能源优化互补稳定供给;德国投入重金积极探索高比例可再生能源集成的系统解决方案,聚焦新型电网架构开发和加强能源系统的协同集成研究;日本积极探索利用人工智能和物联网等技术构建多维、多元、柔性的能源供需体系。

1.1 美国

美国推进多能互补技术从建设智能电网开始。2007 年美国颁布《能源独立和安全法》,以法律形式确立了智能电网的国策地位,设计了智能电网的整体发展框架,要求社会主要供用能环节必须开展综合能源规划^[2]。2015 年,美国能源部(DOE)提出“电网现代化倡议”(Grid Modernization Initiative, GMI),希望将传统能源与可再生能源、储能和智能建筑进行整合,建立灵活、可靠、安全的现代电网^[3]。同年 11 月,DOE 发布《电网现代化多年期计划》,确定了未来五年电网现代化重点开展六大主题研究工作:设备和集成系统测试,传感和量测,系统运行、电力流动和控制,设计和规划工具,安全性和灵活性,技术支持^[4]。为了更好推进上述政策计划,DOE 成立了电网现代化实验室联盟(Grid Modernization Laboratory Consortium, GMLC),以支持电网现代化计划的实施。此外,美国高度注重在供应端融合多种清洁能源来推进多能互补能源系统构建:在融合太阳能发电方面,2011 年,DOE 推出为期十年的“太阳能攻关计划”(SunShot),其“系统集成子计划”专门聚焦电网性能和可靠性、可调度性、电子电力以及通信四个技术领域进行研发^[5]。而在融合风能发电方面,目前 DOE 风能技术办公室主要通过 GMLC 支持输配电的集成研究、建模、示范和评估来消除风能并网障碍,同时直接与公用

事业单位合作以确保最佳实践^[6]。

近年来美国还启动了核能-可再生能源混合能源系统研发工作,目前处于早期开发探索阶段。2015 年,DOE 发布《四年度能源技术评估报告》^[7],提出了三类核能-可再生能源混合能源系统概念:1)核能-可再生能源一体化耦合能源系统,将核电、可再生能源和工业过程直接集成在一起,进行发电过程协同控制再上网;2)核能-可再生能源热耦合能源系统,核能热电联产为工业过程提供热量,核电与可再生能源电力分别上网;3)核能-可再生能源电力耦合能源系统,将核电和可再生能源发电与工业用户用电耦合,允许核电和可再生能源电力在接入电网前自行管理。2016 年 3 月,DOE 发布《核能-可再生能源混合能源系统技术发展计划》^[8],要求着重开发上述三类系统,研究工作聚焦在集成技术、通信、系统控制与新兴子系统技术开发,目标是到 2030 年实现 NR HES的试点示范。

1.2 欧盟

欧盟早在其第五研发框架计划(FP5)中就提出了与多能互补类似概念的——能源协同优化,并将其列为研发重点,通过多个项目寻求传统能源与可再生能源的协同优化互补,在后续的 FP6、FP7 研发框架中进一步深化了能源协同优化和综合能源系统的相关研究^[9]。2007 年欧盟委员会制定了综合性能源科技发展战略——“战略能源技术计划”(SET-Plan),发起产业倡议以促进先进清洁能源技术发展,并于 2010 年成立欧盟能源研究联盟(EERA),实施了 17 项联合计划以开展低碳能源技术研究,“能源系统集成”和“智能电网”是其中两项^[10]。2015 年 9 月,欧盟委员会更新了 SET-Plan 计划,明确提出要发展可再生能源并将其集成至欧洲能源网络,并构建以能源用户为中

心的欧洲未来能源系统^[11]。在 SET-Plan 计划框架下,欧盟创建了欧洲能源转型智能网络技术与创新平台(ETIP SENT),该平台于 2018 年提出了泛欧综合能源系统 2050 愿景:建立一个以多能互补为基础,低碳、安全、可靠、灵活、可获取、低成本且以市场为导向的泛欧综合能源系统,到 2050 年实现建成气候中性经济体的目标,同时在能源转型期间增强在全球能源系统产业的领导地位^[12]。

1.3 中国

随着能源革命的持续深入,加大风能、太阳能、核能等新能源的开发是目前我国能源战略的主要方向。然而由于新能源具有间歇性和不确定性,大容量风电和光电集中接入电力系统会严重影响主电网的电能质量和稳定运行,造成弃风、弃光、甚至脱网等问题,制约了新能源的发展,因此迫切需要发展多能互补的分布式供能技术,改革能源供给侧结构,实现多种能源优化互补稳定供给。2012 年,中国国家电网公司首次在全球范围内提出构建全球能源互联网构想,旨在促进全球清洁能源大规模开发利用。

2016 年 2 月,国家发改委、国家能源局、国家工信部联合发布《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》,完成了基于互联网的新能源产业的顶层设计^[13]。同年 7 月,国家发改委、国家能源局出台《关于推进多能互补集成优化示范工程建设的实施意见》,明确提出将在“十三五”期间建成多项国家级终端一体化集成供能示范工程及国家级风光水火储多能互补示范工程^[14]。除了积极制定相关顶层战略规划,中国政府也积极部署了一系列的研发、示范项目:2016 年 7 月,国务院印发《“十三五”国家科技创新规划》,设立“智能电网”专项,聚焦部署大规模可再生能源并网调控、大电网柔性互联、多元用户供需互动用

电、智能电网基础支撑技术等重点任务^[15]。此外,科技部国家重点研发计划自 2016 年以来先后启动“智能电网技术与装备”和“可再生能源与氢能技术”重点专项。2017 年 1 月,国家能源局发布《首批多能互补集成优化示范工程的通知》^[16],“公布了首批 23 个多能互补集成优化示范工程项目,要求在完成第一批示范工程建设的基础上,到 2020 年,各省(区、市)新建产业园区采用终端一体化集成供能系统的比例达到 50% 左右,既有产业园区实施能源综合梯级利用改造的比例达到 30% 左右;国家级风光水火储多能互补示范工程弃风率控制在 5% 以内,弃光率控制在 3% 以内。”

1.4 德国

德国政府一直提倡安全、清洁、经济、可持续的能源供应,全球率先实施以可再生能源为主的能源转型,致力于探寻和构建安全可持续、经济清洁的能源供给系统。德国于 2010 年 9 月发布《能源战略 2050》^[17],提出到 2050 年实现能源转型的中长期发展路线,即以可再生能源为核心,建立适应可再生能源的智能电网。围绕这一能源战略,德国重视从能源系统层面推进转型。2015 年 9 月,德国联邦教研部(BMBF)启动“哥白尼计划”^[18],拟在十年内投入 4 亿欧元开发高比例可再生能源集成的系统解决方案,其中开发新型电网架构和加强能源系统的协同集成是两大重点研究方向。在“哥白尼计划”框架下,德国于 2015 年分别实施了 ENSURE 项目和 ENavi 项目^[19]。ENSURE 项目的主要研究领域包括:包含储能的能源网络,电、热、气系统的耦合,智能电网需求侧管理,适应高比例可再生能源电力的配电网络,创新输电技术,欧洲高压直流输电网,海岛电网。ENavi 项目则通过建立模型来模拟和评估政策对能源转型的影响,其研究目的旨在深入了解能源

与工业、消费等相关领域的复杂能源网,提供考虑政策和法律等条件的未来能源系统整合方案,评估政策措施对能源系统的短、中、长期影响,并为跨学科研究提供优先选择措施。2018 年 9 月,德国政府通过了第七期能源研究计划,将在 2018—2022 年间提供总计约 64 亿欧元的资金用于能源转型,尤其关注能源系统集成、电网优化改进、储能和终端用能耦合等问题^[20]。

1.5 日本

日本能源资源较为匮乏,能源消费严重依赖进口,能源安全风险较高,为此日本政府将降低对能源进口依赖、改善能源自给率作为其能源战略关注的重点。2002 年日本政府确定了兼顾能源安全 (Energy Security)、经济发展 (Economic Growth) 和环境保护 (Environment Protection) 的能源政策 (简称 3E 政策) 基本方针,并在这一方针指导下开始推动智能电网的发展。2010 年,日本经济产业省发布《智能电网国际标准化路线图》^[21],确定了输电系统广域监视控制系统、电力系统用蓄电池、配电网管理、需求侧响应、需求侧用蓄电池、电动汽车、先进测量装置等七大重点技术领域,以及 26 个重大技术攻关项目。福岛核事故后,日本政府在《第四期能源基本计划》^[22]中将安全性 (Safety) 确定为能源政策的前提,确定“3E + S”基本方针,提倡发展灵活的能源供需系统,实现多种能源之间的“无缝”衔接与互补。2016 年 4 月,日本相继公布能源中期和长期战略方案:一份是经济产业省面向 2030 年产业改革发布的《能源革新战略》^[23],将“构建新型能源供给系统”列为三大改革主题之一,提出利用物联网 (IoT) 技术调控电力,将家庭用电太阳能设备、蓄电池等与 IoT 相结合,建立一套高效调控电力供需、提高能源效率的机制;另一份是日本政府综合

科技创新会议面向 2050 年技术前沿发布的《能源环境技术创新战略》^[24],确定了到 2050 年将重点推进的五大能源技术创新领域,并在能源系统集成领域,提出利用大数据分析、人工智能、先进传感和 IoT 技术构建多种智能能源集成管理系统。此外,日本政府高度重视将氢能纳入到未来的综合能源体系中,2017 年底,日本发布《氢能基本战略》^[25],确定了到 2030 年左右实现氢能发电商业化的目标。2018 年 7 月,日本发布《第五期能源基本计划》^[26],提出建立以氢能为基础的二次能源结构,充分利用人工智能和 IoT 等技术构建多维、多元、柔性的能源供需体系。

2 关键前沿技术与发展趋势

多能互补系统针对不同的能源资源条件和用能对象,需将多种能源形式进行有机耦合,同时进行终端用能的优化整合,还需在系统管理环节确保效率、灵活性和供应安全。所涉及的关键技术主要包括:分布式能源、多能混合建模、综合能量管理系统、协调优化控制系统、储能技术等。各国围绕上述关键技术开展了大量的研究工作,并取得了一系列的成果,为多能互补能源系统的构建和应用积累了关键的技术知识。

2.1 分布式能源的前沿技术领域

多能互补系统中的分布式能源通过风力发电、光伏发电、太阳能集热发电、燃气轮机、先进热泵及燃料电池等技术。将分布式能源系统布置于配电网或负荷附近,同时注重与能源转换站、能源集线器、用户端智慧用能及计量设备、智能电动汽车等技术相结合,实现多种能源综合利用的供能网络。分布式能源系统的类型多样,有小规模、小容量、模块化、可独立输出电能的风能、太阳能、地热能、燃料电池等系统,还有将高品位能源用于发

电,同时利用发电机组排放的低品位能源进行供热或制冷的热电联供或冷热电联供(CCHP)系统。

近年来,许多学者探索将可再生能源用于CCHP的不同集成方式,如可再生能源既能作为CCHP的输入能源,又能与天然气CCHP系统相互补充。Sanaye^[27]等将太阳能用于CCHP系统,通过光伏、聚光光伏/光热以及真空管集热器提供电力和热量。Soheyli^[28]等提出了一种集成光伏发电、风力发电和固体氧化物燃料电池(SOFC)的新型CCHP系统,可大大降低燃料消耗和污染排放。而Wang^[29]等提出了一种基于天然气和生物质气化气体的混合燃烧CCHP系统,并对不同燃料混合比的系统性能和成本进行了全面分析。Gazda^[30]等则将太阳能和沼气用于CCHP系统,以沼气驱动内燃机发电并结合光伏发电进行供电,同时利用沼气CCHP在天然气锅炉辅助下进行供热,并通过吸收式制冷机供冷。Mehr^[31]等将污水处理厂产生的沼气用于CCHP系统,通过SOFC进行发电,将天然气作为补充燃料,使污水处理厂的效率提高了17.2%,发电量增加了27%,同时降低了燃料消耗。

2.2 多能混合建模的前沿技术领域

多能混合建模描述了不同类型能源的运行和互补转化,确定了能量流分布,是集成优化和其他关键技术的基础。传统电、热(冷)、气等领域已经有相对成熟的独立建模方法,如电网建模主要使用潮流模型,供热网络采用的模型包括水力工况和热力工况模型等。然而上述各自独立的能流模型并不适用于多能互补网络的多能流耦合情况,由于涉及多个能量系统,每个系统需满足不同的物理定律,每种能量流的传输速度、形式和介质不同,涉及的变量也不同。因此,与传统的电力系

统相比,多能互补系统的潮流计算问题包含的变量更多、非线性更强,求解也将更加复杂^[32]。目前受到广泛认可的多能互补系统通用建模方法是能量枢纽(Energy Hub,EH)。

自2007年瑞士苏黎世联邦理工学院Martin^[33]等提出EH概念以来,许多研究者对这一概念进行了优化和改进,在EH的输入、转换、储存和输出四个方面开展了大量研究:Mitchell^[34]等将电力、沼气和天然气作为EH的能量输入,优化了EH模型的电负荷和热负荷供应,提供了造纸厂最低成本和最大限度使用沼气的设计方案。Orehounig^[35]等使用EH模型规划了瑞士村庄的能源供应系统,基于EH分析提出的解决方案增加了可再生能源份额,降低了碳排放。区域供热网络可以降低燃料消耗和排放,可利用垃圾焚烧热量及工厂余热,Wang^[36]等基于热电联供研究了区域供热系统的最佳规划方案,有望实现100%可再生能源供应。Sharif^[37]等利用EH模型,开发了包含燃气轮机、风力发电、光伏电池和制氢电解槽的多能系统代替燃煤电厂和天然气发电厂,不仅能提高系统的整体效率,还可显著降低成本和碳排放。

2.3 综合能量管理系统的前沿技术领域

能量管理系统是系统稳定运行的重要保障,通过信息流调控能量流来保障多能互补系统安全高效运行。尽管面向传统电网的能量管理系统经过50多年的发展已经较为成熟,却无法直接用于多能流耦合的多能互补系统,亟需发展面向多能互补系统的综合能量管理系统。

目前,国内外在多能互补系统综合能量管理方面的研究仍处于初级阶段。众多研究以微电网为对象,已有部分微电网具备了初步的综合能量管理功能,实现了基础优化调度,但尚未实现多能

流的高级分析决策^[38]。如 Su^[39]等考虑了集成风能、太阳能、插电式电动汽车、分布式发电机和分布式储能的微电网,通过随机调度优化来降低微电网的运行成本和功率损耗,提高对波动性可再生能源的适应,并通过仿真验证了随机微电网能量调度模型的有效性和准确性。Farzan^[40]等对不确定条件下微电网的日前调度和控制进行研究,开发了可规避风险的随机规划优化模型。多能互补系统的综合能量管理研究可以微电网的研究成果为基础,但需解决“多能流耦合”“多时间尺度”“多管理主体”三方面问题,建立包含实时建模与状态估计、安全分析与安全控制、优化调度以及能量管理的理论体系,开发综合能量管理系统,并在实际多能互补系统中进行验证。

2.4 协调优化控制系统的前沿技术领域

由于多能互补系统中存在多种形式的能源,因此需要对多种能流进行协调优化控制以确保系统的安全稳定运行。目前,针对微电网、能源互联网的电力控制方面研究较多,但总体而言多能互补系统的协调优化控制研究尚处于起步阶段。

基于多智能体系统的分布式协同控制是实现多能互补系统协调控制的重要途径,依托信息通讯技术,多能互补系统内的各分布式设备可以实现协同合作,对整个系统内的可控能源进行协同调度,实现故障诊断、故障恢复、状态监控、系统控制等功能,保证系统的安全和稳定运行。Ren^[41]等针对含分布式电源的配电网设计了一种多智能体系统,利用各智能体的自治性、主动性和社会性等特征,实现对各节点设备的实时控制,确保系统的可靠运行。Teng^[42]等开发的混合式多智能体系统,各智能体在多层分散模式下工作,可通过不同相和同层级智能体间的协同合作应对故障问题,实现故障检测和自愈控制。上述研究仍专注

于利用多智能体实现电力的协同策略研究,多能互补系统对冷、热能源调度比电力调度更加滞后,且不同类型能源系统的运行约束和控制变量也有所不同,其协同调度更为复杂,需考虑不同能源形式的多时间和空间尺度的协同调度策略。

2.5 储能技术的前沿技术领域

储能技术是促进多能互补系统发展的关键支撑技术,可以发挥移峰填谷、平滑处理、计划出力跟踪、辅助服务、解决弃电、构建友好型电源、增加系统运行灵活性等众多作用。当前能源系统的储能方式主要有储电和储热两种。其中,储电技术能够解决发电功率和负荷功率之间的不匹配问题,平滑波动性可再生能源发电的输出波动,提高系统灵活性和可靠性,实现多种能源的协调控制。根据存储方式,可将储电技术划分为物理储能(如抽水蓄能、压缩空气储能等)、化学储能(如蓄电池)等大类。不同储能方式各有特点,物理储能一般寿命较长、规模较大,化学储能响应时间快、效率较高,因此应用于不同的场景。抽水蓄能、压缩空气储能和蓄电池储能通常可用于电网的削峰填谷、系统调频,超导磁储能和超级电容器可用于改善电能质量、稳定输出,储热技术则可解决综合能源系统中的热需求和供给的不平衡、平抑需求侧的热负荷波动。

从技术发展成熟度来看,不同技术当前所处的发展阶段也有所不同,抽水蓄能、铅酸电池、液态锂离子电池和超级电容器均已进入商业应用的成熟阶段,而固态锂电池(包括固态锂离子和固态锂金属)、钠离子电池尚处于原理样机开发阶段。

3 研发创新能力定量分析

专利信息能够从一定程度上反映领域的主要

技术主题和研发发展态势,本节利用科学计量的方法,选取多能互补系统的重要技术——分布式能源(多能互补系统是传统分布式能源应用的拓展,是一体化整合理念在能源系统工程领域的具象化,因此对分布式能源进行专利分析能够一定程度上反映多能互补系统的研究现状),通过对相关专利进行分析,能够从专利计量角度揭示出技术现状、特征和发展趋势。

3.1 数据来源与分析方法

本次分析通过德温特创新索引数据库(DII)检索获得了全球分布式能源相关专利数据集,数据检索时间截至 2019 年 4 月 11 日,共得到相关专利 11403 项。利用德温特数据分析器(Derwent Data Analytics,DDA)进行专利数据挖掘和分析。

3.2 整体发展态势

从分布式能源技术专利申请数量的年度变化情况来看(图 1),全球的分布式能源技术专利申请可大致分为以下几个阶段:

1974—1992 年,这段时期相关专利申请处于起步阶段,全球年均申请量在 1~5 项,是分布式能源技术兴起时期,第一项分布式能源技术相关专利申请于 1974 年。1993—2005 年,分布式能源技术进入发展期,该时期的专利申请量从 1993 年的 14 项逐步上升到 2015 年的 73 项。欧美国家重视节能环保,在该时期大力发展分布式能源。日本能源资源相对匮乏,一直致力于分布式能源技术的开发,是亚洲能源利用效率最高的国家,截至 2005 年已建成分布式能源系统 6000 多个。2006—2013 年,分布式能源技术不断发展、完善,相关专利技术申请量持续上涨。截至 2013 年,专利申请量达到 594 项。2014—2018 年,分布式能源技术呈现“井喷式”发展趋势,2018 年达到历史高峰期,专利申请量达到 2089 项,全球的市场需

求与产业规模迅速扩大。

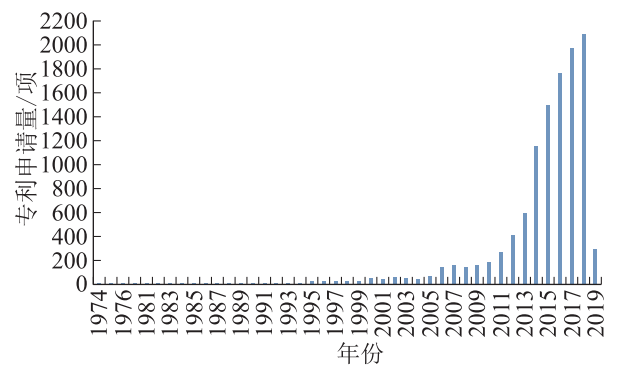


图 1 分布式能源技术专利申请趋势

Fig. 1 Global Patent Application Trend in Distributed Energy Technology

3.3 技术主题分析

通过对技术的国际专利分类(IPC)进行统计分析,可以准确、及时地获取该领域涉及的主要技术主题和研发重点。本次分析的 11403 项专利中共涉及 4676 个 IPC 分类号。表 1 列出了分布式能源技术专利申请量大于 200 项的 IPC 分类号及其申请情况,这些分类号涵盖了 8585 项专利,约占全部分析专利的 75%。可以看出,分布式能源技术专利申请主要集中在四个领域:1)供电或配电的电路装置或系统;电能存储系统(H02J-003/38、H02J-007/35、H02J-003/00、H02J-013/00 等);2)光伏电站;与其他电能产生系统组合在一起的光伏能源系统(H02S-010/12、H02S-010/00 等)以及光伏模块的支撑结构(包括 H02S-020/30、H02S-020/32);3)特殊用途的风力发动机;风力发动机与受它驱动的装置的组合;安装于特定场所的风力发动机(包括 F03D-009/00、F03D-009/25 等);4)专门适用于行政、商业、金融、管理、监督或预测目的的数据处理系统或方法(包括 G06Q-010/06、G06Q-050/06 等)。

3.4 主要国家/地区分析

图 2 展示的是分布式能源技术优先权专利数

表 1 分布式能源技术主题布局及专利申请情况(截至 2018 年)

Tab. 1 Distributed Energy Technology Layout Based on Subjects and Patent Application (as of 2018)

IPC	专利申请量 /项	分类号含义	近三年申请量 占总量的比例
H02J-003/38	2508	由两个或两个以上发电机、变换器或变压器对 1 个网络并联馈电的装置	48. 05%
H02S-010/12	2330	混合风力光伏能源系统	69. 14%
H02S-010/00	1840	光伏电站;与其他电能产生系统组合在一起的光伏能源系统	53. 86%
H02J-007/35	1029	有光敏电池的	65. 21%
H02S-010/10	835	包括辅助电力能源,如混合柴油光伏能源系统(燃气轮机设备组合入 F02C6/00)	69. 10%
H02J-003/00	788	交流干线或交流配电网络的电路装置	41. 88%
H02J-013/00	747	对网络情况提供远距离指示的电路装置,例如网络中每个电路保护器的开合情况的瞬时记录;对配电网络中的开关装置进行远距离控制的电路装置,例如用网络传送的脉冲编码信号接入或断开电流用户	44. 44%
G06Q-050/06	628	电力、天然气或水供应	63. 85%
H02J-007/00	515	用于电池组的充电或去极化或用于由电池组向负载供电的装置	42. 52%
H02J-003/32	489	应用有变换装置的电池组	53. 78%
H02J-003/46	479	发电机、变换器或变压器之间输出分配的控制	43. 84%
H02S-020/30	349	可移动或可调节的支撑结构,如角度调整	81. 09%
H02M-007/48	344	应用有控制极的放电管或有控制极的半导体器件的	25. 87%
H02S-010/20	325	以能量存储装置为特征的系统	52. 31%
H02S-020/32	318	专门用于太阳能跟踪的光伏系统支撑模块	66. 04%
F03D-009/00	306	特殊用途的风力发动机;风力发动机与受它驱动的装置的组合;安装于特定场所的风力发动机(产生电能的混合风力光伏能源系统入 H02S10/12)	37. 91%
F03D-009/25	299	被驱动装置为电能产生装置	89. 30%
F03D-009/11	276	贮存电力	89. 49%
H02S-040/38	249	结构上与光伏模块连接的能量存储装置,如电池	65. 86%
H02J-009/06	240	带有自动转换功能的紧急备用电源回路装置	49. 17%
G06Q-010/06	225	资源、工作流、人员或项目管理,例如组织、规划、调度或分配时间、人员或机器资源;企业规划;组织模型	76. 00%
G06Q-010/04	217	预测或优化,例如线性规划、“旅行商问题”或“下料问题”	62. 67%
H02J-003/28	206	用储能方法在网络中平衡负载的装置	59. 22%

量最多以及专利受理数量较多的国家或机构(世界知识产权组织(World Intellectual Property Organization, WIPO)和欧专局)。从图中可以看出,全球分布式能源技术相关专利的研发主要集中在中国(包括台湾)、日本、美国、韩国、澳大利亚、加拿大、德国、俄罗斯等国家以及 WIPO 和欧专局两个机构。其中,中国、日本、美国三个国家的专利申请数量(10587 项)大概占全球分布式能源技术专利申请总量的 90% 左右,特别是中国占全球

申请总量的 70% 左右。可见,中国、日本、美国是分布式能源技术的主要研发国家。

图 3 给出了主要国家或地区分布式能源技术专利申请年度分布情况。总体看来,美国、日本的分布式能源技术起步较早,从 20 世纪 70 年代就开始申请相关专利,一直持续至今,专利申请量呈长期的上升趋势发展。又如法国、德国等国家,尽管在 20 世纪 70 年代至 80 年代间申请过分布式能源技术相关专利,但是相比其他几个国

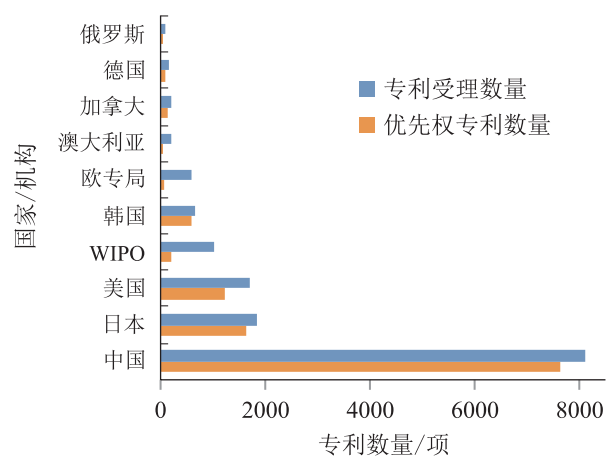


图 2 主要国家/机构分布式能源技术专利申请与受理情况

Fig. 2 Application and Acceptance of Distributed Energy Technology Patents in Major Countries or Institutions

家,后期的相关的专利申请呈较慢发展趋势。相比之下,我国的分布式能源技术起步较晚,从 2003 年开始才有分布式能源技术相关专利的申请。

具体来看,日本从 20 世纪 80 年代开始分布式能源技术相关专利申请,而美国则从 1976 年开

始申请第一件分布式能源技术专利。从时间年度上比较,日本在 1993—2002 年、2006—2009 年以及 2015—2017 年三个时间段,申请量皆大于美国,处于比较平缓的上升趋势,到 2017 年达到高峰期 124 项。同样,美国分布式能源技术发展也处于较为平缓的上升趋势,在 2015 年达到高峰期,有 105 项专利申请。相比之下,我国是虽然从 2003 年开始申请专利,但是在 2011 年的时候,专利申请量即超过日美两国,后续呈现爆发式增长,远远拉大了与其他国家的距离。2017 年,中国分布式能源技术专利申请数量高达 1559 项,成为全球最大的分布式能源技术专利申请国和受理国。

3.5 主要申请人分析

表 2 列出了全球分布式能源技术专利申请量不少于 50 项的一些机构及其专利申请的时间分布情况。表 3 给出的是主要分布式能源技术专利权人的专利技术区域保护情况。

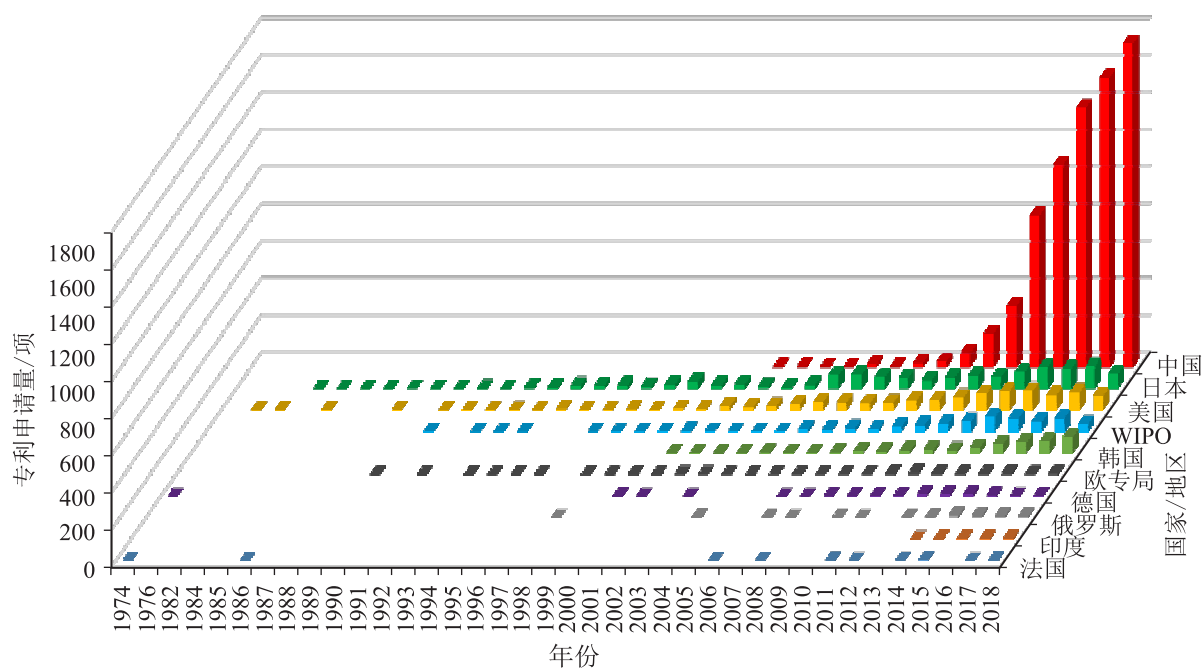


图 3 主要国家/地区分布式能源技术专利申请年度分布

Fig. 3 Annual Application Quantities of Major Countries or Regions in Distributed Energy Technology

表 2 主要分布式能源技术专利权人及其专利申请时间分布情况

Tab. 2 Major Distributed Energy Technology Patentees and Their Patents Application Time Distribution

专利权人	专利申请量(项)			
	总量	2011—2018	2001—2010	2000以前
国家电网(中国)	1161	1125	1	0
京瓷株式会社(日本)	152	146	0	0
华北电力大学(中国)	141	133	1	0
东南大学(中国)	111	110	1	0
日立制作所(日本)	110	51	42	16
天津大学(中国)	109	103	3	0
松下电器(日本)	105	92	11	0
日新电机株式会社(日本)	100	20	33	45
通用电气(美国)	98	51	38	7
东芝公司(日本)	81	38	24	19
浙江大学(中国)	73	71	0	0
中国南方电网有限责任公司	72	67	0	0
中国电力株式会社(日本)	71	49	22	0
三菱电机公司(日本)	67	43	14	7
上海交通大学(中国)	63	57	2	0
三星 SDI(韩国)	62	12	49	1
富士电机株式会社(日本)	57	22	19	15
欧姆龙集团(日本)	56	18	24	14
河海大学(中国)	56	55	0	0
无锡同春新能源科技有限公司(中国)	53	53	0	0
关西电力株式会社(日本)	52	13	35	4
上海电力大学(中国)	52	48	1	0
华南理工大学(中国)	51	49	0	0

从机构类型来看,专利权人主要为企业以及高校。其中,国家电网作为国有独资公司,分布式能源技术专利申请总量达 1161 项,占 23 个专利权人申请总量的 40% 左右。

从国别来看,分布式能源技术主要相关专利

表 3 主要分布式能源技术专利权人的专利技术区域保护情况

Tab. 3 Regional Protection of Major Patentees of Distributed Energy Technology

专利权人	专利申请量(项)						
	中国	日本	美国	WIPO	韩国	欧专局	德国
国家电网	1156		1	4			
京瓷株式会社		99		53			
华北电力大学	141						
东南大学	111						
日立制作所	2	67	15	20			5
天津大学	109						
松下电器		64	2	37			2
日新电机株式会社		98		2			
通用电气	1		72	11		11	1
东芝公司		67	3	8		2	1
浙江大学	73						
中国南方电网有限责任公司	72						
中国电力株式会社		71					
三菱电机公司		56	1	10			
上海交通大学	63						
三星 SDI	1		42	1	5	12	
富士电机株式会社		54	1	2			
欧姆龙集团(日本)		43	1	7		4	1
河海大学	56						
无锡同春新能源科技有限公司	53						
关西电力株式会社		51		1			
上海电力大学	52						
华南理工大学	51						

权人中,来自中国机构数量最多,其次是日本,而美国与韩国分别只有一家。具体来看,中国分布式能源技术专利申请量较多的包括国家电网、中国南方电网有限责任公司以及无锡同春新能源科技有限公司等三家企业,其次是华北电力大学、东南大学、天津大学、浙江大学、上海交通大学、河海大学、上海电力大学以及华南理工大学共 8 所高校。从时间上看,中国的主要专利权人都集中在 2011—2018 年间申请专利,除了国家电网外,其他机构的专利技术保护区域全部都只在国内申请相关专利。

日本主要分布式能源技术专利申请机构包括京瓷株式会社、日立制作所、松下电器、日新电机株式会社、东芝公司、中国电力株式会社、三菱电机公司、欧姆龙集团、富士电机株式会社、关西电力株式会社共 10 家企业。京瓷株式会社最初为一家技术陶瓷生产厂商,如今大多数产品与电信有关,包括无线手机和网络设备、半导体元件、射频和微波产品套装、无源电子元件、水晶振荡器和连接器、用于光电通讯网络的光电产品,所以其专利申请都集中在 2011—2018 年间,并且主要布局在日本和进行 IPC 专利申请。而其它企业,诸如日立制作所、松下电器、东芝等,在表 2 中的三个时间段,均有分布式能源技术的专利申请,在中国、日本、美国、韩国以及欧专局等进行专利布局,并进行 IPC 专利申请,非常重视对其专利技术在全球范围内进行广泛、有效保护。

美国的通用电气以及韩国的三星 SDI,从 20 世纪 90 年代开始关注分布式能源技术。主要集中在 2001—2018 年间进行分布式能源技术的研发,并主要在美国、欧洲和 IPC 专利申请。

4 我国发展现状及对策建议

多能互补系统能够应对多种能源在空间和时间上的不均匀分布,因地制宜,综合利用,实现各种能源之间的良性互动,促进可再生能源的消纳,提升供能可靠性,降低环境污染,优化能源结构,获得良好的社会效益和经济效益,对能源转型有着重要意义。我国在多能互补系统的研究开发及工程应用方面均面临许多挑战,在相关规划设计、多能流建模、综合能量管理及协调优化方面均与国际发达国家有一定差距,在多种类型多能互补系统的示范应用方面才刚刚起步。通过对相关国际政策规划的解读以及关键前沿技

术进展和趋势的分析,结合专利的产出分析,对该领域的发展提出以下建议:

1) **注重一体化、智能化的多能互补系统顶层架构设计和区域多样化系统方案开发。**根据我国能源资源结构特点,做好多能互补系统整体布局规划。从能源全系统层优化现有能源系统,着力发展融合化石能源、可再生能源和核能的多能互补系统,突破各能源子系统的互补和综合利用技术。同时,根据不同地区的能源资源特点、用户需求特征等,因地制宜开发多样化的多能互补系统方案,同时总结不同地区能源系统的共性进行集中开发,避免重复导致的资源浪费。

2) **政府部门出台多层次支持政策和做好规划协调,促进多能互补系统发展。**政府相关部门宜从总体布局、关键技术研发、示范项目部署、技术应用补贴等多层面出台相关政策。另外,多能互补系统的部署往往跨部门、跨区域、跨领域进行,因此也需政府做好协调规划工作,为多能互补系统的部署提供良好政策环境。政府规划时宜尽量覆盖整个价值链的利益相关方,综合征求意见和建议,达成共识,以最大可能地调用各方力量。在技术研发和部署过程中引入私营企业的力量,促进公私合作,充分利用市场促进相关技术发展。

3) **在技术研发上,高度关注信息技术和能源技术深度融合的智慧能源技术。**开展不同规模分布式能源系统、智能微网、适合多能互补系统的复杂多能流建模和能量管理技术、需求侧管理技术、大规模先进储能等关键技术的研发和示范,同时开展未来多能融合系统中低碳醇和氢气的制备和规模化利用,开发电制气、电制热、气发电、气制热等能源转化子系统和“车辆到电网”等用户端灵活储能方式的集成方案和示范应用。

多能互补系统的复杂仅通过数值模拟和实验室研究无法充分理解,集成至能源系统和大规模示范是重要途径。多种规模、多种形式的多能互补系统的示范部署有助于增进对多能互补系统理解,提高多能系统规划设计、运行管理和协调调度水平。

4) **树立全球化视野,加快专利布局的国际化进程。**就分布式能源技术而言,尽管我国专利申请量全球第一,但除了国家电网外,其他机构的专利技术保护区域全部都只在国内。与此形成鲜明对比的是,日本和欧美国家十分注重专利布局的国际战略。以日本为例,其分布式能源技术,在中国、日本、美国、韩国以及欧专局等进行专利布局,并进行 IPC 专利申请,非常重视对其专利技术在全球范围内进行广泛、有效保护。因此,为了使自身在国际竞争中处于有利地位,中国企业应正视知识产权问题,加强知识产权布局全球化意识,注重积累以及有效维权。

5) **大力发展多能互补系统相关基础设施,如远距离特高压输电、通信基础设施、储氢及加氢基础设施、智能电表、电动汽车智能充电装置等。**多能互补系统的一些关键技术的应用和普及需建立在完善的基础设施基础之上,政府宜采取激励措施调动社会资源提前开展相关的部署工作,为多能互补系统的应用提供土壤。

6) **加强国际合作与交流,分享成功案例和经验。**一方面借鉴国外发展的成功经验,如日本氢能、智慧城市和智能社区技术,欧洲高比例风能及太阳能集成技术,美国现代化电网、核能-可再生能源混合能源系统技术等,积极主动利用国际创新资源开展适合我国国情的多能互补系统研究。另一方面,借助国际合作交流可以拓展我国在多能互补领域优秀科技成果的应用范围,提高

我国在科技领域的国际影响力,为落实“一带一路”能源合作倡议、推动构建人类命运共同体做出积极贡献。

参考文献

[1]刘秀如. 我国多能互补能源系统发展及政策研究[J]. 环境保护与循环经济,2018,38(7):1-4.
LIU Xiuru. Research on the Development and Policy of Multi-energy Complementary Energy System in China[J]. Environmental Protection and Circular Economy,2018,38(7):1-4.

[2]Congress of United States. Energy Independence and Energy Independence and Security Act of 2007 [EB/OL]. [2018-12-10]. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-110publ140/html/PLAW-110publ140.htm>.

[3]DOE. Grid Modernization Initiative [EB/OL]. [2018-12-10]. <https://www.energy.gov/grid-modernization-initiative>.

[4]DOE. Grid Modernization Multi-Year Program Plan [EB/OL]. [2019-04-18]. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/01/f28/Grid%20Modernization%20Multi-Year%20Program%20Plan.pdf>.

[5]DOE. SunShot Vision Study [EB/OL]. [2018-12-10]. <https://www.energy.gov/eere/solar/sun-shot-vision-study>.

[6]DOE. 2018. Renewable Systems Integration [EB/OL]. [2018-12-10]. <https://www.energy.gov/eere/wind/renewable-systems-integration>.

[7]DOE. Quadrennial Technology Review 2015 [EB/OL]. [2018-12-10]. <https://www.energy.gov/quadrennial-technology-review-2015>.

[8]DOE. Nuclear-renewable Hybrid Energy Systems: 2016 Technology Development Program Plan [EB/

- OL]. [2018-12-10]. <https://www.osti.gov/biblio/1333006>.
- [9] 贾宏杰, 穆云飞, 余晓丹. 对我国综合能源系统发展的思考[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 16-25.
JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan. Thought About the Integrated Energy System in China[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 16-25.
- [10] EERA Joint Programmes. Energy System Catapult. Systems Integration [EB/OL]. [2019-01-29]. <https://es.catapult.org.uk/capabilities/systems-integration/>.
- [11] European Commission. Towards an Integrated Strategic Energy Technology (SET) Plan; Accelerating the European Energy System Transformation[EB/OL]. (2015-09-15). https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_EN_ACT_part1_v8_0.pdf.
- [12] ETIP SENT. 2018. ETIP SNET VISION 2050 [EB/OL]. [2019-04-22]. <https://www.etip-snet.eu/etip-snet-vision-2050/>.
- [13] 国家发展改革委, 国家能源局, 工业和信息化部. 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见 [EB/OL]. [2019-04-18]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201602/t20160229_790900.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Industry and Information Technology of People's Republic of China. Guidelines on Promoting the Development of "Internet plus" Smart Energy [EB/OL]. [2019-04-18]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201602/t20160229_790900.html.
- [14] 国家发展改革委, 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 [EB/OL]. [2019-04-18]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201607/t20160706_810652.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Opinions on the Implementation of Promoting the Construction of Multi-energy Complementary Integrated Optimization Demonstration Projects [EB/OL]. [2019-04-18]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201607/t20160706_810652.html.
- [15] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发“十三五”国家科技创新规划的通知 [EB/OL]. [2019-04-18]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm.
The State Council of the People's Republic of China. Notice of the 13th Five-year Plan for National Science and Technology Innovation [EB/OL]. [2019-04-18]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm.
- [16] 国家能源局. 国家能源局关于公布首批多能互补集成优化示范工程的通知 [EB/OL]. [2019-04-18]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto82/201702/t20170206_2500.htm.
National Energy Administration. The announcement of the First Batch of Demonstration Projects of Multi-functional Complementary Integration Optimization [EB/OL]. [2019-04-18]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto82/201702/t20170206_2500.htm.
- [17] BMWi. Energy Concept for an Environmentally Sound, Reliable and Affordable Energy Supply [EB/OL]. [2019-01-07]. https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- [18] BMBF. Kopernikus-Projekte für die Energiewende

- [EB/OL]. [2019-01-03]. <https://www.bmbf.de/de/kopernikus-projekte-fuer-die-energiegewende-2621.html>.
- [19] BMBF. Kopernikus-Projekt ENSURE [EB/OL]. [2019-01-07]. <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/neue-netzstrukturen>.
- [20] BMWi. 7th Energy Research Programme of the Federal Government [EB/OL]. [2019-01-07]. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/7-energieforschungsprogramm-der-bundesregierung.html>.
- [21] 胡波,周意诚,杨方,等. 日本智能电网政策体系及发展重点研究[J]. 中国电力,2016,49(03):110-114.
- HU Bo, ZHOU Yicheng, YANG Fang, et al. Research on Policy System and Development Priorities of Smart Grid in Japan. Electric Power, 2016, 49(03):110-114.
- [22] 経済産業省. 2014. 第 4 次エネルギー基本計画 [EB/OL]. (2014-04-11). http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/past.html#head.
- Ministry of Economy, Trade and Industry. The Forth Energy Basic Plan [EB/OL]. (2014-04-11). http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/past.html#head.
- [23] 経済産業省. エネルギー革新戦略(概要) [EB/OL]. (2016-04-20). <http://www.meti.go.jp/press/2016/04/20160419002/20160419002-1.pdf>.
- Ministry of Economy, Trade and Industry. Energy Innovation Strategy [EB/OL]. (2016-04-20). <http://www.meti.go.jp/press/2016/04/20160419002/20160419002-1.pdf>.
- [24] 内閣府. 「エネルギー? 環境イノベーション戦略(案)」の概要 [EB/OL]. [2019-02-22]. <http://www8.cao.go.jp/cstp/siryohaihui018/siryohaihui018-1.pdf>.
- Cabinet Office, Government of Japan. Energy and Environment Innovation Strategy [EB/OL]. [2019-02-22]. <http://www8.cao.go.jp/cstp/siryohaihui018/siryohaihui018-1.pdf>.
- [25] 経済産業省. 水素基本戦略 [EB/OL]. (2017-12-26). <http://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002-1.pdf>.
- Ministry of Economy, Trade and Industry. Basic Hydrogen Strategy [EB/OL]. (2017-12-26). <http://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002-1.pdf>.
- [26] 経済産業省. 第 5 次エネルギー基本計画 [EB/OL]. (2018-07-03). <http://www.meti.go.jp/press/2018/07/20180703001/20180703001-1.pdf>.
- Ministry of Economy, Trade and Industry. The Fifth Energy Basic Plan [EB/OL]. (2018-07-03). <http://www.meti.go.jp/press/2018/07/20180703001/20180703001-1.pdf>.
- [27] SANAYE S, AHMARDREZA S. Optimization of Combined Cooling, Heating and Power Generation by a Solar System [J]. Renewable Energy, 2015, 80:699-712.
- [28] SOHEYLI S, HOSSEIN S M M, MEHRI M. Modeling a Novel CCHP System including Solar and Wind Renewable Energy Resources and Sizing by a CC-MOPSO Algorithm [J]. Applied Energy, 2016, 184:375-395.
- [29] WANG Jiangjiang, MAO Tianzhi, SUI Jun, et al. Modeling and Performance Analysis of CCHP (combined cooling, heating and power) System based on Co-firing of Natural Gas and Biomass Gasification Gas [J]. Energy, 2015, 93:801-815.

- [30]GAZDA W,WOJCIECH S. Energy and Environmental Assessment of Integrated Biogas Trigeneration and Photovoltaic Plant as more Sustainable Industrial System [J]. Applied Energy, 2016, 169:138-149.
- [31] MEHR A S, MOSAYEBNEZHAD M, LANZINI A, et al. Thermodynamic Assessment of a Novel SOFC based CCHP System in a Wastewater Treatment plant [J]. Energy, 2018, 150:299-309.
- [32]SU Bosheng, HAN Wei, JIN Hongguang. Proposal and Assessment of a Novel Integrated CCHP System with Biogas Steam Reforming using Solar Energy [J]. Applied Energy, 2017, 206:1-11.
- [33]MOHAMMADI MF, YOUNES N, BEHNAM M I, et al. Energy Hub: From a Model to a Concept – A Review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80:1512-1527.
- [34]MITCHELL P, SKARVELIS-KAZAKOS S. Control of a Biogas Co-firing CHP as an Energy Hub [A]. 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2015:1-6.
- [35]OREHOUNIG K, RALPH E, VIKTOR D. Integration of Decentralized Energy Systems in Neighbourhoods using the Energy Hub Approach [J]. Applied Energy, 2015, 154:277-289.
- [36]WANG Haichao, YIN Wusong, ABDOLLAHI E, et al. Modelling and Optimization of CHP based District Heating System with Renewable Energy Production and Energy Storage [J]. Applied Energy, 2015, 159:401-421.
- [37]SHARIF A, ALMANSOORI A, FOWLER M, et al. Design of an Energy Hub based on Natural Gas and Renewable Energy Sources [J]. International Journal of Energy Research, 2014, 38(3): 363-373.
- [38]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 Managemnet for Multi-energy Flow: Challenge and Prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15):1-8.
- [39]SU Wencong, WANG Jianhui, ROH J. Stochastic Energy Scheduling in Microgrids With Intermittent Renewable Energy Resources [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4):1876-1883.
- [40]FARNAZ F, JAFARI M A, MASIELLO R, et al. Toward Optimal Day-Ahead Scheduling and Operation Control of Microgrids Under Uncertainty [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2):499-507..
- [41]REN Fenghui, ZHANG Minjie, SUTANTO D. A Multi-agent Solution to Distribution System Management by Considering Distributed Generators [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2):1442-1451.
- [42]TENG Fei, SUN Qiuye, Xie Xiangpeng, et al. A Disaster-Triggered Life-support Load Restoration Framework based on Multi-Agent Consensus System [J]. Neurocomputing, 2015, 170:339-352.

作者贡献说明

郭楷模:主要国家战略分析和文章初稿撰写;

岳 芳:资料收集和分析;

陈 伟:资料收集和分析;

马廷灿:专利数据分析;

欧桂燕:专利数据采集和分析;

耿笑颖:资料收集和分析。