

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.08.007

# 碳中和背景下综合智慧能源的发展现状及关键技术分析

Analysis on development and key technologies of integrated intelligent energy in the context of carbon neutrality

滕佳伦, 李宏仲

TENG Jialun, LI Hongzhong

(上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**摘要:**综合智慧能源是一种综合利用信息通信、能源、智能制造等技术手段来实现能源生产、传输、储存、消费和管理的智能化、高效化、绿色化和安全化的能源系统。它不仅是一种技术革命,更是能源行业的革命,推进了传统能源系统向智慧化、综合化和绿色化转型。综合智慧能源系统通过采集、传输、处理和利用能源信息,实现能源的优化分配和精细管理,提高能源的利用效率、降低能源的消耗及排放,从而实现可持续发展。为了分析在碳中和背景下综合智慧能源的关键技术以及未来的发展方向,介绍了国内外综合智慧能源的发展状况,阐述了综合智慧能源的内涵及技术架构,并将其关键技术归纳为能源生产、能源输送、能源存储、能源消费、能源智慧化和多能协同优化等6个方面的技术。对各技术的发展现状和核心问题进行了分析总结。提出了4点建议:推动智能化的电力市场建设,提升能源数据管理能力,推进以电能为基础的客户端供电业务的发展,以及要推进我国自主研发的核心技术和装备。

**关键词:**碳中和;综合智慧能源;技术框架;关键技术;发展趋势;新型能源体系

中图分类号:TM 73;TK 01<sup>9</sup> 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2023)08-0053-11

**Abstract:** Integrated intelligent energy is an energy system that can achieve intelligent, efficient, green and safe energy production, transmission, storage, consumption and management by integrating information and communication technology, energy, intelligent manufacturing and other technical means. It is not only a technological revolution, but also a revolution in energy industry, transforming traditional energy systems into intelligent, integrated and green systems. Relying on energy data collection, transmission and processing, an integrated intelligent energy system can optimized energy allocation and manage energy precisely, thereby achieving sustainable development. In the analysis on the key technologies and development direction of integrated intelligent energy under the background of carbon neutrality, the development status of integrated intelligent energy at home and abroad is introduced, then its connotations and technical architecture are elaborated. The key technologies can be sorted into six groups: energy production, energy transmission, energy storage, energy consumption, intelligent energy and multi-energy synergistic optimization. According to the core issues of each technology pointed out in the analysis, four suggestions are put forward: promoting the construction of intelligent power market, enhancing energy data management capabilities, boosting the power supply business on user end, and developing core technologies and equipment independently in China.

**Keywords:** carbon neutrality; integrated intelligent energy; technical framework; key technology; development direction; new energy system

## 0 引言

我国在2020年提出了“双碳”目标,即力争2030

年前使二氧化碳排放量达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。这一目标的提出表明,未来发展趋势将会是建立以新能源为主体的综合智慧能源系统。我国提出的“双碳”目标是减少气候变暖的重要承诺,也是对《巴黎协定》原定目标的主动提升,同时更是我国实现经济高速、高质量发展的必要条

基金项目:国家自然科学基金项目(51777126)

National Natural Science Foundation of China(51777126)

件之一。

近年来,随着工业化进程不断加快和城市化水平快速提升,我国能源消费强度逐年下降,但人均能耗仍高于国际公认的发达国家水平。然而,我国的能源结构仍处于“单煤独霸”的状态,其碳排放总量高居全球之首。随着我国社会经济的不断发展和人民生活水平的日益提高,对化石燃料的依赖程度越来越高,导致碳排放量也在逐年增加。为确保如期完成“双碳”目标,我国加快推进能源绿色低碳转型。2021年我国能源生产和消费结构显著优化,清洁能源生产比重同比提高0.8个百分点,清洁能源消费比重比上年提高1.2个百分点,非化石能源消费和生产比重均提高了0.7个百分点。化石能源消费合理控制,煤炭、石油消费增速低于能源消费总量增速0.6,2.2个百分点。可再生能源发展迈上新台阶,风电、太阳能发电装机容量双双突破300 GW,海上风电装机跃居世界第一,沙漠、戈壁、荒漠地区大型风光发电基地加快建设。2021年,能耗强度和碳排放强度也持续下降,能耗强度同比降低2.7%,碳排放强度同比降低3.8%<sup>[1]</sup>。

作为一种环保且高效的能源利用形式,综合智慧能源可以通过数字化赋能实现智慧化和低碳化发展,从而更好地贴近用户、服务用户,构建和谐共生的生态能源体系,成为推动能源转型升级和创新发展模式的重要方向<sup>[2]</sup>。在建立新型能源体系的过程中,综合智慧能源扮演着至关重要的角色,它能够为能源的高效利用和可持续发展提供以下有力支持。

(1)通过智能化控制和管理,综合智慧能源实现对能源全过程的监测、调度、优化和管理,从而提高能源利用效率,减少了能源的浪费,进而降低能源消耗和排放水平。

(2)通过综合智慧能源的有效整合和利用,可实现能源的多元化和可再生化,从而降低对传统化石能源的依赖,推动能源的可持续发展。

(3)通过智能化的控制和管理,综合智慧能源能够实现对能源的高效清洁和低碳化,从而推动社会向绿色低碳转型,实现能源的高效利用并减少温室气体排放。

(4)通过智能化控制和管理,综合智慧能源能够实现对能源系统的监测、调度和预警,从而提高能源系统的安全性和稳定性,并有效地预防能源系统发生故障。

综合智慧能源的广泛应用,将为未来能源体系的建设注入强劲动力,推动能源系统向智能化、清洁化、低碳化和可持续化的方向不断迈进。随着全

球经济进入后工业化时代,以新能源为主体的综合智慧能源将是未来能源需求的主要增长点之一。本文通过对国内外综合智慧能源现状的探讨,对综合智慧能源的6个关键技术进行分析,提出了对未来综合能源发展的展望及建议。

## 1 综合智慧能源发展现状

### 1.1 国外综合智慧能源发展现状

近年来,随着全球能源需求日益增加以及环境保护要求越来越严格,国际社会对综合智慧能源给予高度重视并开展相关研究<sup>[3]</sup>。为了满足各国或地区的能源需求,制定了多种综合智慧能源的发展策略。早在欧盟第五框架(FP5)中,就提出了综合能源系统的概念,并将能源协同优化的研究置于首要位置<sup>[4]</sup>。

其中,德国的E-Energy项目是早期欧洲标志性综合能源服务项目。该项目于2008年选择了6个试点地区,总投资约1.4亿欧元,涉及智能发电、智能电网、智能消费和智能储能等方面。项目旨在通过新型信息技术(ICT)、通信设备和系统的应用,建立高效能源系统,以应对分布式电源和各种复杂用户终端负荷的增长。

除了E-Energy项目,德国在综合能源服务领域的探索并未停止。2016年12月,德国启动了“智慧能源——能源转型数字化”(SINTG)展示计划,该计划在德国5个大型示范区域进行能源数字化研究和试点。该计划的核心是实现发电侧与用电侧的智能互联,应用新型的电网技术、运营管理和商业概念,以测试能源转型数字化的新技术、服务、流程和商业模式。

近年来,欧洲能源转型智能网络技术与创新平台(ETIPNET)发布了2020—2030年的研发路线图。根据路线图可知,欧洲将投入40亿欧元用于综合能源系统研究和创新活动,以实现2050年的循环经济愿景,即构建深度电气化、广泛数字化和完全碳中和的能源系统。通过路线图的实施,到2030年,欧洲综合能源系统将实现系统运营商与终端用能部门的融合与合作,以本地优化方式运行,并通过智能、分布式优化控制平衡本地能源需求,为消费者提供集成数字化服务。同时,电网的硬件设施将进行升级,集成组件和系统将进一步整合<sup>[5]</sup>。

美国关于综合智能能源的研究起步较早。在2001年,美国电力科学研究院就提出了智能电网的概念,并借助强大的技术基础开始研究智能电网以及智慧建筑,为21世纪能源互联网的打造奠定了基础<sup>[6]</sup>。进入2010年,美国建立了“21世纪的能源网

络”战略并将其发布在智能网络全球论坛中,从大规模储能、可再生能源接入、数据与信息安全、用户端管理、智能建筑等方面展开研究,初步形成了建筑一体化能源使用方案,即实时监控楼宇内能源使用,实时响应需求并完成策略优化<sup>[7]</sup>。

作为一个典型的能源短缺国家,日本自始至终较为关注能源开发。2010年,日本经济产业省启动“智慧能源共同体”计划,从能源、社会基础设施、智能电网等方面,开设了包含智慧城市示范项目和智慧能源网示范项目在内的能源发展战略实践,覆盖了横滨、东京、丰田、关西等多座城市,旨在协调电力、热能及运输范畴内的能源使用,降低城市运行过程中的碳排放量,并在2030年实现二氧化碳排放量削减40%的目标<sup>[8]</sup>。

## 1.2 国内综合智慧能源发展现状

我国综合智慧能源目前的发展状况非常活跃。我国政府一直在积极推进智慧能源技术的研发和应用,以提高能源利用效率,减少能源浪费和改善环境质量。目前开展智慧能源服务的企业主要包括售电公司、服务公司和技术公司等。典型的综合能源服务供应商包括:南方电网综合能源有限公司、广东电网综合能源投资有限公司、阿里云新能源等。

其中,南方电网综合能源有限公司积极发挥电网企业在能源优化配置中的作用,综合运用高效节能设备和智慧能源运营系统,通过投资改造并辅助运营维护工业企业的用冷、用热、用气等用能设施,为工业企业提供可靠、高效、节能的综合能源服务,降低了工业企业客户能耗,节省用能成本。在南网系统中广东电网综合能源有限公司率先建成了“以客户为中心”的现代供电服务体系。

2021年,中国南方电网有限责任公司(以下简称南网)持续深化解放用户,优化“基础+增值”产品体系,以服务环节、时限、成本和供电质量等服务内容为核心,升级基础供电服务产品标准,重新构建梳理形成了用电报装、渠道服务、电费服务、用电变更、故障抢修、电能质量等6大类23项基础供电服务产品,在全南网率先构建了“前中后台”组织架构。而阿里云新能源则是对构建智慧能源互联网平台提供技术支持,实现能源数据的集中管理和共享。通过整合各种能源设备和系统,提供综合的能源管理和监控服务,以实现能源的智能化和优化运营。

此外在智慧电网方面,截至2021年年底,全国已有29个省份完成了智慧电网建设,包括建成了超680万台智能电表,投入运行智慧配电房超2000

个,智能化程度已经达到较高水平。此外,中国正在积极推进实现超高压输电网和电力电子技术在智慧电网中的应用,以提高能源传输的效率和稳定性。

在可再生能源方面,中国已经成为全球可再生能源装机容量最大的国家之一。截至2021年年底,中国的可再生能源装机容量达到1063GW,占总发电装机容量的44.8%。其中,水电装机391GW(抽水蓄能36GW),风电装机328GW,光伏发电装机306GW,生物质发电装机约380MW,位居全球前列。中国还在积极推进其他可再生能源领域的应用,如太阳能热发电等,以进一步减少对传统能源的依赖,促进清洁能源的发展和利用。

在能源市场改革方面,中国政府提出了逐步实现能源市场化、多元化和国际化的目标。通过推进电力市场化改革、建设天然气市场、推广可再生能源发电等措施,中国致力于建立公平竞争、高效运行的能源市场,促进能源资源的优化配置和供需的均衡发展。

随着人们对能源使用的日益重视和能源技术的不断创新,我国综合智慧能源产业将会迎来更加广阔的发展空间。

## 2 综合智慧能源的内涵及技术框架

综合智慧能源是一种高效、智能化、可持续发展的能源模式,将各种能源资源和技术进行有机整合和充分利用,从而实现能源的最大化利用。它以“互联网+”为基础,融合了多种新型能源系统,形成了一个新的智能电网体系,从而使电力系统能够提供更加安全、经济、可靠和环保的电能服务。

为了实现对能源全过程的智能化控制和管理,能源的生产、转化、储存和使用等方面,以及能源的监测、调度、优化和管理等环节,都需要运用信息技术、物联网、人工智能等先进技术手段。综合智慧能源具有“智能化”、“融合”性、网络化、一体化和虚拟化特征。实现综合智慧能源,可提升能源利用效率,降低能源消耗和排放,推动能源可持续发展,促进经济社会向绿色低碳转型的进程。

综合智慧能源系统旨在协同多种能源品种和供应方式,包括“电、热、冷、气、水、氢”和“水、火、核、风、光、储”,优化各环节间的互动关系,实现源、网、荷、储、用各环节之间的协调,为用户提供了综合智慧能源一体化解决方案。同时,该系统还连接了“物联网”与“务联网”,形成了一个完整的能源生态体系<sup>[9]</sup>。综合智慧能源系统的详细架构如图1所示。

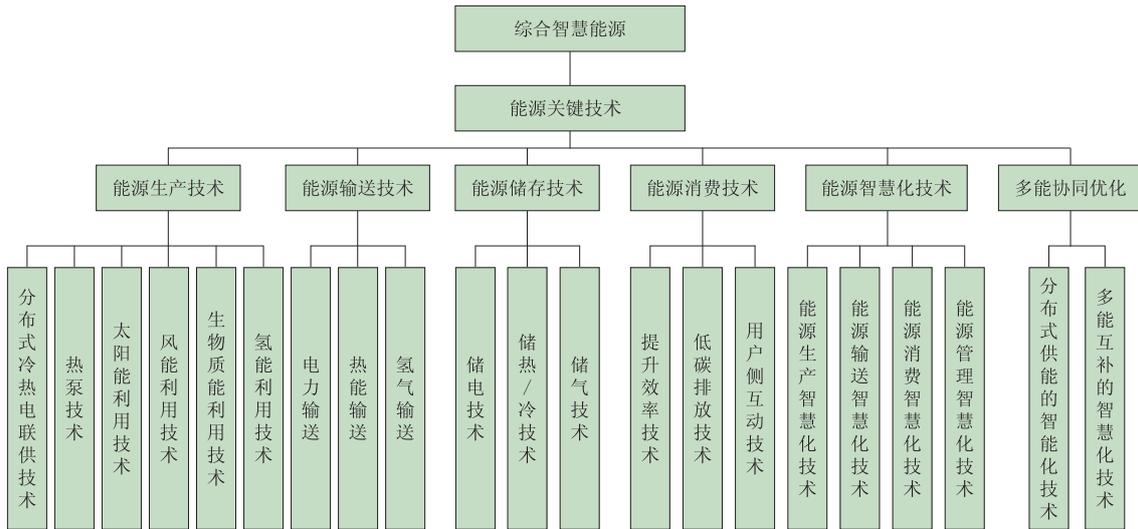


图1 综合智慧能源系统架构  
Fig. 1 Architecture of an integrated intelligent energy system

### 3 综合智慧能源关键技术

#### 3.1 能源生产技术

##### 3.1.1 分布式冷热电联供技术

文献[10]描述了分布式冷热电联供系统,它主要是利用燃气轮机或燃气内燃机燃烧洁净的天然气发电,对做功后的余热进一步回收,用来制冷、供热和生活热水,就近供应。其工作原理如图2所示。

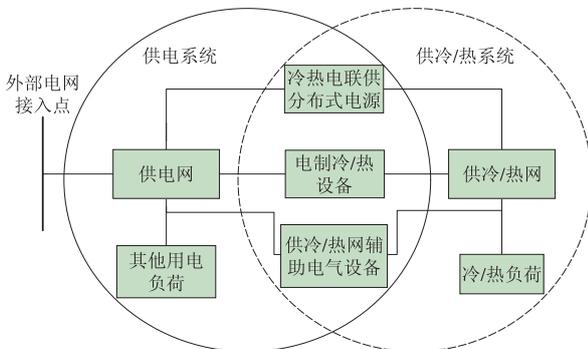


图2 分布式冷热电联供系统原理  
Fig. 2 A distributed CCHP system

常规模式冷、热、电供应由大型电厂通过燃煤实现,我国发电量供电标准煤消耗为326 g/(kW·h),供电效率39%。电能通过高压线路远距离输送至各用能建筑,而远距离的电力输送浪费严重,电能损失超过总发电量的6%,极大影响电厂总的发电效率<sup>[11]</sup>。热电冷三联产系统可以实现现有冷、热、电供应模式的改变,其综合能效甚至超过75%<sup>[12]</sup>。该技术在不同应用领域配置有所不同,配置方案主要取决于当地的能源需求结构,而无论哪种模式,主要设备都包括原动、制冷及供热等装置。目前应用该技术可实现节能量9万t/a,二氧化碳减

排约24万t/a<sup>[13]</sup>。

##### 3.1.2 热泵技术

文献[14]介绍了热泵系统,它是一种具有较高能效的能量使用装置,工作原理如图3所示,通过一个制冷系统的热循环过程,把诸如室外空气、循环水或地表热能等较低温度的热源,转移到较高温度的对象上,从而达到加热或制冷的目的。通过消耗一定的辅助能量(如电能),在压缩机和换热系统内循环制冷剂的共同作用下,由环境热源(如水、空气)中吸取较低温热能,然后转换为较高温热能释放至循环介质(如水、空气)中成为高温热源输出。因压缩机的运转做工消耗了电能,压缩机的运转使不断循环的制冷剂在不同的系统中产生了不同的变化状态和不同的效果(即蒸发吸热和冷凝放热),从而达到了回收低温热源制取高温热源的作用和目的。而在热泵的制冷管路上安装专用的阀,则可以实现逆流的制冷,既能供热又能降温。

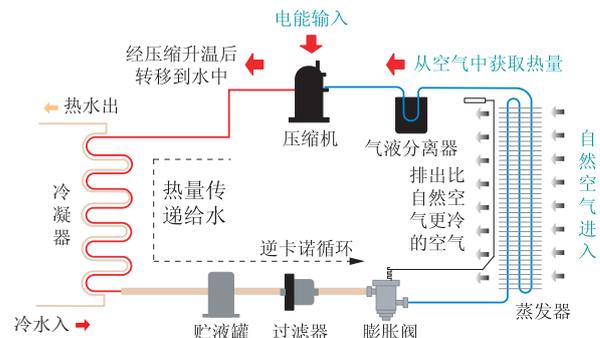


图3 热泵技术工作原理

Fig. 3 Working principle of a heat pump

常用的热泵有风源热泵,水源热泵,土壤热泵等。风源热泵能够将环境中的热能或尾气中的热

能转移到所需的区域中。水源热泵从温度较高的地下或者污水中获取能量,然后把这些能量传导到地下。而地下水源热泵系统,可采用探针或地表收集装置,将地下的热能直接抽回。热泵由于其具有低碳、无污染、操作噪音低、适用于小型楼宇等优点,在现代采暖和住宅中得到了广泛的应用<sup>[15]</sup>。从经济性上讲,该方案无需增加燃油消耗,优于常规供热与制冷方案。

### 3.1.3 太阳能利用技术

太阳能在综合智慧能源中的应用,集中表现为光电发电与光热发电 2 种形式<sup>[16]</sup>,对我国的能源结构转变与低碳发展具有重要意义。

文献<sup>[17]</sup>分别介绍了光电发电和光热发电,光电发电是指利用光子的能量将其转化为电能的过程。常见的光电发电技术包括光伏发电和光电化学发电。光热发电是指利用光子的能量将其转化为热能的过程。常见的光热技术包括太阳能热利用和激光加热<sup>[18]</sup>。近年来,随着能源需求的增加和环保意识的提高,光电发电和光热技术在可再生能源和清洁能源领域的应用也越来越受到关注和重视<sup>[19]</sup>。

### 3.1.4 风能利用技术

风能是一种清洁无公害的可再生能源,利用风力发电非常环保,而风能技术的迅速发展使得风能逐渐被人们所接受。随着大容量、长叶片、高塔架、全功率变流、智能控制和大数据分析等技术的发展和规模化应用<sup>[20]</sup>,风力发电机具有更强大的适应能力,已经从陆上风电场发展到了海洋风电场。但是,大规模集中式的风电具有波动性大、可控性差、难以与电网连接等特点;而且,大规模风电建设的地点往往距离用电区较远,而当地的电能消纳与输送等问题又导致了“弃风”的发生。

近年来,海上风电发展迅速。海上风电开发潜力极大,有望通过规模化发展(降低建设运维成本)和技术提升(机组大型化)最终实现平价<sup>[21]</sup>。目前已核准的海上风电存量项目将于未来 2 年内集中并网,且国内海上风电存量基数较小,短期内行业同比增量数据将迎来爆发。整体来看,风电机组大型化、产业链国产化,叠加产业成熟度和规模效应,是“十四五”期间快速发展的关键<sup>[22]</sup>。《“十四五”能源领域科技创新规划》提出:“开发 15 MW 及以上的海上风电机组整机设计集成技术、先进测试技术与测试平台;开展轻量化、紧凑型、大容量海上超导风力发电机组研制及攻关”。

海上风电装备服役环境恶劣,结构形式复杂,其多体多场耦合动力学的行为机理非常复杂,而对

其进行综合设计和动力学优化控制更是极具挑战,成为限制海上风电快速大规模发展的技术瓶颈<sup>[23]</sup>。在国家重大需求的牵引下,亟须开展系列基础科学研究,为海上风电装备的自主研发提供基础理论支撑和关键技术储备。

### 3.1.5 氢能技术

氢能是未来世界新能源发展的必然趋势,其应用可实现大规模、高效的再生新能源的可再生性,并在某种意义上取代了常规的化石能源。目前制氢的方法以煤、天然气等重整制氢为主,电解水制氢和工业副产品制氢为辅,此外还有光热制氢、光电化学、生物质制氢、核电等多种制氢方法,但是其中 95% 以上的制氢来源于煤炭、天然气等重整制氢,而电解水制氢是可再生资源,但是这种技术的有效应用还很少<sup>[24]</sup>。氢气还可以作为能源载体,高效地将氢能与电能进行转换。文献<sup>[25]</sup>提出了一种基于氢能的模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)方法,用于微电网的长期和短期运行预测。该控制方法能够自主地优化电解装置的运行过程,并确保电解槽在制氢过程中的健康状态。在技术、成本、政策等推动下,氢能作为连接可再生能源的纽带和电力储能介质成为可能,在以新能源为主体的新型电力系统中扮演着越来越重要的角色。

电解水制氢技术是一种通过电解水分子来制取氢气的方法。如图 4 所示,电解水制氢与电热气综合能源系统也存在关联关系。电解水制氢的原理是在电解槽中通入经整流器变换后的直流电,水分子在电极上发生电化学反应,生成氢气和氧气。可以按照电解槽系统的不同划分成:碱性电解、酸性电解、固体氧化物电解 3 种主要类型<sup>[26]</sup>。

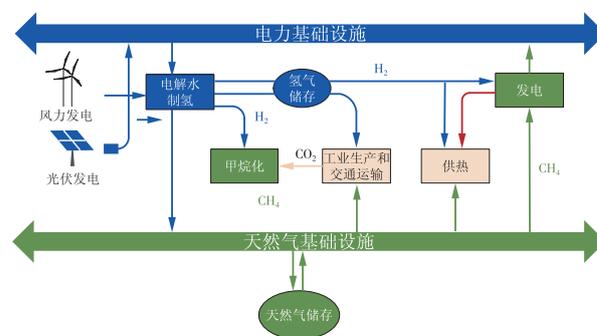


图 4 电解水制氢与综合能源系统的关联示意

Fig. 4 Application of hydrogen production by water electrolysis in integrated intelligent energy systems

碱性电解是利用碱性电解液作为电解质,通常采用氢氧化钾或氢氧化钠等碱性电解液,电极常用

钢板或镍钢板。碱性电解具有设备简单、操作方便、成本较低等优点,但存在腐蚀问题。

酸性电解是利用酸性电解液作为电解质,通常采用浓硫酸或磷酸等酸性电解液,电极常用铂或钛钽等贵金属电极。酸性电解的产氢效率较高,但设备成本和操作难度都较高。

固体氧化物电解是利用固体氧化物作为电解质,电极通常采用金属或金属氧化物。固体氧化物电解具有高效率、高纯度、无污染等优点,但设备成本高、操作温度高等问题需要解决。

### 3.1.6 生物质能利用技术

生物质是继煤炭、石油、天然气后,最具发展潜力的一种新的可再生能源<sup>[27]</sup>。文献[28]中概述了生物质气化技术,它可以将生物质转化为合成气,其中包含可燃气体和二氧化碳等成分,这种合成气可以被用作燃料转化为热能和电能等形式。在生物质气化技术中,最常见的有热解气化、气化剂气化和超临界水气化3种。其中,气化剂气化常用的气化剂包括空气、氧气、蒸汽和混合气,而一种新型的自热CaO环生物质气化技术则以CO<sub>2</sub>为气化剂,可以提高合成气的输出。由于不需对生物质原料进行任何预处理,因此可实现快速、高效的制备,同时还可获得高H<sub>2</sub>含量的产物,是目前最具发展潜力的高湿生物质气化工工艺,但目前存在投资高、能耗高等问题。

## 3.2 能源输送技术

### 3.2.1 电力输送

在过去的电力系统中,交流电占主要部分,直流输电很少。然而,随着技术的不断发展,有很多限制直流电发展的技术屏障已经被打破,直流输电更好的稳定性、经济性和低损耗等优势逐渐被发现,因此直流输电越来越受到人们的重视。柔性直流传输是一种不同于传统交流与传统直流传输的新型传输技术,它以一种由电压驱动的变流器为中心,柔性直流传输是一种基于高压直流输电技术的新型输电方案,旨在提高电力系统的可靠性和效率。文献[29]概述了柔性直流传输系统,它是由两端的换流站、直流输电线路和相应的控制、保护系统组成。利用柔性直流传输技术,电力系统可以实现更高效率、更稳定可靠的直流输电方案,有助于提高电网的可持续发展和安全性。

在中国的西部地区,这里有丰富的新能源资源且负荷较少,而中国东部则恰恰相反,中国本土的新能源和新能源的供需格局严重失衡,长距离、大容量的特高压输变电项目日益增多。在特高压输变电项目中,采用了以电网为基础的换相方式的高

压直流输电(LCC-HVDC)技术,但存在换相失败和无功损耗大的问题<sup>[30]</sup>。然而,采用电压型变流器的高压直流输电(VSC-HVDC),其有功无功可单独调控,无换相失败,可为无源电网提供电力<sup>[31-32]</sup>。

### 3.2.2 热能输送

热能由热水与蒸汽组成,其传输方式以地下或空中管道为主。就供热管网自身而言,它的设计、制造和施工等技术已经比较成熟,它的工作重点就是在规划设计和运营管理中运用信息化和智能化技术,从而让区域管网的布局优化、管网泄漏、水力平衡、供热量计量和巡检等问题都得到有效解决,从而提升了供暖的可靠性和经济效益<sup>[33]</sup>。

### 3.2.3 氢气输送

氢气的输送有3种方式,分别是气氢、液氢和固氢<sup>[34]</sup>。目前,天然气、氢气的运输主要有2类:长管牵引式和管线牵引式。由于管线运输具有大规模、长距离等优势,而纯氢气管线建设成本较高,故掺氢天然气管线运输技术是目前国内外关注的焦点<sup>[35]</sup>。液体氢气的输送方式:液体氢气由液体氢气卡车或专门的液体氢气驳船输送,适合于大容量和长距离的输送。在中国,液态氢输送技术的发展还处于起步阶段,而且还受到了关键设备的限制。氢气的运输成本居高不下,主要是因为它要求的传输压力要在20 MPa以下<sup>[36]</sup>。而固氢传输是指通过将氢气固定在一中固态媒介中进行氢气的储存和运输。目前常用的固态媒介包括氢化物、金属有机框架材料、纳米结构材料等。与传统氢气储存方式相比,固氢传输具有更高的储氢密度和更低的氢气压力,同时更加安全可靠,可以避免氢气泄漏和爆炸等安全隐患。

## 3.3 能源存储技术

要想提高能量储存的效率,就必须利用各种储能技术,目前最常见的有储电、储热、储气3类。

在众多储电技术中,适合于综合能源系统中的储电技术主要是储能电池,按照化学反应物质的差异,它可以被划分成钠硫电池、液流电池、铅酸电池、锂离子电池和镍氢电池。随着科技的进步,以锂或锂合金作为负极,以非水电解液作为电解液制备的锂离子电池,在使用寿命长、储能密度高、质量轻、适应性强等方面表现出巨大的优势。然而,当前还没有实现工业应用全固态锂离子电池。

储热技术目前主要有显热存储、变相存储、化学反应存储3种。其中化学反应存储是通过化学反应产生热量进行储热,具有储能密度高、可长期存储等优点。而储气技术的目标是储氢,它可以被划分成3类,分别是物理储氢、固体储氢和有机液体储

氢。在综合智慧能源系统中储能系统是保证系统正常、稳定运行的重要组成部分。

### 3.3.1 储电技术

储电技术是指将电能转化为其他形式的能量进行存储,然后在需要时将其转换回电能的技术。这种技术可帮助克服电能的间歇性和波动性,为电力系统提供更高的灵活性和可靠性。以下是一些常见的储电技术<sup>[37]</sup>。

(1)锂离子电池。这种电池使用锂离子作为电荷载体,具有高能量密度、低自放电率和长寿命等优点。它们被广泛用于家庭和商业储能系统、电动汽车和便携式电子设备中。

(2)钠硫电池。这种电池使用液态钠和固态硫作为电极,具有高能量密度和长寿命等优点。它们被广泛用于电网储能和电动汽车领域。

(3)液流电池。这种电池使用液态电解质和可充电电极,具有高能量密度和可充电性等优点。它们被广泛用于电网储能、船舶和无人机等领域。

(4)超级电容器。这种设备使用电极和电解质存储电荷,具有高功率密度、长寿命和快速充放电等优点。它们被广泛用于电动汽车和电网储能领域。

(5)压缩空气储能。这种技术将电能转换为压缩空气进行储存,然后在需要时通过膨胀机将其转换回电能。它们被广泛用于电网储能和可再生能源领域。

总的来说,储电技术的发展正在推动能源转型和可持续发展,为我们创造更加清洁、可靠和可持续的能源未来。

### 3.3.2 储热技术

热储存技术可划分为显热储热、相变储热和热化学储热。目前最广泛使用于大型显热储热的水蓄冷/热型分布式能源系统以及熔融盐储热系统,存在存储密度较小、设备体积较大等问题。文献[38]介绍了相变储热,它是一种储能密度大、设备简便的新型储能技术,但储能/释能速度慢,适用于小型化、分布式储能。热化学储热技术是指通过化学反应或物理变化来吸收或释放热量,以实现热能的储存和利用的技术。其应用领域广泛,包括太阳能热利用、工业余热回收利用、节能减排等。与前2种技术比较,热化学蓄热技术有着更大的优势,但仍需进一步加强材料研发、系统设计和应用研究,以促进其在实际应用中的广泛推广和应用。

### 3.3.3 储气技术

储气技术的目标是储氢,它可以被划分成物理储氢、固体储氢和有机液体储氢3种类型,在物理储

氢中,又包括低温液体储氢和高压气态储氢2种类型。液体低温贮氢技术具有高密度和高纯度的优点,但是在贮氢时能耗和费用较高;气体压力储存技术成熟,应用广泛,但是其体积小且有泄漏、爆炸的危险;固态氢存储技术是一种容积密度高,操作简单,纯度高的氢存储技术,但是其品质密度低,成本偏高,目前还在探索中;而有机液体储氢因其纯度低,催化剂易失活以及价格昂贵,还没有得到广泛的工业应用<sup>[34]</sup>。

储能技术可以通过存储多能互补产生的氢气来提高电网接纳间歇式多能互补的能力。文献[39]提出了利用氢气发电来存储可变的可再生能源(Renewable Energy, RE),将氢能系统(能源-氢气-电能)划分为生产、储存、安全和利用4个主要阶段,并指出制氢途径和具体技术选择取决于可利用的能量和原料的类型,以及所需的最终用途和纯度。此外,文献还对制氢途径和相关技术进行了综述,以说明氢方格的各个角上的相互联系。

### 3.4 能源消费技术

我国现有的能源消费结构中煤炭、石油和天然气在当前能源消耗中的比例仍然很大,不仅消耗巨大,还存在着利用效率低下的问题。而综合能源系统可以提高能源利用效率且保证低碳排放。文献[40]概述了集成式综合智慧能源管理系统在建筑、工业、运输等各个领域的广泛应用,其主要功能是提供高效的能量管理。在建筑方面,通过变频改造、废热回收、天然冷源、电能替代、环保改造等,逐步朝着“近零能耗”“零能耗”的方向发展。在运输方面,伴随着电动汽车数量的逐年增加,电能替代的速度也在加快,分布式光伏、风电、储能和换电等技术也逐步融入到了绿色交通系统之中。

而基于不同算法的综合能源系统管理也能改进能源利用效率。文献[41]提出了一种基于改进深度Q网络(Modified Deep Q Network, MDQN)算法的多园区综合能源系统能量管理方法,克服了传统数学类方法在模型近似上的局限性以及进化类算法局限于局部最优的缺陷,同时解决了传统DQN方法在大规模离散动作空间上探索效率低下的问题。文献[42]构建了一种沼气发电系统、光伏发电系统与微型燃气轮机驱动下的源-储-荷协同多目标能量管理模型,所提出的改进算法和能量管理模型在不同场景下均有效地提高了经济效益和环保效益,同时提升了能源利用效率。

### 3.5 能源智慧化技术

在整个能源生产链条中,都存在着能源智能化的问题。利用物联网、大数据、多目标优化、人工智

能等技术,实时监测、分析和计算能源生产、调度、输配、存储、销售、使用等过程中的业务数据、性能数据和运行数据,实现能源预测、多参数寻优和闭环调控,推动能源和信息化的深度融合,实现能源生产、运输、消费和管理的智能化,并对其进行故障判断,进行预测性维护,从而提升能源的使用效率,保证系统安全、稳定运行<sup>[43-44]</sup>。

文献[45]将能源的生产、传输和消费三者的相互配合,以“虚拟电厂”为客户端提供能源服务,将能源进行集成、优化调整 and 有效管理,从而达到能源安全、高效、绿色、低碳的目的。文献[46]将传感技术、云平台技术、区块链技术、物联网等技术引入进来,对区域内设备状态、用户特征、用能负荷等展开分析挖掘并进行智能预测,利用互联网+人工智能的模式,构建数字化能源托管,构建智慧能源管理中心,从而达到能源生产到消费的全周期智慧化管理目的。

### 3.6 多能协同优化控制技术

文献[47]提出可为客户提供分布式供能的智能化多能量管理系统,在智能能量管理下,可有效提升能量利用效率,增强多种能量的互补性与协作性,从而最大限度地发挥系统性能。在保证为用户提供稳定能源供应的前提下,增加可再生能源在能源系统中的比重及利用率,降低对不可再生资源的依赖程度,从而达到良好的节能减排效果。其中,光伏、风电等多个类型间歇电源之间的协同与最优配置是其在工程中的核心问题。

在多能互补系统的优化运行过程中,应综合考虑间歇能源的输出不确定性、可控分布式能源的功率调控受限、储能装置的时变特征等因素,综合利用分布式能源和灵活负载2种不同类型的可控能源,建立相应的调控模型,从而达到对可控分布式能源的积极调控与最优调控。

另外,场景构建在多能互补的优化控制中也更为复杂。文献[48]提出了综合能源系统的非线性模型,并对其线性化及优化规划,同时,评估了规划方案的可靠性以及电转气厂站消纳可再生能源的效益。文献[49]采用2阶段规划模型,其中第1阶段采用多目标遗传算法进行系统的结构优化;第2阶段则使用混合整数规划方法解决系统的最优运行问题。

## 4 综合智慧能源发展展望和建议

### 4.1 前景展望

“十四五”是国家实现能源“清洁、低碳、安全、高效”的重要时期,从“产”到“用”,其整个智慧化过

程涉及“源-网-荷-储”多个产业领域,提升其“用能”层次,推进“用能”智能化改造必然是“用能”发展的方向。目前我国能源生产技术的发展方向是:推进燃气轮机装置的国产化,推进高效、低排放、耦合可再生能源冷热电联产(CCHP)系统的推广,强化系统的匹配与优化,增强其稳定性与鲁棒性;针对空气源热泵在低温环境中存在的突出问题,加强对制冷剂、压缩机和超临界CO<sub>2</sub>等技术和设备的研发,促进高温和超高温热泵技术在工业中的推广应用,从而实现对电力的有效替代;推动太阳能电池及风力发电技术的发展,提升其转化效率,开发新型有机太阳能电池,拓展其应用范围;对生物质气化工工艺的适用条件进行科学选取,并在此基础上对其进行进一步研究;加速推进电解水制氢的关键技术与核心装备自主研发,增加可再生资源生产氢气的比例,促进“绿氢”的有效使用。

(1)电力传输技术的发展方向主要有:加大对柔性直流输电、LCC-MCC串联式直流输电、高温超导直流输电及变流器等研发力度;推进氢气运输核心装备的自主研发,加快氢气运输领域的发展。

(2)能量储存技术主要有4个方面:降低液体电池组的造价;提高液体电池组的工作效率;促进液体电池组与新型能量储存技术的发展;促进相变型和热化学型蓄热材料的发展。

(3)能源消费技术的发展方向包括:强化在建筑、交通及工业等领域的综合智慧能源系统,加速推进热泵、废热回收和换电等技术的应用,实现终端电能替代;积极推进“零能耗”建设,促进城市建设向绿色、低碳方向发展。

(4)能源智慧化技术的发展方向有:统一能源行业通信协议标准,构建智慧能源集成大平台;解决云平台、大数据、物联网、移动互联网、人工智能、区块链等领域的核心技术难题,推进智慧能源体系的综合创新和融合应用。

(5)能源联合优化调控的发展方向主要是实现分布式电源、储能设备与受控负载的高效协调。

### 4.2 发展建议

根据目前我国综合智慧能源发展状况以及未来的发展趋势,本文给出了如下4点建议。

(1)要推动智能化电力市场建设。在中国,综合智能能源市场的需求很多,分布也很广泛,因此,必须在与市场有关的制度规范、开发建设、电力交易和运行供给等方面进行持续的改进,从而建立起一个有序、健全的综合智能能源市场。

(2)要提升能源数据管理能力。建立完善的能源数据采集、传输、存储和分析平台,提升能源数据管理和利用的能力。通过大数据、人工智能等技术手段,对能源系统进行智能化分析和预测,为能源

决策提供科学依据。

(3)要推进以电能为基础的客户端供电业务的发展。随着智慧化能源系统的发展,其所面临的业务环境和最终用户将会更加多样化,更加灵活多变,因此需要进行能源服务的方式进行创新,以满足用户的需要,为用户提供绿色、低碳、节能、生态、智慧的能源供给。

(4)要推进我国自主研发的核心技术和装备。为了加速能源开发,提升能源安全水平,需要加速推动区块链、储能、燃气轮机、质子交换膜等关键技术与装备的自主研发,并实现自主创新。

## 5 结论

综合智慧能源系统将化石能源与可再生能源进行了有效的融合,在对能源生产技术、能源输送技术、能源存储技术、能源消费技术、能源智能化技术以及多能协同优化技术等关键技术进行研究与应用的过程中,最终使原本以化石能源为主的能源结构,变成了以清洁能源为主、化石能源为辅的能源结构,同时让原本以集中式能源为主的供应方式,变成了以分布式与集中式并重的供应方式。

积极发展综合智慧能源系统,利用过程中的横向互补和纵向协同,建立起一个能量多元化的供给体系,从而提升综合能源系统的绿色低碳程度,强化对能源的供给保障。而智能化集成供能体系的普及,将促进我国能耗水平的提升,为其提供面向客户的能量服务,将会使我国的能耗水平得到显著提升。随着“碳中和”目标的实现,智能化的综合智慧能源体系将会得到广泛的应用。

## 参考文献:

- [1]《中国能源发展报告2022》:我国能源绿色低碳转型加快推进[J].经济导刊,2022(7):6.
- [2]张士宁,谭新,侯方心,等.全球碳中和形势盘点与发展指数研究[J].全球能源互联网,2021,4(3):264-272.  
ZHANG Shining, TAN Xin, HOU Fangxin, et al. Research on global carbon neutrality target and development index [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4 (3) : 264-272.
- [3]周伏秋,邓良辰,冯升波,等.综合能源服务发展前景与趋势[J].中国能源,2019,41(1):4-7,14.  
ZHOU Fuqiu, DENG Liangchen, FENG Shengbo, et al. Prospects and trends of integrated energy services [J]. Energy of China, 2019, 41(1):4-7, 14.
- [4]董霜.综合智慧能源发展现状及关键技术的研究[J].中国工程咨询,2017(4):43-45.  
DONG Shuang. Research on development status and key technologies of integrated smart energy [J]. Chinese Consulting Engineers, 2017(4):43-45.
- [5]曹军威,孙嘉平.能源互联网与能源系统[M].北京:中国电力出版社,2016:53-57.
- [6]俞学豪,袁海山,叶昀.综合智慧能源系统及其工程应用[J].中国勘察设计,2021(1):87-91.  
YU Xuehao, YUAN Haishan, YE Yun. Integrated intelligent energy system and its engineering application [J]. China Exploration & Design, 2021(1):87-91.
- [7]王宏,闫园,文福拴,等.国内外综合能源系统标准现状与展望[J].电力科学与技术学报,2019,34(3):3-12.  
WANG Hong, YAN Yuan, WEN Fushuan, et al. Current status and prospects of comprehensive energy system standards at home and abroad [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3):3-12.
- [8]董旭,袁海山,叶昀,等.园区综合能源系统现状与技术趋势[J].能源与环境,2021(4):16-19.  
DONG Xu, YUAN Haishan, YE Yun, et al. Current status and technological trends of integrated energy systems in industrial parks [J]. Energy and Environment, 2021 (4) : 16-19.
- [9]陆王琳,陆启亮,张志洪.碳中和背景下综合智慧能源发展趋势[J].动力工程学报,2022,42(1):10-18.  
LU Wanglin, LU Qiliang, ZHANG Zhihong. Development trend of comprehensive intelligent energy under the background of carbon neutrality [J]. Journal of Power Engineering, 2022, 42(1):10-18.
- [10]朱海东,郝浩,郑剑,等.基于冷热电多能互补的园区综合能源系统设计[J].华电技术,2021,43(4):34-38.  
ZHU Haidong, HAO Hao, ZHENG Jian, et al. Design of integrated energy system for parks based on complementation of cold, heat and electricity [J]. Huadian Technology, 2021, 43(4):34-38.
- [11]窦超.冷热电联供与地源热泵耦合的分布式供能系统研究[D].北京:华北电力大学,2018.  
DOU Chao. Research on distributed energy supply system coupling combined cooling, heating and power with ground source heat pump [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [12]YANG Gan, ZHAI Xiaoqiang. Optimization and performance analysis of solar hybrid CCHP systems under different operation strategies [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 133:327-340.
- [13]任福康,陈宜,王江江.耦合太阳能和地热能的冷热联供系统优化[J].工程热物理学报,2021,42(1):16-24.  
REN Fukang, CHEN Yi, WANG Jiangjiang. Optimization of combined cooling, heating, and power system coupled with solar and geothermal energies [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(1):16-24.
- [14]高秀芝,王洋浩,耿坤池,等.热泵供暖技术发展现状及展望[J].制冷与空调,2019,19(5):71-78,83.  
GAO Xiuzhi, WANG Fenghao, JI Kunchi, et al.

- Development status and prospects of heat pump heating technology [J]. *Refrigeration and Air Conditioning*, 2019, 19(5):71-78, 83.
- [15] 胡斌, 吴迪, 姜佳彤, 等. 水蒸气超高温热泵系统的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(4):833-840.  
HU Bin, WU Di, JIANG Jiatong, et al. Experimental study of a water vapor compression heat pump with very high temperature output [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(4):833-840.
- [16] 孟静惟, 贾玮, 张慧文, 等. “太阳能光伏+”多场景应用助力应对气候变化[J]. *中华环境*, 2021(S1):44-47.  
MENG Jingwei, JIA Wei, ZHANG Huiwen, et al. "Solar photovoltaic + "multi scenario application helps to cope with climate change [J]. *China Environment*, 2021 (S1) : 44-47.
- [17] 王冬, 张可佳, 张洋. 国内外 BIPV 相关标准的发展现状[J]. *太阳能*, 2021(5):12-19.  
WANG Dong, ZHANG Kejia, ZHANG Yang. Development status of BIPV related standards at home and abroad [J]. *Solar Energy*, 2021(5):12-19.
- [18] 莫一波, 杨灵, 黄柳燕, 等. 各种太阳能发电技术研究综述[J]. *东方电气评论*, 2018, 32(1):78-82.  
MO Yibo, YANG Ling, HUANG Liuyan, et al. Review of various solar power generation technologies [J]. *Dongfang Electric Review*, 2018, 32(1):78-82.
- [19] 张金平, 周强, 王定美, 等. 太阳能光热发电技术及其发展综述[J]. *综合智慧能源*, 2023, 45(2):44-52.  
ZHANG Jinping, ZHOU Qiang, WANG Dingmei, et al. Review on solar thermal power generation technologies and their development [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2023, 45(2):44-52.
- [20] 崔双双, 孙单勋. 分工况下风电机组各变量相关性研究[J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(12):49-55.  
CUI Shuangshuang, SUN Shanxun. Study on the correlation of wind turbine variables under different conditions [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(12):49-55.
- [21] 刘晓辉, 高人杰, 薛宇. 浮式风力发电机组现状及发展趋势综述[J]. *分布式能源*, 2020, 5(3):39-46.  
LIU Xiaohui, GAO Renjie, XUE Yu. Current situation and future development trend of floating offshore wind turbine [J]. *Distributed Energy*, 2020, 5(3):39-46.
- [22] 许国东, 叶杭冶, 解鸿斌. 风电机组技术现状及发展方向[J]. *中国工程科学*, 2018, 20(3):44-50.  
XU Guodong, YE Hangye, XIE Hongbin. The current state and future development of wind turbine technology [J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(3):44-50.
- [23] 王月普. 风力发电现状与发展趋势分析[J]. *电力设备管理*, 2020(11):21-22.  
WANG Yuepu. Analysis of current situation and development trend of wind power generation [J]. *Power Equipment Management*, 2020(11):21-22.
- [24] 雷超, 李韬. 碳中和背景下氢能利用关键技术及发展现状[J]. *发电技术*, 2021, 42(2):207-217.  
LEI Chao, LI Tao. Key technologies and development status of hydrogen energy utilization under the background of carbon neutrality [J]. *Power Generation Technology*, 2021, 42(2):207-217.
- [25] SERNA A. Evaluation of a long term system coupled with a short term system of a hydrogen-based microgrid [C]// *International Renewable Energy Congress (IREC)*, Amman, Jordan, 2017:1-6.
- [26] 符冠云. 氢能在我国能源转型中的地位和作用[J]. *中国煤炭*, 2019, 45(10):15-21.  
FU Guanyun. The status and role of hydrogen energy in china's energy transition [J]. *China Coal*, 2019, 45(10):15-21.
- [27] 肖陆飞, 哈云, 孟飞, 等. 生物质气化技术研究与应用进展[J]. *现代化工*, 2020, 40(12):68-72, 76.  
XIAO Lufei, HA Yun, MENG Fei, et al. Research and application progress on biomass gasification technologies [J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(12):68-72, 76.
- [28] SUN H, WU C. Autothermal CaO looping biomass gasification for renewable syngas production [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(15):9298-9305.
- [29] 刘健, 刘雨鑫, 庄涵羽. 虚拟电厂关键技术及其建设实践[J]. *综合智慧能源*, 2023, 45(6):59-65.  
LIU Jian, LIU Yuxin, ZHUANG Hanyu. Key technologies and construction practices of virtual power plants [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2023, 45(6):59-65.
- [30] 黄俊玮, 谭建成, 文泓铸. LCC-MMC 型混合直流输电系统综述[J]. *电气开关*, 2019, 57(5):1-5, 10.  
HUANG Junwei, TAN Jiancheng, WEN Hongzhu. A review on LCC-MMC hybrid HVDC system [J]. *Electric Switcher*, 2019, 57(5):1-5, 10.
- [31] 徐政, 王世佳, 李宁璨, 等. 适用于远距离大容量架空线路的 LCC-MMC 串联混合型直流输电系统[J]. *电网技术*, 2016, 40(1):55-63.  
XU Zheng, WANG Shijia, LI Ningcan, et al. A LCC and MMC series hybrid HVDC topology suitable for bulk power overhead line transmission [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(1):55-63.
- [32] 肖立业, 林良真. 超导输电技术发展现状与趋势[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(7):1-9.  
XIAO Liye, LIN Liangzhen. Status quo and trends of superconducting power transmission technology [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(7):1-9.
- [33] 曾竞, 韩杰, 张国强, 等. 区域供冷(热)管网优化技术及研究进展[J]. *煤气与热力*, 2014, 34(12):22-26.  
ZENG Jing, HAN Jie, ZHANG Guoqiang, et al. Optimization technologies and research progress of district cooling and heating networks [J]. *Gas & Heat*, 2014, 34(12):22-26.

- [34]李建林,李光辉,马速良,等.氢能储运技术现状及其在电力系统中的典型应用[J].现代电力,2021,38(5):535-545.  
LI Jianlin, LI Guanghui, MA Suliang, et al. An overview on hydrogen energy storage and transportation technology and its typical application in power system[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(5): 535-545.
- [35]李敬法,苏越,张衡,等.掺氢天然气管道输送研究进展[J].天然气工业,2021,41(4):137-152.  
LI Jingfa, SU Yue, ZHANG Heng, et al. Research progresses on pipeline transportation of hydrogen-blended natural gas [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41 (4) : 137-152.
- [36]陈晓露,刘小敏,王娟,等.液氢储运技术及标准化[J].化工进展,2021,40(9):4806-4814.  
CHEN Xiaolu, LIU Xiaomin, WANG Juan, et al. Technology and standardization of liquid hydrogen storage and transportation [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(9): 4806-4814.
- [37]缪平,姚祯,LEMMON J,等.电池储能技术研究进展及展望[J].储能科学与技术,2020,9(3):670-678.  
MIAO Ping, YAO Zhen, LEMMON J, et al. Current situations and prospects of energy storage batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9 (3) : 670-678.
- [38]姜竹,邹博杨,丛琳,等.储热技术研究进展与展望[J].储能科学与技术,2022,11(9):2746-2771.  
JIANG Zhu, ZOU Boyang, CONG Lin, et al. Research progress and prospects of thermal energy storage technology [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9) : 2746-2771.
- [39]FURAT D, MARTIN A, SHAFIULLAH G. Hydrogen production for energy: An overview [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(7) : 3847-3869.
- [40]张新开.长三角地区办公建筑零能耗技术策略的全生命周期经济性研究[D].南京:东南大学,2019.  
ZHANG Xinkai. Life cycle economic study on zero energy consumption technology strategies for office buildings in the yangtze river delta region [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [41]薛溟枫,毛晓波,肖浩,等.基于改进深度Q网络算法的多园区综合能源系统能量管理方法[J].电力建设,2022,43(12):83-93.  
XUE Mingfeng, MAO Xiaobo, XIAO Hao, et al. Energy management method for multi-park integrated energy systems based on improved deep qnetwork algorithm [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(12) : 83-93.
- [42]陈以明,李治.智慧能源发展方向及趋势分析[J].动力工程学报,2020,40(10):852-858,864.  
CHEN Yiming, LI Zhi. Analysis on the development trend and features of smart energy sources [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40 (10) : 852-858, 864.
- [43]张政林,张惠娟,孙文治,等.基于改进旗鱼算法的综合能源系统能量管理[J].电力系统保护与控制,2022,50(22):142-151.  
ZHANG Zhenglin, ZHANG Huijuan, SUN Wenzhi, et al. Energy management of integrated energy systems based on improved sailfish algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22), 142-151.
- [44]魏彤.“十四五”时期能源综合利用与智慧化转型探析[J].中国工程咨询,2020(9):57-61.  
WEI Tong. Analysis of energy comprehensive utilization and intelligent transformation during the 14th five year plan period [J]. Chinese Engineering Consultants, 2020 (9): 57-61.
- [45]陈烈.低碳发展视角下的大型现代园区智慧化建设研究[J].建筑科技,2020,4(6):33-36.  
CHEN Lie. Smart huge industry park development by from low-carbon perspective [J]. Build Technology, 2020, 4(6) : 33-36.
- [46]黄清.发展智慧能源是顺应能源大势之道[J].中国能源,2018,40(12):14-16.  
HUANG Qing. Developing smart energy is the way to adapt to the energy trend [J]. Energy of China, 2018, 40 (12) : 14-16.
- [47]王宇波,全贞花,靖赫然,等.多能互补协同蓄能系统热力学分析与运行优化[J].化工学报,2021,72(5):2474-2483,2906.  
WANG Yubo, QUAN Zhenhua, JING Heran, et al. Thermodynamic analysis and operational optimization of multi-energy complementary cooperative energy storage systems [J]. Journal of Chemical Engineering, 2021, 72(5) : 2474-2483, 2906.
- [48]GUO L, LIU W, CAI J, et al. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74: 433-445.
- [49]BARATI F, SEIFI H, SEPASIAN M S, et al. Multi-period integrated framework of generation, transmission, and natural gas grid expansion planning for large-scale systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5) : 2527-2537.

(本文责编:齐琳)

收稿日期:2023-05-04;修回日期:2023-06-05  
上网日期:2023-06-15;附录网址:www.ienergy.cn

#### 作者简介:

滕佳伦(1999),男,在读硕士研究生,从事综合能源系统规方面的研究,tengjia7un@163.com;

李宏仲(1977),男,副教授,博士,从事综合能源系统规划方面的研究,lhz\_ab@263.net。