

城镇能源互联网示范应用综述:现状、经验及展望

郑玉平^{1, 2, 3}, 王 俊^{1, 2, 3}, 杨志宏^{1, 2, 3}, 滕贤亮^{1, 2, 3}, 杜 炜^{1, 2, 3}, 王 丹⁴

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 211106;

2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏省南京市 211106;

3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏省南京市 211106;

4. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 300072)

摘要:中国在城镇化进程中城镇能源系统存在着综合能效偏低、清洁能源占比不足、碳减排压力大等共性问题,建立城镇能源互联网示范样板工程,对推动中国城镇化建设具有重要意义。中国的城镇能源系统不同于其他国家,其示范工程的建设与示范也应有其特殊性。为此,文中首先综述了国内外在城镇能源互联网示范工程建设与示范方面的探索与实践,着重介绍江苏扬中和天津北辰两个中国南北典型特色城镇在新型城镇能源互联网示范工程方面做出的探索。在此基础上,进一步提炼出中国城镇能源互联网示范工程实践的普遍性问题,并结合中国新型电力系统建设的现状与挑战,对中国未来推动城镇能源互联网建设提出了相关建议。

关键词: 城镇化; 能源互联网; 综合能源系统; 能源规划; 优化运行; 能源交易; 综合效益评价; 示范工程

0 引言

国家发改委印发《2022年新型城镇化和城乡融合发展重点任务》,明确指出要提高新型城镇化建设质量,加快推进新型城市建设,有序推进城市更新^[1]。城镇化与能源发展始终相辅相成、密切关联,城镇化进程加速促使能源整体消费水平提高,高耗能产业的迅速发展导致污染物排放急速增加^[2-3]。2020年9月,习近平总书记在第七十五届联合国大会上提出“30·60”双碳目标;中央财经委员会第九次会议指出,为实现“30·60”双碳目标,要构建以新能源为主体的新型电力系统^[4-5]。

中国的城镇化进程是世界历史上规模最大、速度最快的。不同于其他国家,中国的新型城镇化具有“城乡统筹、城乡一体、产城互动、节约集约、生态宜居、和谐发展”六大特征,基于城镇资源禀赋与区域用能特性,以城镇为依托,利用各类能源耦合装置将分立的能源、网络以及用户相联,构建城镇能源互联网。城镇能源互联网具有互联互通、产消一体、交

易多元等特点^[6],从供用能方式转变入手,引导供能结构转变,通过多能多端互联互通实现能源消费清洁低碳化、能源资源利用集约化、能源价值灵活共享化、多能耦合信息物理紧密化,在供用能成效方面实现综合能效提升、碳排放降低等目标。

然而,目前城镇不同能源子系统的发展互相割裂、统筹融合不足,电、冷、热、气深度耦合的多能源供应系统、控制系统和转换系统尚不健全,使得不同能源供给、储备以及输配网络建设之间缺乏深度融合^[7-8],导致城镇能源集约利用不足、能源利用率低、输配效率低等问题,尤其在应对重大公共危机事件时,不同能源子系统之间信息传递低效,容易引发反应滞后和处理不及时等问题^[9],危害城镇能源安全。

因此,为推动城镇能源互联网建设,需要明确现有示范应用条件的适应性与不足,探索系统建设与实践模式。目前,学界为了应对这些挑战,在概念设计、物理信息系统建设、数字化建设等方面已经做了诸多研究,在不同模式下,德国、美国、英国、中国等也都做了相关探索。其中,在国家重点研发项目指导下,江苏扬中和天津北辰初步打造了具备中国南北城镇典型特色的新型城镇能源互联网示范工程,本文着重介绍其示范架构、服务体系、工程概况、典型场景与建设成效,并结合中国新型电力系统建设

收稿日期: 2022-05-17; 修回日期: 2022-07-25。

上网日期: 2022-08-18。

国家重点研发计划资助项目(2018YFB0905000); 国家电网公司科技项目(SGTJDK00DWJS1800232)。

的现状与挑战,对中国未来推动城镇能源互联网建设提出了相关建议,希望能够为未来中国新型城镇的发展提供一些借鉴。

1 国内外城镇能源互联网实践综述

国内外的城镇能源互联网发展与实践,整体上经历了从概念设计到物理信息系统建设,再到数字化建设的过程。如图1所示,城镇能源互联网的概念设计可以追溯到20世纪70年代,起步于欧美,包括美国的世界电能网络概念^[10]、瑞士能源路由器理论^[11]、欧盟的网元互联概念^[12]、英国曼彻斯特的用户互动策略^[13]等。2012年,杰里米·里夫金提出能源互联网是第三次工业革命的核心之一^[14]。2014年中国中央财经领导小组会议明确了能源革命战略思想^[15],城镇能源互联网进入物理信息系统建设阶段。2016年中国国家发改委、能源局和工信部联合发布《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》^[16]。2017年中国国家能源局公布首批55个能源互联网示范项目^[17],国内城镇能源互联网在此期间快速发展。根据互联区域的大小与连接方式,能源互联网分为城镇级、区域级和用户级^[2,18],城镇级能源互联网以电、气为主要能源形式,集成大规模集中式清洁能源;区域级能源互联网涵盖电、气、冷、热多种能源形式,涉及源、网、荷、储,灵活性资源丰富,集成多类中小型分布式清洁能源、储能;用户级能源互联网系统规模较小,以分布式源-荷-储为主。中国上海、天津、苏州、深圳等地开展了不同层级能源互联的示范应用。数字化建设阶段,2021年中国杭州亚运村、天津津门湖新能源车综合服务中心等地先后开展了云-网-端融合的能源互联网数字化建设,2022年《“十四五”现代能源体系规划》发布^[19],明确指出综合智慧能源+能源数字化是现代能源体系建设的主方向。

针对城镇能源互联网发展与实践的不同阶段,选取具有代表性特征的典型案例进行介绍。

1.1 城镇能源互联网的概念设计阶段

欧洲 E-DeMa 示范项目通过各时段价差机制引导用户节约用电。重点在于建设具有高渗透率分布式能源的社区,将拥有微型热电联产装置的用户、能源供应商、能源销售商、设备运营等多个角色整合到一个系统中,并开展了电量、备用容量等虚拟能源交易^[20-21]。

欧盟 ELECTRA 示范项目针对不同规模、不同电压等级的电网,从运行控制、储能技术、电力市场机制等多个方面展开研究。整体研究思路是以分层



图1 城镇能源互联网示范工程实践历程
Fig. 1 Practice process of urban Energy Internet demonstration projects

分布式的控制策略代替传统的集中控制,提出以“主动负荷、分布式能源与储能单元的网元互联”的概念,从而协调各种分布式能源的接入与就地平衡^[22-23]。

英国曼彻斯特大学通过集成用户监控终端,开发综合能源电、热、气、水系统与用户交互平台,从能源利用模式、能源节约策略和需求响应3个方面对曼彻斯特能源系统进行了改进^[24-25]。

1.2 物理信息系统建设阶段

根据欧美能源互联网示范工程的建设经验,近年来物理信息系统的建设加快。在城镇级,加拿大耶洛奈夫镇作为旅游业为主的城镇,在传统供热系统基础上,增加地源热泵、水电供热、太阳能热风系统、被动式太阳能供暖,通过能源管理中心实现当地工业、商业和农业等行业的各种能源综合管理和利用,提高能源利用效率和可再生能源利用率^[26-27]。

日本柏叶智慧城市通过构建区域能源管理系统,将城市范围内的写字楼、商业场所、居民住宅、储能等能源信息集中处理^[28],减少能源消费开支,提高能源资源的利用效率^[29]。

中国上海崇明岛具有丰富的风能、太阳能、生物质能、潮汐能、地热能等可再生能源^[30],通过构建灵活且具有弹性的智能用电系统,搭建工业、商业、环岛电动汽车供能体系和生态农业,支撑了岛内绿色能源平稳接入电网和分层分区就地消纳。

中国同里新能源小镇是绿色低碳、开放共享、协同高效的能源生态示范小镇^[31]。以配电网为核心,利用电、热、冷、气等多种能源的融合互补能力和源-网-荷-储等多种元素的协调互动特性,提高各类能源的时空互补和逐级利用水平,促进节能减排^[32]。

与城镇级的大规模集群综合用能体不同,区域级能源互联网主要以工业园区能源系统为主。中国北京市科学技术研究院现代制造技术产业园针对供电、供冷、供热系统各自独立运行,缺乏统一的管理、综合能效偏低等问题,在园区内建设能源互联网多能流优化运行系统,将多种能源介质的能量流网络、信息流网络融为一体,实现了园区“电、热、冷”等系统数据的综合利用^[33]。

中国上海迪士尼度假区是全球首个采用分布式电源技术的度假区,建设了冷、热、电和压缩空气四联供^[34-35],通过能源站集中控制系统与用户侧能源管理系统的有效集成,保证站内各系统始终处于高效运行状态,有效降低能源损耗。

中国天津中新生态城的能源供应需求多元,是一个集成多种能源输入、多种产品输出及多种能源转换的能源单元^[36-38]。以能源站为核心,通过停车场光伏发电系统、储能系统、冷热电联供系统构成能源微网,实现冷、热、电的梯级高效利用。

中国南京高速齿轮制造有限公司通过综合能源管控与服务平台,接入园区变电站、配电房、分布式光伏发电、移动储能、充电桩、空调等源-荷-储资源,分层、分类计量厂区建筑和车间设备能效,实现智慧化、精细化管控目标。

用户级能源互联网直接为终端用户供能,主要为以建筑本体为单元的供用能系统。德国朗根费尔德市在社区内开展了用户级综合能源的示范应用,构建社区能源管理系统,为用户提供用能成本最低、新能源消纳率最高和电网支撑3种工作模式^[13],通过用户互动提升能效,降低碳排放。

中国深圳楼宇型综合智慧能源示范工程,综合平衡商业楼宇“降碳、降耗、降费、舒适”等多方需求,在提升用户舒适度前提下,充分运用高效制冷、储能、水(冰)蓄冷技术及可再生能源元素,实现多能互补协调与节能降耗。

中国上海张江能源服务中心智慧楼宇,通过建设楼宇智慧综合操作系统、绿色节能管理系统、智慧楼宇自控管理系统等平台,实现楼宇智慧化、大楼管理智能化、能源管理可视化、平台管理集成化、用户体验扁平化的目标。

中国继远电网产业园区智慧楼宇,通过对光伏、储能、多端口能源路由器、全直流智能建筑、智慧路灯、智慧车棚等的监测、管理、统计、分析、优化手段,实时监测与优化园区楼宇电、水、冷、热等能源的生产和消费情况,促进清洁能源消纳。

1.3 数字化建设

随着5G、物联网、人工智能、云计算等技术的兴起,城镇综合能源的数字化建设也不断推进。中国杭州亚运村未来社区综合能源示范工程在技术上通过智慧云+电力物联网融合软硬件搭建了全感知台区总体架构,构建了未来社区综合能源服务平台。在“宏观”上整合亚运村冷热电多种能源供应方式,使能源高效联动运行,降低亚运村能源使用成本,形成全绿电供应和“零碳”新模式;在“微观”上,通过应用智能空气开关、智能插座等设备,实现细致到“电器级”的智慧用能管理,实现智慧电力数据全覆盖。

中国天津市门湖新能源车综合服务中心是2021年全国7个能源数字化示范工程之一,集“数字化、网联化、智能化”多功能场景于一体,定位高标准建成示范站,聚合全球充电前沿技术,包括普通快充和创新充电技术示范,聚焦国内最先进的充电方式。服务中心建成全国首个车联网体系化运营平台,通过充电设施智能管控,助力打造绿色低碳交通运输体系,实现充电网络全覆盖,有效降低碳排放量,在此基础上构建“光储充换”系统,有效实现清洁能源自给自足,促进区域绿色转型发展。

中国宁波城市级智慧能源管理服务系统,充分应用“大云物移智”等信息化技术,推动能源生产、运输、存储、使用等各环节数据的接入。采用“云平台+微服务”架构,融合政府决策、宏观经济、地域特色等多维度信息,充分运用数字化手段,通过跨部门、跨层级业务协同,实现全品类能源生产、供给、存储、消费数据汇聚和在线监测,有效促进用能信息互联互通,提升能源管理的数字化水平。

从整体范畴来看,城镇能源互联网数字化建设目前主要围绕云-网-端融合开展,在电力、市政、交通等领域已经取得了较多成果。未来新型城镇将具备更高的信息化和数字化水平,从而在整体技术层面形成数字孪生城镇的概念^[39]。数字孪生将使能源系统与城市各领域在数字空间中的互联互通和协同运行成为可能,在支撑城镇发展与高效运行中发挥重要作用^[40-41],是未来城镇能源系统发展的重要方向^[42-43]。

2 城镇能源互联网架构与服务体系设计

2.1 总体架构

在国内外城镇能源互联网的实践经验基础上,总结设计城镇能源互联网示范工程总体架构,如图2所示,具体包括感知层、网络层、平台层、应用层4个部分,通过数据采集装置实现风、光、气、地热、生物质等多种能源形式的数据接入和综合管理,通过能源互联网综合管控与服务平台实现能源管控。

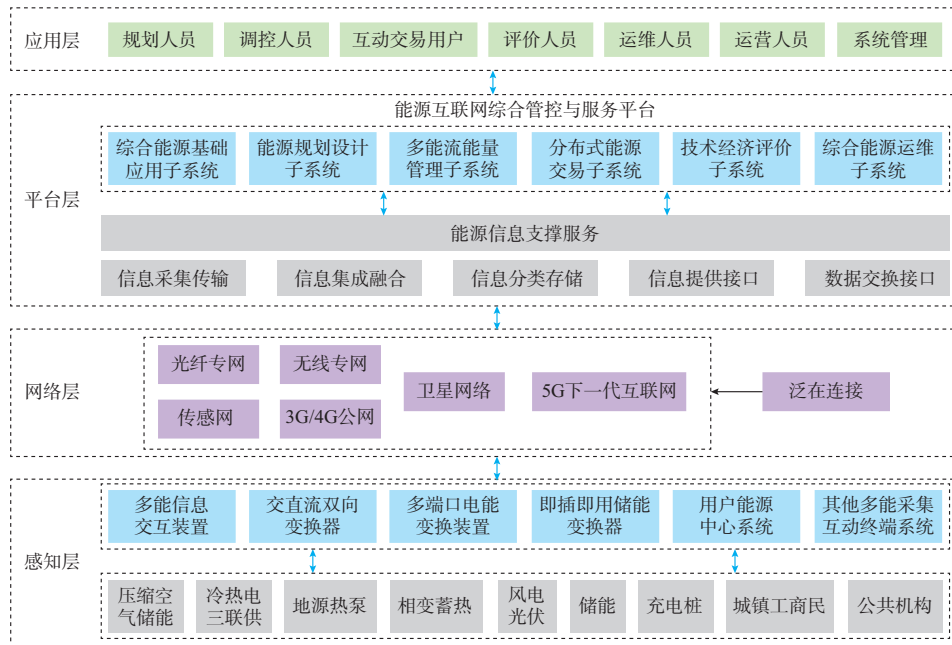


图2 城镇能源互联网示范工程总体架构

Fig. 2 Overall architecture of urban Energy Internet demonstration project

1) 感知层

感知层指城镇能源互联网的能源基础建设,主要包含源端装置、负荷端装置、储能类装置、信息类装置、采集装置、能量转换装置等,如光伏逆变器、储能换流器、传感器、多能信息交互装置、交直流双向变换器、多端口电能变换装置、即插即用型储能变换器等,以及分布式能源本地系统,如光伏系统、储能

系统、冷-热-电三联供系统、地源热泵系统等,城镇能源互联网综合管控与服务通过与这些装置或系统的对接,实现对多类能源的数据采集与控制。

2) 网络层

网络层指城镇能源互联网的网络通信,主要包含电力信息网、电力信息4G专网、公共移动网络等,城镇能源互联网综合管控与服务可以通过电力

信息网与调度自动化、配网自动化、用电信息采集等系统进行数据交互;通过电力信息 4G 专网对各类能源数据进行采集;通过公共移动网络(非电力信息 4G 专网覆盖区域),并部署安全防护装置,对其他各类能源数据进行采集。

3)平台层

平台层指城镇能源互联网综合管控与服务平台,平台功能可以包括能源采集、能源监测、能源分析、能源规划、运行优化、能源交易、技术经济评价、综合能源运维等应用,实现综合能源服务领域的全业务覆盖。同时,设计数据采集与传输、系统集成、信息模型、数据融合、信息交互等方面的接口标准、安全标准,形成完整的新型城镇能源互联网综合管控与服务平台的体系架构。

4)应用层

应用层指城镇能源互联网的各类用户服务,能源互联网综合服务是共享的、开放的、互动的,服务对象多样化,既有供电公司、配售电公司、能源运营商,又有政府机构、能源用户、社会用户。能源互联网综合管控与服务平台通过为不同的用户提供差异性的综合能源服务,提升综合能源服务质量,如为政府机构提供整体的能源运行指标掌控,为供电公司、能源运营商提供多能源的运行优化、管控服务、技术经济评价服务等,为配售电公司、能源用户、能源运营商提供能源交易服务,为能源运营商、能源用户提供能源运维服务,为各类用户提供能效分析服务等。

2.2 服务体系

构建城镇能源互联网管控与服务体系是城镇能源互联网建设与可持续发展的核心内容。城镇能源互联网管控与服务体系是以智慧城市为载体,以城镇综合供用能服务为核心,以“互联网+”为手段,充分考虑城镇的资源特色与用户用能特点,通过实现城镇内不同类型的能源资源互联互通、协同优化、供需互动、服务模式创新,建立健全能源市场、标准体系、保障体系等,构造城镇绿色低碳、安全高效的现代能源生态体系。

城镇能源互联网管控与服务体系由“1个平台”和“3个支撑服务”组成。1个平台指城镇能源互联网管控与服务平台,平台基于云架构建设,与城镇的用户端能源系统实现上下贯通,并在线为城镇中各类能源用户提供应用。3个支撑服务指城镇能源管控服务、能源服务及技术支持服务,其中城镇能源管控服务实现城镇能源的顶层设计,主要包括能源发

展、市场机制、能源监管、评估评价、法律法规等,能源服务包括面向各类用户提供的差异化的综合能源服务及商业模式,技术支撑服务指实现城市综合能源系统贯通及跨行业融合所需的装置、信息集成等标准。

构建能源互联网管控与服务体系的内涵如下:

1)通过顶层规划设计,进一步打通城镇综合能源系统源、网、荷、储各环节的能量流、信息流壁垒,实现城镇能源从生产到消费整个环节的互联互通,可解决城镇中不同能源系统之间存在的多环节制约而无法协同高效运行的问题。

2)通过建立标准化服务与保障体系,实现城镇能源管控从注重单个企业、单一产业的能效提升,向全局性、系统性、整体性的能效提升转型升级,实现城镇资源优化配置,推动城镇能源供给向集约化、清洁化转型。

3)能源互联网管控与服务体系为城镇能源互联网建设提供标准和指引,进一步促进能源系统的末端和其他行业的资源融合与互动,提升城镇能源资源的利用水平,促进城镇能源互联网的共建、共享、共赢。

3 江苏扬中绿电消纳能源互联网示范工程实践

3.1 工程概况

中国江苏扬中“城乡一体”效果显著,以光伏为主的可再生能源充足,绿电消纳发展潜力巨大,是远近闻名的“电气岛”“光伏岛”“长江制造业走廊”,是国家级高比例新能源示范城市、全国售电侧改革试点区。如图 3 所示,江苏扬中新坝镇示范区面积约 34 km²,人口约 8 万,2018 年建设初期,示范区内用电量约 650 GW·h,用气量约 1.990×10⁷ m³,光伏装机规模 48.5 MW;光伏数据采集集中化程度不足,绿电消纳技术手段单一,用户用能智慧化水平不高。

江苏扬中新坝镇分布式绿电消纳能源互联网,坚持“清洁替代、能效提高、面向增量、合作共赢”的发展理念,以扬中高新区配售电有限公司为投资主体,通过构建多种能源协同供应转化消费体系,探索能源交易新模式,为配售电公司及其客户提供精细化管理与全面化服务,助力扬中配售电公司提升调配效率与综合能效。示范工程概况如图 4 所示,在城镇级建设综合能源管控与服务平台、无线 4G 专

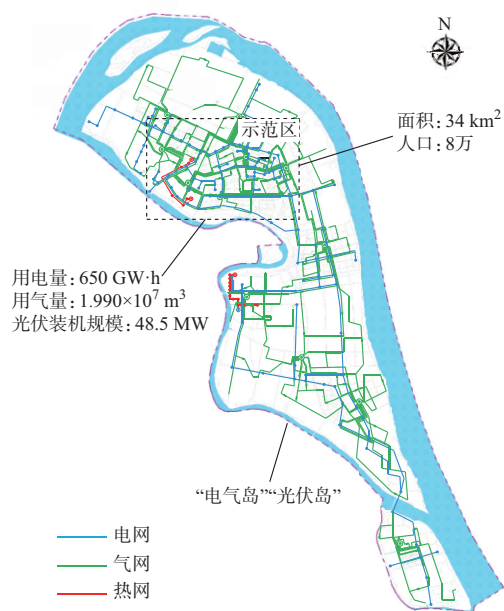


图3 中国扬中能源互联网示范工程2018年概况
Fig. 3 General situation of Yangzhong Energy Internet demonstration project of China in 2018

网,开展分布式光伏数据集中采集改造和配电网升级改造,在区域级建设分布式储能系统和移动式储能系统,用户级开展智慧用能互动、社区用户群电能转换与能量管控平台和交直流混合微电网建设。截至2021年6月,示范区内建有110 kV变电站2座,光伏装机容量为150.1 MW,储能装机容量为10.2 MW/20.2 MW·h,居民太阳能热水器普及率达90%以上,新建建筑基本实现了太阳能光热一体化,年用电量约650 GW·h,用气量约 $3.958 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。



图4 中国扬中能源互联网示范工程概况
Fig. 4 Overview of Yangzhong Energy Internet demonstration project of China

扬中示范工程围绕示范区内能源接入多元化、能源运营一体化、能源服务专业化的目标,构建可复制、可推广的能源互联网建设新模式,开展能源互联网建设,形成了以天然气、太阳能和风能为主要输入能源,在综合能源管控与服务平台的有序调配下,对产能、供能、蓄能、用能、节能等能源供需全过程进行一体化调控和优化配置,面向核心示范区内的所有用户提供高品质的电、热、冷等能源产品,实现综合能源服务。同时,建立分布式绿色能源交易机制,实现电力和热力的互联互通、互相补偿,充分发挥区域内冷、热、电的互补效应,以最小的外部能源供给满足区域内所有能源需求。

3.2 典型场景

江苏扬中新坝镇示范区在供给侧主要通过分布式光伏发电进行供能,具有分布范围广、参与用户多、装机容量大等特点;在用户侧,示范区内的工商业用户分布广泛,负荷密集,具有相当充足的互动光伏量和电力负荷量。但分布式光伏分布区域广、单体容量小,分布式绿电消纳不充分、综合能效偏低;同时,分布式光伏发电的间歇性、波动性等特点使其调节能力严重不足,能源供应需要依靠外部的稳定供应,从而导致弃光现象存在。因此,扬中示范区建设能源互联网的主要目的是解决分布式绿电消纳问题。

3.2.1 能源规划

基于以上场景问题与目标,对扬中示范工程的能源规划包括2个方向:1)加强分布式可再生能源建设,打造以绿电消纳为核心的能源产供销模式,从需求侧提高绿电消纳水平;2)加强能源耦合,提高综合用能水平,打造以多能互补为核心的供用能策略,从供给侧保障能源高效可靠利用。

扬中示范区2018年综合能源建设情况如附录A图A1(a)所示,将扬中示范工程规划建设划分为3个阶段与2个目标,通过对整体网架、分布式可再生能源及互联互通设施(储能、电动汽车、柔性负荷)的时序建设改造,实现上述目标。第1阶段(2018—2021年),以绿电消纳为目标,提升可再生能源与储能的装机容量,加大可再生能源消纳比例,减少弃光现象;第2阶段(2022—2025年),重点对已有能源网络进行扩展规划改造,满足能源发展需求;第3阶段(2026—2030年),加大储能、柔性负荷、电动汽车充电桩等互联互通设施的建设,合理配置能源,最大化接入可再生能源,使终端电力利用率进一步提升,详

细方案如附录 A 图 A1 所示。

2018—2021 年,兼顾绿电消纳与综合用能的规划目标,指导扬中示范区的电力、燃气、热力管道新建扩容改造,如附录 A 图 A1(b)所示。该阶段配置 50 kW/100 kW·h 和 100 kW/200 kW·h 移动式储能各一套,改造接入示范区内包括集中式光伏、工商业和居民分布式光伏共 150.1 MW。

2022—2025 年,在绿电消纳规划优选方案的基础上,考虑碳减排目标和清洁能源占比,建立扬中示范区的新能源装机、多能源网络基础网架扩建规划方案,如附录 A 图 A1(c)所示。该方案以提升绿电消纳为主,增配光伏、风电等新能源设备,兼顾多类型用户负荷需求响应,实现扬中示范区互联互通负荷平衡。

2026—2030 年,基于基础网架扩建规划优选方案,构建绿电消纳和综合用能结合场景,加大系统设备和网架规划投资,新能源设备总容量占比有所下降,主要是由于示范区系统趋于饱和,逐步由网架规划转变为综合用能规划,如附录 A 图 A1(d)所示。该阶段以示范区的综合能效提升为目标,重点考虑示范区内部源荷转换前后能效变化,促进示范区的高效绿色发展。

3.2.2 能源交易

截至 2021 年底,扬中示范区内普通居民光伏用户为 1 985 户,装机容量达到 30 MW,具备开展分布式能源点对点(peer to peer, P2P)交易的条件。以示范区内永治小区用户信息为基础,选取其中 100 户,根据其实际发用电数据开展模拟交易,实现“隔墙售电”。

首先,融合数据特征提取与分析、自适应预测模型及不确定性量化等方法,建立组合集成深度学习的多能“源荷”概率预测方法,结合扬中示范区内全天空成像仪的气象监测信息,利用分类算法自适应加权组合多个初级集成深度模型,预测市场交易用户的发用电功率,量化预测结果的不确定性,如附录 A 图 A2(a)至(d)所示。概率预测方法克服了传统方法在波动性、随机性强的多能“源荷”数据上预测困难的问题,实现了电/热负荷、光伏/风电等多能“源荷”的不确定性量化。如表 1 所示,扬中示范区内的光伏短期预测(日前)精度达 88% 以上,小时级预测精度达到 91% 以上;电/热负荷短期预测(日前)精度达 92% 以上,小时级的预测精度超过 94%。并且实现了预测不确定性 90% 置信区间的量化,光

伏、风电、电负荷、热负荷的预测区间置信水平偏差分别小于 1.8%、2.2%、1.5% 和 1.4%,为能源交易提供了可靠的预测结果和不确定性量化信息。

表 1 中国扬中分布式光伏及电/热负荷预测性能
Table 1 Prediction performance of distributed photovoltaic and electric/thermal load in Yangzhong of China

预测类型	光伏预测精度/%	电/热负荷预测精度/%
提前 1 h 预测	91.02	94.50
日前预测	88.83	92.50

在此基础上,构建基于连续匹配的 P2P 撮合交易机制,考虑月度和季节性影响,按月开展分布式交易。分布式绿电交易如附录 A 图 A2(e)所示,在 7 月份,100 户用户全部参与交易,包括 72 个购售电用户和 28 个购电用户。用户在系统中按照交易申报、订单撮合、安全校核、合约执行和交易结算的流程进行交易,结果显示交易均价为 0.46 元/(kW·h),总交易量达到 9 156 kW·h,交易金额为 4 219 元。在该月,用户平均购售电价格分别为 0.45 元/(kW·h)和 0.42 元/(kW·h),社会福利达到 725.11 元。在整个模拟周期内,用户整体的购电支出降低了 2.68%、售电收入提升了 11.93%。扬中分布式绿电交易机制有效缓解了传统集中式电力交易市场环境下分布式发电的竞争力受限问题,可为用户提供更具主动性和灵活性的能源市场,促进分布式发电发展,实现分布式可再生能源的就近消纳。

3.3 建设成效

北辰示范工程于 2018 年 7 月开始建设,2020 年 7 月开始投运。以 2017 年 7 月至 2018 年 6 月作为基准年,2020 年 7 月至 2021 年 6 月作为目标年,从综合能效、清洁能源占比以及 CO₂ 排放 3 个方面分析示范工程建设成效。具体指标计算结果如表 2 所示。与基准年相比,扬中示范工程目标年综合能效提升了 11.3%,清洁能源占比达到 34.39%,碳排放减少了 19.93%。

表 2 中国扬中能源互联网示范工程关键指标计算
Table 2 Calculation of key indicators in Yangzhong Energy Internet demonstration project of China

年份	综合能效/%	清洁能源占比/%	CO ₂ 排放量/t
基准年	45.02	11.02	651 187
目标年	56.32	34.39	521 396
指标变化/%	11.30	23.37	19.93

结合图5可见,扬中示范工程的能效提升主要分为2个阶段,2018—2020年能源基础设施规划建设阶段,通过分布式光伏建设、分布式/移动式储能等多项配套工程提升能效扩展空间,综合能效提升至52.21%;2020—2021年投运阶段,以能源互联网综合管控与服务平台为依托,通过交易运行技术,满足绿电消纳的中短期目标,助力示范区综合能效提升至56.32%。

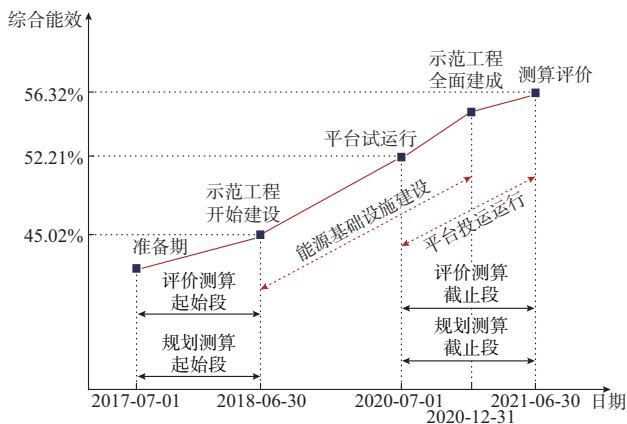


图5 中国扬中能源互联网示范工程综合能效
Fig. 5 Comprehensive energy efficiency of Yangzhong Energy Internet demonstration project of China

江苏扬中能源互联网示范工程以绿电消纳与综合用能为目标,实现了区域绿电大规模发展与消纳,匹配地区负荷增长速度,有效提升了能源互动发展指数、工/商/住及可再生能源消费指数。扬中能源互联网示范工程能流变迁如附录A图A3所示,2017年扬中示范区供给侧清洁能源比例较低,损耗比重大,综合能效较低,能源结构有待优化。经过示范建设,2021年示范区供给侧清洁能源比例显著提升,绿电消纳比重增加,燃煤发电比重下降,示范区综合能效显著提升。

4 天津北辰清洁供热能源互联网示范工程实践

4.1 工程概况

中国天津北辰大张庄镇地处华北腹地,“产城互动”特征明显,区域内多种业态集中,汇集居民、工业、商业等多样性的能源消费主体,涵盖冷、热、电、气、风、光、地热等多重资源,用热需求量大,是国家北方地区清洁供暖试点城市示范区。北辰能源互联网示范工程2018年概况如附录B图B1所示,北辰大张庄镇示范区面积约20 km²,2018年建设初期,示范区内用电量约100 GW·h,以外部煤电为主;用

气量为 $1.3 \times 10^7 \text{ m}^3$,工业区分散式供热为主,终端用热清洁性不足;电气热统一管理、资源协同互动等方面的能力有待提升。

天津北辰大张庄镇清洁供热能源互联网示范工程以“智慧能源支撑城市转型、服务产业升级”为建设目标,开拓“互联网+”智慧能源政企合作共建新模式。电力公司发起该清洁供热能源互联网项目,与属地政府、属地能源公司和园区企业用户深度合作,以项目带动区域综合能源发展,加快区域能源转型,改善营商环境,促进高端产业落地,推动区域“产城融合”发展。示范工程概况如附录B图B2所示,在城镇级,建设能源互联网综合管控与服务平台,实现城镇综合能源系统的统一管控与服务;在区域级,建设并接入相变蓄热站、直流充电站、分布式储能系统、移动式储能系统,从局部支撑城镇综合能源系统的协调运行;在用户级,建设智慧园区和智慧小区,接入工商业用户和居民用户,同时接入用户能源系统中的风、光、地热等资源,提升用户资源参与城镇综合能源系统协调运行的能力。截至2021年6月,示范区内投产120 MW北宸华电分布式冷热电三联供能源站1座,6.32 MW·h相变蓄热站1座,含3台60 kW直流充放电桩的充电站1座,部署0.5 MW/0.5 MW·h电储能3套。分布式能源规模达到3.061 MW,其中,光伏1.886 MW,地源热泵1.14 MW,风机0.035 MW。

该示范工程以电力为核心,构建了冷、热、电、气综合能源网络,以通信网络支撑能源信息互联,以综合管控与服务平台统筹区域内冷热电三联供、电储能、燃气锅炉、蓄热装置、地源热泵、分布式光伏发电、电动汽车、用户负荷等资源,面向工业用户、商业用户与居民用户提供多种形式的能源服务。

4.2 典型场景

北辰大张庄镇作为典型的北方城镇,冬季供暖面临着巨大的环保压力。示范区内存在能源站,电力供应以大电网供电为主,具备多能源耦合条件,但工业用户仍主要采用分布式设备独立供热,地源热泵恒功率运行,三联供以热定电,供能效率较低。目前一些工业用户仍采用不完全清洁的供热方式,如小型燃煤锅炉,造成一定的碳排放超标。示范区东西部地区能源需求不平衡,东部地区能源需求增长迅速,西部地区能源需求密度较大,现有的能源设施无法满足和平衡东西部的能源增长需求。因此,北辰能源互联网示范工程以清洁供热、多能互补为建

设目标。

4.2.1 能源规划

北辰示范区2018年综合能源建设情况如附录B图B3(a)所示,基于以上问题与建设目标,将北辰示范工程的规划建设划分为3个阶段与2个目标,通过对整体网架、清洁供热系统及互联互通设施(储能、电动汽车、柔性负荷)的时序建设改造,实现清洁供热与综合用能的目标。第1阶段(2018—2021年),依托三联供能源站,建设集中供热管网,采用天然气等清洁能源,经能源站进行清洁供热,提高供热效率,满足用户用热需求增长;第2阶段(2022—2025年),进一步拓展网架,加大基础设施及网架的建设改造,优化变电站及管线布置,解决东西部能源供需不平衡问题;第3阶段(2026—2030年),加大储能、柔性负荷、电动汽车充电桩等互联互通设施的建设,合理配置能源进行削峰填谷,详细方案如附录B图B3所示。

2018—2021年,以清洁供热为目标,对北辰示范区的电力、燃气、热力管道新建扩容改造,利用冷热电三联供能源站向示范区供能,如附录B图B3(b)所示。该阶段配置一套6.32 MW·h的电蓄热装置,部署两套500 kW/500 kW·h的分布式储能与一台500 kW/500 kW·h移动式储能车,并对示范区内22个大用户进行了改造接入。

2022—2025年,基于清洁供热规划优选方案,综合考虑不同类型用户的能源消费指数、能源互动指数和能源发展指数,结合清洁能源占比和碳减排目标,对天津北辰示范区的多能源基础网架进行扩建规划,如附录B图B3(c)所示。示范区逐步以天然气代替原煤进行电、热能量的生产,促进节能减排,降低系统投资成本。

2026—2030年,在清洁供热目标下天津北辰示范区的基础网架规划趋于成熟,此时需要考虑示范区整体的综合用能情况,提升整个综合能源系统的能源利用效率,如附录B图B3(d)所示。在清洁供热和综合能效提升的双重目标下,该阶段将对示范区的网络以及设备进行扩容,进一步提升示范区综合能源系统互联互通水平。

4.2.2 运行优化

北辰示范工程按照“城镇-区域协同、区域-用户互动、用户自律控制”的协同自律框架运行,调节对象包括区域内分布的三联供、蓄热、储能、地源热泵等各类出力设备。基于递阶模型预测控制方法,构建了多

能协调优化调度架构,将综合能源系统优化调度分解为日前计划、日内滚动、实时校正3个不同的时间尺度以安排设备出力。如附录B图B4所示,在日前计划中,根据电热负荷以及分布式能源的预测数据,以用能成本、能效为优化目标,安排第二天的机组组合出力计划。在日内滚动和实时校正环节,随着预测精度的不断提高,按照4 h、15 min的时间维度,滚动更新各类机组的出力计划,协调不同调节速率的资源,逐级消除预测误差和扰动带来的影响。

示范区在上午09:00—11:00出现用电高峰,此时外购电价格较高,根据经济性目标优化,三联供突破以热定电模式,在保证能效的基础上实现了经济运行。由于三联供的时间常数较大,仅安排其跟踪日前调度曲线,跟随效果显示良好。相变蓄热根据分时电价,在夜间蓄热,白天放热,实现了削峰填谷的目标。相变蓄热调节手段灵活,能够依据新能源出力的波动,适当调整运行功率,达到最大程度就地消纳新能源的成效。通过灵活资源的调节,与各类设备独立供能相比,当日运行成本下降6.7万元,总耗能下降144.6 MW·h,碳排降低59.8 t。

4.3 建设成效

北辰示范工程与扬中示范工程建设周期相近,设置同样的基准年与目标年,如表3所示,通过基础能源设施的补强和各级能源管控系统的协调运行,示范区综合能效达到了64.34%,相较于建设初期提升14.06%;终端用能清洁能源占比达到49.43%,相较于建设初期提升21.64%;碳排放减少到236 118 t,相较于建设初期降低36.92%。

表3 中国北辰能源互联网示范工程关键指标计算
Table 3 Calculation of key indicators for Beichen Energy Internet demonstration project of China

年份	综合能效/%	清洁能源占比/%	CO ₂ 排放量/t
基准年	50.28	27.79	374 315
目标年	64.34	49.43	236 118
指标变化/%	14.06	21.64	36.92

如图6所示,北辰示范工程的能效提升主要分为2个阶段,2018—2020年能源基础设施规划建设阶段,通过可再生能源建设、分布式/移动式储能、相变蓄热站、直流充电站等多项配套工程提升能效扩展空间;2020—2021年投运阶段,以能源互联网综合管控与服务平台为依托,实现能源系统运行参数合理配置,满足系统能流优化控制中短期目标,实现示范区综合能效二次提升。

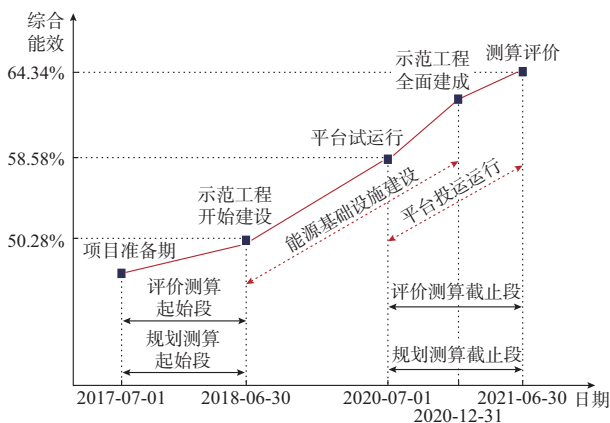


图6 中国北辰能源互联网示范工程综合能效
Fig. 6 Comprehensive energy efficiency of Beichen Energy Internet demonstration project of China

伴随着能源设施建设和投运,天津北辰以清洁供热与综合用能为目标,实现区域集中清洁供热大面积覆盖,解决负荷和资源错配情况,有效提升能源、互动发展指数,工业、商业、居民能源消费指数,以及可再生能源消费指数。北辰能源互联网示范工程能流变迁如附录B图B5所示,2017年北辰示范区供给侧清洁能源比例较低,消费侧电力比重不高,整体示范区综合能效较低,经过示范建设,2021年示范区供给侧清洁能源比例显著提升,消费侧电力比重和清洁供热比重增加,整体示范区综合能效显著提升。

5 对中国特色城镇能源互联网的建议

中国经济发展进入全新时代,由高速增长转向高质量发展阶段。中国特色城镇能源互联网,要以人为本,赋能于民,服务于民。城镇能源互联网的发展需要面向用户用能需求的多样性,形成优质高效多样化的能源供给体系,为用户提供高效、高品质的能源供应服务,支撑中国区域经济的持续健康发展。

5.1 技术手段方面

1)完善城镇能源互联网理论体系。围绕规划、运行、交易、评价、示范应用,建立城镇能源互联网的理论体系,构建从共性关键技术到典型应用示范的全链条解决方案,支撑城镇能源互联网从“顶层设计”到“精准落地”。

2)提升能源协调技术水平。清洁能源是新型电力系统的主体,化石能源在未来很长时间内仍然是整个城镇能源结构的基础,目前城镇能源互联网主要涉及冷、热、电、气等二次能源以及风、光等清洁能源,缺乏对石油、煤炭等化石能源的考虑,需在现

有理念基础上,按照统筹规划、有效利用的思路,进一步协同考虑清洁能源与化石能源的开发利用,从全局层面上实现不同能源的协调优化。

3)注重能效与能源品质协同提升。未来城镇对于能源的用量需求和品质需求是同等重要的,能源品质是保障安全、确保能源供应稳定的重要影响因素,应完善能效与能源品质协同提升的城镇能源互联网关键技术,支撑低碳绿色城市建设,推动能源清洁低碳安全高效利用。

5.2 机制设计方面

1)完善用户互动响应机制。目前中国在需求响应方面已出台相关机制与规则,但仅在江苏、浙江等地有相关探索与示范,尚未在更大范围的实际工程中实施,需进一步完善用户响应的价格、结算等机制,为用户参与互动提供制度和规则支撑,保障用户互动利益,提升城镇能源互联网用户互动水平。

2)健全能源交易机制与规则。市场是引导用户消费与互动,提高整个能源产-供-销环节运行效率的重要手段。目前中国在电力中长期交易、电力现货交易方面已出台相关机制,但面向电、气、热耦合的能源市场建设尚在探索阶段,需加强能源市场标准化规范化建设,完善准入标准和规则,增强市场监管制度和政策的稳定性、可预期性,为能源交易提供机制保障,引导用户消费与互动,提高整个能源产供销环节运行效率。

5.3 关键装备方面

1)推进新型能源管控平台研发。突破能源行业壁垒,研发贯穿综合能源规划建设、运行管控、交易结算、运维评价等全功能环节能源服务的城镇能源互联网综合能源管控平台,一方面,实现多能量流的监测与控制,保证能源的质量与稳定传输,另一方面,提供优质的管控服务与辅助决策,实现能效与能源品质提升,解决城镇能源系统各环节独立建设运营的问题。

2)加强多能协调控制装置研发。研发满足城镇能源互联网海量柔性资源的多能信息采集与协调控制装置,提升计算效率与安全通信水平,满足实时控制需求,实现城镇级、区域级和用户级各类能源设备的物理互联和协同控制,共同支撑城镇能源互联网的互联互通服务。

3)突破能源转换装备研制。目前实现多能转换主要依赖于局域的冷热电联供系统,与热泵、冰/水蓄冷等能源输出相对独立的系统耦合不紧密,冷、

热、电、气仍然相对割裂。因此,需要进一步探索新的能源转换装备,从全局层面上实现不同能源的协调优化。

6 结语

城镇能源互联网构建了互联互通、优化共享的能源网络,其多样化的能源供给保证了城镇巨大的能源需求。大量清洁能源、可再生能源的开发利用从源头上解决了化石能源的资源紧缺及环境污染问题,为城镇可持续发展提供了解决思路。在中国城镇化背景下,为促进城镇能源互联网的示范应用与推广建设,本文从工程概念设计、物理信息系统建设、数据化建设方面综述了国内外示范应用情况。

基于学界研究和业界探索,本文提出了城镇能源互联网架构以及服务体系,从工程概况、典型场景以及建设成效3个方面详细介绍了该模式下的江苏扬中和天津北辰两个中国南北方典型城镇能源互联网示范工程。

城镇能源互联网引发了能源的产业革命,推动了多种能源产业的合作共赢,促进了综合用能技术的发展,提高了城镇能源的利用效率。在此经验基础上,进一步提炼出中国新型城镇能源互联网示范工程实践的普遍性问题,并结合中国新型电力系统建设的现状与挑战,从技术手段、机制设计、关键装备3个方面,对中国未来推动城镇能源互联网提出了相关建议。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 国家发改委印发《2022年新型城镇化和城乡融合发展重点任务》——提高新型城镇化建设质量[EB/OL].(2022-03-22)[2022-04-22]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-03/22/content_5680376.htm.
National Development and Reform Commission issued the “Key Tasks for New Urbanization and Urban-Rural Integration Development in 2022” — improving the quality of new urbanization construction[EB/OL]. (2022-03-22)[2022-04-22]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-03/22/content_5680376.htm.
- [2] 郑玉平,王丹,万灿,等.面向新型城镇化的能源互联网关键技术及应用[J].电力系统自动化,2019,43(14):2-15.
ZHENG Yuping, WANG Dan, WAN Can, et al. Key technology and application of Energy Internet oriented to new-type towns[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 2-15.
- [3] 王丹,孟政吉,贾宏杰,等.面向新型城镇化的能源互联系统规划关键技术研究及展望[J].电力系统自动化,2019,43(14):16-28.
WANG Dan, MENG Zhengji, JIA Hongjie, et al. Research and prospect of key technologies for energy interconnection system planning for new-type towns[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 16-28.
- [4] 中国将稳中求进实现双碳目标[EB/OL].(2021-12-11)[2022-04-22]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1718776816490529549&wfr=spider&for=pc>.
China will seek progress while maintaining stability to achieve goals of carbon emission peak and carbon neutrality [EB/OL]. (2021-12-11)[2022-04-22]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1718776816490529549&wfr=spider&for=pc>.
- [5] 中央财经委员会第九次会议:构建以新能源为主体的新型电力系统[EB/OL].(2021-03-16)[2022-04-22]. <http://www.cnppowder.com.cn/news/59359.html>.
The ninth meeting of the Central Finance and Economics Committee: building a new power system with new energy as the mainstay [EB/OL]. (2021-03-16)[2022-04-22]. <http://www.cnppowder.com.cn/news/59359.html>.
- [6] 孙宏斌,潘昭光,孙勇,等.跨界思维在能源互联网中应用的思考与认识[J].电力系统自动化,2021,45(16):63-72.
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, SUN Yong, et al. Reflection and understanding of application of transboundary thinking in Energy Internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 63-72.
- [7] 徐箭,胡佳,廖思阳,等.考虑网络动态特性与综合需求响应的综合能源系统协同优化[J].电力系统自动化,2021,45(12):40-48.
XU Jian, HU Jia, LIAO Siyang, et al. Coordinated optimization of integrated energy system considering dynamic characteristics of network and integrated demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 40-48.
- [8] 陈瑜玮,孙宏斌,郭庆来.综合能源系统分析的统一能路理论(五):电-热-气耦合系统优化调度[J].中国电机工程学报,2020,40(24):7928-7937.
CHEN Yuwei, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (V): integrated electricity-heat-gas dispatch [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7928-7937.
- [9] 孟凡成,郭琦,康宏伟,等.计及集中式和分布式新能源的电力系统连锁故障模拟[J].高电压技术,2022,48(1):189-201.
MENG Fancheng, GUO Qi, KANG Hongwei, et al. Cascading failure simulation for power system with utility-scale and distributed renewable energy [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 189-201.
- [10] 里夫金.第三次工业革命:新经济模式如何改变世界[M].张体伟,孙豫宁译.北京:中信出版社,2012.
RIFKIN J. The third industrial revolution: how new economic models are changing the world [M]. Beijing: CITIC Publishing House, 2012.
- [11] GEIDL M, KOEPEL G, FAVRE-PERROD P, et al.

- Energy hubs for the future [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [12] 侯孚睿, 王秀丽, 锁涛, 等. 英国电力容量市场设计及其对中国电力市场改革的启示[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 1-7.
HOU Furui, WANG Xiuli, SUO Tao, et al. Capacity market design in the United Kingdom and revelation to China's electricity market reform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 1-7.
- [13] 时珊珊, 苏义荣, 改传跃. 智能社区低碳能源管理系统方案研究[J]. 华东电力, 2014, 42(12): 2918-2921.
SHI Shanshan, SU Yirong, GAI Chuanyue. Scheme for low-carbon energy management system in intelligent community [J]. East China Electric Power, 2014, 42(12): 2918-2921.
- [14] 武魏楠, 里夫金. 杰里米·里夫金: 第三次工业革命改变能源世界[J]. 能源, 2013(9): 6-7.
WU Weinan, RIFKIN J. Jeremy Rifkin: the third industrial revolution changing the energy world [J]. Energy, 2013(9): 6-7.
- [15] 毛强. 经济新常态下的中国发展方案——党的十八大以来中央财经领导小组会议述要[J]. 中国党政干部论坛, 2017(3): 34-43.
MAO Qiang. China's development plan under the new economic normal—summary of the meetings of the Central Leading Group of Finance and Economics since the 18th party congress [J]. Chinese Cadres Tribune, 2017(3): 34-43.
- [16] 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[EB/OL]. (2016-03-08) [2022-04-22]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5082989.htm.
Guidance on promoting the development of “Internet+” intelligent energy [EB/OL]. (2016-03-08) [2022-04-22]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5082989.htm.
- [17] 国家能源局关于公布首批“互联网+”智慧能源(能源互联网)示范项目的通知[EB/OL]. (2017-07-06) [2022-04-22]. <http://www.syhj.cn/news/view/4858-1.html>.
Notice of the National Energy Administration on the announcement of the first batch of demonstration projects of “Internet+” intelligent energy (Energy Internet) [EB/OL]. (2017-07-06) [2022-04-22]. <http://www.syhj.cn/news/view/4858-1.html>.
- [18] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189-207.
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207.
- [19] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知[EB/OL]. (2022-01-29) [2022-04-22]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm.
National Energy Administration, National Development and Reform Commission. Notice on printing and distributing the “14th five-year plan for the modern energy system” [EB/OL]. (2022-01-29) [2022-04-22]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm.
- [20] Development and demonstration of decentralized networked energy systems towards the E-Energy marketplace of the future [EB/OL]. (2014-01-02) [2022-04-22]. <https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Factsheets/factsheet-e-dema.html>.
- [21] E-Energy [EB/OL]. (2014-12-05) [2022-04-22]. <https://www.digitale-technologien.de/DT/Navigation/DE/ProgrammeProjekte/AbgeschlosseneProgrammeProjekte/E-Energy/e-energy.html>.
- [22] MERINO J, RODRIGUEZ J, CAERTS C, et al. Scenarios and requirements for the operation of the 2030 + electricity network [C]// 23rd International Conference on Electricity Distribution, June 15-18, 2015, Lyon, France.
- [23] MARTIN L, RADAELLI L, BRUNNER H, et al. ELECTRA IRP approach to voltage and frequency control for future power systems with high der penetration [C]// 23rd International Conference on Electricity Distribution, June 15-18, 2015, Lyon, France.
- [24] 夏越, 陈颖, 杜松怀, 等. 综合能源系统多时间尺度动态时域仿真关键技术[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 97-110.
XIA Yue, CHEN Ying, DU Songhuai, et al. Key technologies for multi-time-scale dynamic time-domain simulation of integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 97-110.
- [25] 景锐, 周越, 吴建中. 赋能零碳未来——英国电力系统转型历程与发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 87-98.
JING Rui, ZHOU Yue, WU Jianzhong. Empowering zero-carbon future—experience and development trends of electric power system transition in the UK [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 87-98.
- [26] GRID 2030: a national vision for electricity's second 100 years [EB/OL]. (2011-07-29) [2022-04-22]. https://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/Electric_Vision_Document.pdf.
- [27] WEIS T M, ILINCA A. Assessing the potential for a wind power incentive for remote villages in Canada [J]. Energy Policy, 2010, 38(10): 5504-5511.
- [28] 郑思达. 孤岛模式能量管理策略在区域电网中的应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
ZHENG Sida. Islanded mode energy management strategy and application in regional grid [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [29] 千叶县柏叶新城[EB/OL]. (2016-07-18) [2022-04-22]. http://wenku.baidu.com/link?url=Anu6DH25HH7xLU2kvqxaqIjgbweHhNUx_vcQC1IRa20cWDYUUhNxCKkpK5d-P3nLXjLHW_ewgvr0Q_mqJoMABwTMclEURzYyWYZWUiydz5_.
Kashiwaha New Town, Chiba Prefecture [EB/OL]. (2016-07-18) [2022-04-22]. http://wenku.baidu.com/link?url=Anu6DH25HH7xLU2kvqxaqIjgbweHhNUx_vcQC1IRa20cWDYUUhNxCKkpK5d-P3nLXjLHW_ewgvr0Q_mqJoMABwTMclEURzYyWYZWUiydz5_.

- EURzYyWYZWUiydz5.
- [30] 郭茹,杨海真.崇明生态岛可再生能源产业发展路径[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(8):1204-1209.
- GUO Ru, YANG Haizhen. Roadmap of renewable energy industry development in Chongming ecoisland [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(8): 1204-1209.
- [31] 龙禹,周琪,卿昕.浅谈基于碳减排的新型城镇低碳发展模式——江苏同里新能源小镇低碳发展剖析[J].能源与环境,2018(1):93-94.
- LONG Yu, ZHOU Qi, QING Xin. A new low-carbon development model for towns based on carbon emission reduction—analysis of low carbon development in Tongli new energy town in Jiangsu Province[J]. Energy and Environment, 2018(1): 93-94.
- [32] 李逐云,雷霞,邱少引,等.考虑“源-网-荷”三方利益的主动配电网协调规划[J].电网技术,2017,41(2):378-387.
- LI Zhuyun, LEI Xia, QIU Shaoyin, et al. Coordinated planning of active distribution network considering “source-grid-load” benefits [J]. Power System Technology, 2017, 41 (2) : 378-387.
- [33] 孙强,谢典,聂青云,等.含电-热-冷-气负荷的园区综合能源系统经济优化调度研究[J].中国电力,2020,53(4):79-88.
- SUN Qiang, XIE Dian, NIE Qingyun, et al. Research on economic optimization scheduling of park integrated energy system with electricity-heat-cool-gas load [J]. Electric Power, 2020, 53(4): 79-88.
- [34] 金成生,刘稳坚,邱尚青.微电网技术在上海迪士尼110 kV智慧变电站中的应用[J].华东电力,2014,42(5):1027-1030.
- JIN Chengsheng, LIU Wenjian, QIU Shangqing. Application of microgrid technology in Shanghai Disney 110 kV intelligent substation[J]. East China Electric Power, 2014, 42(5): 1027-1030.
- [35] 上海迪士尼引进分布式能源技术[EB/OL].(2016-08-26) [2022-04-22]. https://mp.weixin.qq.com/s/CDxN_7uoSFcc0yFXIwyKIw.
- Shanghai Disney introduces distributed energy technology [EB/OL]. (2016-08-26) [2022-04-22]. https://mp.weixin.qq.com/s/CDxN_7uoSFcc0yFXIwyKIw.
- [36] 中新天津生态城能源规划[EB/OL].(2008-04-01) [2022-04-22]. <https://max.book118.com/html/2019/1115/6220211155002123.shtm>.
- Sino-Singapore Tianjin eco-city energy plan [EB/OL]. (2008-04-01) [2022-04-22]. <https://max.book118.com/html/2019/1115/6220211155002123.shtm>.
- [37] 李琼.天津中新生态城动漫园三联供能源系统优化分析[D].天津:天津大学,2012.
- LI Qiong. Energy system optimization and analysis of cartoon and comics park in Tianjin Sino-Singapore eco-city [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [38] 吴俊杰,马秀琴,黄超,等.天津中新生态城绿色建筑评价体系及节能效益研究[J].河北工业大学学报,2011,40(4):42-45.
- WU Junjie, MA Xiuqin, HUANG Chao, et al. Green building evaluation system and energy efficiency for Sino-Singaporean Tianjin eco-city[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2011, 40(4): 42-45.
- [39] 王成山,董博,于浩,等.智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用[J].中国电机工程学报,2021,41(5):1597-1608.
- WANG Chengshan, DONG Bo, YU Hao, et al. Digital twin technology and its application in the integrated energy system of smart city[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1597-1608.
- [40] 赵鹏,蒲天骄,王新迎,等.面向能源互联网数字孪生的电力物联网关键技术及展望[J].中国电机工程学报,2022,42(2):447-458.
- ZHAO Peng, PU Tianjiao, WANG Xinying, et al. Key technologies and perspectives of power Internet of Things facing with digital twins of the energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 447-458.
- [41] 蒲天骄,陈盛,赵琦,等.能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J].中国电机工程学报,2021,41(6):2012-2029.
- PU Tianjiao, CHEN Sheng, ZHAO Qi, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2012-2029.
- [42] 唐文虎,陈星宇,钱瞳,等.面向智慧能源系统的数字孪生技术及其应用[J].中国工程科学,2020,22(4):74-85.
- TANG Wenhui, CHEN Xingyu, QIAN Tong, et al. Technologies and applications of digital twin for developing smart energy systems [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22 (4): 74-85.
- [43] 范海东.基于数字孪生的智能电厂体系架构及系统部署研究[J].智能科学与技术学报,2019,1(3):241-248.
- FAN Haidong. Research on architecture and system deployment of intelligent power plant based on digital twin [J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1 (3) : 241-248.

郑玉平(1964—),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向:综合能源系统优化运行、电力系统继电保护与控制等。E-mail:zhengyuping@sgepri.sgcc.com.cn

王 俊(1995—),男,硕士,工程师,主要研究方向:综合能源系统、电力市场与电力经济、需求响应。E-mail:wangjun18@sgepri.sgcc.com.cn

杨志宏(1968—),男,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向:综合能源系统优化运行、电网调度自动化。E-mail:yangzhihong@sgepri.sgcc.com.cn

杜 炜(1981—),男,通信作者,博士,教授级高级工程师,主要研究方向:综合能源系统、智能配用电。E-mail:duwei@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 蔡静雯)

Review on Demonstration Application of Urban Energy Internet: Present Situation, Experience and Prospect

ZHENG Yuping^{1,2,3}, WANG Jun^{1,2,3}, YANG Zhihong^{1,2,3}, TENG Xianliang^{1,2,3}, DU Wei^{1,2,3}, WANG Dan⁴

(1. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China;

4. Key Laboratory of the Ministry of Education on Smart Power Grids (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

Abstract: In the process of urbanization in China, the urban energy system has common issues such as low comprehensive energy efficiency, insufficient clean energy proportion, and high carbon-emission reduction pressure. It is of great significance to establish urban Energy Internet demonstration model projects to promote the construction of urbanization in China. The urban energy system of China is different from other countries, and the construction and demonstration of its demonstration projects are also particular. To this end, this paper firstly reviews the exploration and practice in the construction and demonstration of domestic and foreign Energy Internet demonstration projects, and emphatically introduces the exploration of the new Energy Internet demonstration projects in two typical characteristic towns in Jiangsu Yangzhong and Tianjin Beichen in China. On this basis, the general problems of urban Energy Internet demonstration projects in China are further refined. Combined with the present situation and challenges of the construction of the new power system in China, this paper proposes relevant suggestions for promoting urban Energy Internet construction in China in the future.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2018YFB0905000) and State Grid Corporation of China (No. SGTJDK00DWJS1800232).

Key words: urbanization; Energy Internet; integrated energy system; energy planning; optimal operation; energy trading; comprehensive benefit evaluation; demonstration project

