

氢燃料电池车辆加氢制氢网络规划的综述与展望

何晨可¹, 陈蕾², 徐玮韡³, 栾捷⁴, 朱继忠¹

(1. 华南理工大学, 广州 510641; 2. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310030; 3. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310030; 4. 国网浙江电动汽车服务有限公司, 杭州 310030)

摘要: 推动氢燃料电池车辆(hydrogen fuel cell vehicles, HFCV)加氢制氢网络(hydrogen refueling and production network, HRPN)的规划建设, 有利于提升电力、氢能燃料等新能源、清洁能源在交通运输领域的应用。首先, 阐述了HRPN的基本架构, 对包括现场加氢制氢站、集中制氢-管线输送加氢网络、集中制氢-物流输送加氢网络的不同形式的HRPN进行叙述。然后, 对HRPN国内外研究现状进行概述, 分析了HRPN各类制氢设备、储氢设备、车辆加氢设备运行和配置模型, 对氢气输送网络的运行和配置模型进行构建, 并介绍了HRPN氢气输送网络跨区域氢能交互模式。在上述研究背景下对HRPN规划统一模型进行了构建。最后总结了目前HRPN规划发展所面临的瓶颈, 并对今后的研究方向进行了展望。

关键词: 氢燃料电池车辆; 加氢制氢网络; 氢气输送网络

Review and Prospect of Planning of Hydrogen Refueling and Production Network for Hydrogen Fuel Cell Vehicles

HE Chenke¹, CHEN Lei², XU Weiwei³, LUAN Jie⁴, ZHU Jizhong¹

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310030, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Electric Power Science Research Institute, Hangzhou 310030, China; 4. State Grid Zhejiang Electric Vehicle Service Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract: Promoting the planning and construction of the hydrogen refueling and production network (HRPN) for hydrogen fuel cell vehicle (HFCV) is beneficial for enhancing the application of new and clean energy such as electricity and hydrogen fuel in the transportation sector. Firstly, the basic architecture of HRPN is explained. The different forms of HRPN are described including on-site hydrogen refueling stations, centralized hydrogen production pipeline transportation hydrogen refueling networks, and centralized hydrogen production logistics transportation hydrogen refueling networks. Then, an overview of the current research status of HRPN both domestically and internationally is summarized. The operation and configuration models of various hydrogen production equipment, hydrogen storage equipment, and vehicle hydrogenation equipment in HRPN are described. The operation and configuration models of the hydrogen transportation network are constructed, and the cross regional hydrogen energy interaction mode of the HRPN hydrogen transportation network is introduced. Under the above research background, the unified model of HRPN planning is constructed. Finally, the current bottlenecks faced by HRPN planning and development are summarized, and future research directions are discussed.

Key words: hydrogen fuel cell vehicle; hydrogen refueling and production network; hydrogen transportation network

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177087); 国网浙江省电力有限公司科技项目(2023FD04)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52177087); the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (2023FD04).

0 引言

氢能技术在全球范围内掀起了新一轮的能源革命浪潮^[1]。氢能具有清洁零碳、可大规模长周期存储等优势^[2-3]。氢燃料电池车辆(hydrogen fuel cell vehicles, HFCV)以其能量密度高、零排放、加注速度快、高能量效率和长续航里程等优点具有广阔发展前景^[4-5],合理甚至超前布局 HFCV 制氢加氢设施(hydrogen refueling and production network, HRPN),对 HFCV 发展具有重要意义^[6-8]。

截至 2021 年,我国风光装机规模占装机总量 26.9%,发电量占总发电量 11.8%^[3]。预计到 2025 年,我国新能源汽车销量将达到总销量的 20%左右,HFCV 保有量约为 5 万辆^[4],亟需加快建设加氢站^[9]。截至 2022 年,全球共 814 座加氢站投运,我国已建加氢站 330 座,预计 2035 年建成 5 000 座^[10]。

中共中央、国务院、发改委、能源局等机构部门近些年陆续制定出台了《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》、《2030 年前碳达峰行动方案》、《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》、《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》、《“十四五”现代能源体系规划》、《新能源汽车产业发展规划(2021—2035 年)》等一系列旨在大力推进 HFCV 技术发展、加快加氢基础设施规划布局和建设重大战略方针与政策^[7, 11-15]。

在国家政策支持下,众多企业都相继加入到 HFCV 及其加氢制氢基础设施相关科研示范工程研究和实践中来。从浙江大陈岛^[16]、安徽六安^[17],再到甘肃张掖^[18]、鄂托克前旗^[19]、河北沽源^[20]等氢能示范项目,逐步实现了对氢能工程验证和应用。

在氢能利用方面,当下氢能刚进入起步阶段,氢能相关设备转化效率低以及制氢、储氢、运氢方面存在一定的安全问题^[21]。氢能可实现新能源多途径就近高效利用^[22]。氢能开发利用多从优化自身运行角度出发,未能充分发挥它的灵活调节作用^[3]。氢能可借由储氢设备进行灵活转移,与用氢设备联合将具备极大的调度潜力^[23]。氢基交通电气化几乎不需要对电网进行昂贵而广泛的升级改造,同时氢储能能量转换效率较低^[24]。我国氢气的主要来源是煤制氢,制取释放大量二氧化碳^[25]。鲜有研究考虑

多种氢气的协调利用、优势互补和碳减排问题^[26]。氢气是促进风电消纳和实现“高发低储”套利的一个有效途径^[27]。电制氢设备可以作为可控负荷消纳新能源电力^[28],电制氢效率会随输入功率变化而改变,需要予以考虑^[9]。

在 HFCV 方面,兼备交通、电力双重属性的新能源汽车成为了达成“双碳”目标的关键^[29]。考虑氢燃料电池汽车和氢气长管拖车这两类灵活调度资源的最优负荷削减模型构建机理尚未明晰^[30]。氢能汽车出行特性及与新型氢能源系统之间的耦合关系亟待挖掘^[31]。考虑氢燃料电池汽车充能行为的调度潜力具有重要意义^[32]。氢电混合动力车大量投入后将导致能源系统在负荷侧的耦合形式更复杂^[33]。

在 HFCV 加氢制氢网络规划和运行方面,还存在一些问题亟待解决,其中 HFCV 的能量补给设施的建设和管理是重中之重^[5],另外一个重要问题是容量配置问题^[6]。加氢站面临着站址选择困难、建设成本高的情况^[34],需考虑加氢站规划和交通系统之间的时空耦合^[8],合理地对电-氢耦合的复杂能源系统进行规划与配置是需要研究的重要课题^[35]。多数研究的加氢制氢站处于离网状态^[1],但其在规划时需考虑周围住户的接受程度^[36],且该规划是非线性的复杂优化问题^[36]。大多数研究很少结合加氢站与交通网络^[4]。但制氢、加氢站规划需要考虑制氢-输氢-储氢-用氢时空分布与输氢-加氢路径优化^[37],考虑其不确定性和非线性问题^[38]。加氢站规划层面的多主体协调均有失公平性^[10]。目前关于加氢设施容量配置的研究大多局限于系统的经济性^[9],加氢、气、电和交通多网络的协同效应尚未得到充分的研究^[39]。

在氢气输送方面,考虑到氢气的易燃易爆性,以安全可靠的方式运输氢气至关重要^[40]。氢能的全面利用的障碍主要包含利润低、社会适应性差、物流、运营和维护成本高^[41]。氢储能可以将氢气的生产和运输将完全解耦,但会增加大量投资^[42]。具有经济性的氢供应链需要仔细考虑供应链的所有阶段,包括生产、运输、储存和最终使用,以及它们之间的相互依赖关系^[43]。其中,氢气输送主要包含氢气管线输送和物流车辆输送两个方面。

1)在氢气管线输送方面,目前没有足够的 HFCV 来证明氢管道系统建设的合理性^[44]。多数研究集中在氢输送网络或输电网络单独规划上,没有

考虑它们之间的耦合,且常假设这些网络属于同一个利益主体^[45]。混氢天然气技术可有效解决纯氢运输成本高的问题^[46],含氢能气网系统特性复杂^[47]。

2)在氢气物流输送方面,氢气可以通过氢管拖车运输,这使得氢能系统的运行与其他能源技术有很大不同^[48]。氢能已经逐步用于交通运输领域,但大范围推广仍受限于氢供应链基础设施完善程度^[49]。制约氢能广泛运用的因素包括氢能高昂的运输费用同样不可忽视^[5]。如果没有氢气网络的建设,氢气和电力网络的能量流就无法完全协调^[50]。可利用交通工具在各电-氢综合能源系统之间进行氢能运输,合理调配氢资源^[2]。电力传输是实时的,而氢气物流运输不是实时的^[51]。高峰时段可能氢气管线网络堵塞,物流配送也会受到交通拥堵的影响^[39]。利用移动氢能卡车提高微电网在灾害条件下的恢复能力是一个至关重要的问题^[52]。现有的加氢站布局在研究城际和跨国运行规模时存在不足^[53]。氢气物流车辆(hydrogen logistics vehicles, HLV)具有车辆属性和储能属性,能够调节氢能流的时空分布^[10]。

基于上述研究背景,本文首先阐述了HRPN的基本架构;进而,叙述了包括现场加氢制氢站、集中制氢-管线输送加氢网络、集中制氢-物流输送加氢网络的不同形式的HRPN;并且,概述了HRPN的国内外研究现状;然后,阐述了HRPN各类制氢设备、储氢设备、车辆加氢设备运行模型,并构建容量配置模型;进而,构建了氢气输送网络的运行和配置模型;基于此,构建了包含HRPN规划统一模型;最后,对HRPN规划发展所面临的瓶颈进行了总结,并展望了今后的研究方向。

1 HFCV加氢制氢网络架构

加氢制氢网络的规划和运行主要是为了满足HFCV的加氢需求。HFCV加氢制氢网络主要由制氢站、加氢站、氢气运输网络构成,其架构如图1所示。

由于涉及不同能源系统、不同的制氢方式、不同的氢气运输方式,所以加氢制氢网络具备多种灵活商业模式清洁交通能源供给模式。根据涉及到的不同能源系统的(电、天然气、煤)以及不同制氢方式(电制氢、天然气制氢、煤制氢),制氢站(现场加氢站制氢站、集中制氢-统一配送模式中的集中

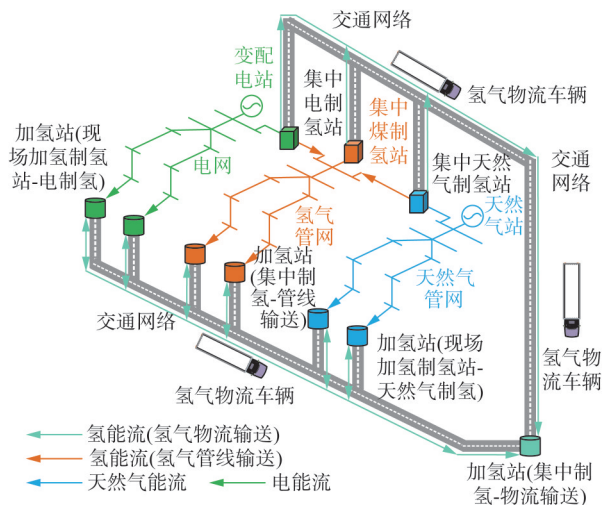


图1 HFCV加氢制氢网络架构

Fig. 1 Structure of hydrogen refueling and production network

制氢站)可以分为电制氢、天然气制氢、煤制氢站。

根据制氢和加氢的地理位置分布可以分为现场加氢制氢模式和集中制氢-统一配送模式。

1)现场加氢制氢模式主要在加氢站内配置制氢设备,站内制氢设备的运行需要配合氢储能的充放氢直接满足进站HFCV加氢负荷。现场加氢制氢站常布局在靠近负荷中心位置,而这些地点往往在城市中心,对土地的限制较严,所以制氢设备的容量往往较小,但集中制氢的大型制氢设备的制氢效率相对较高。同时,现场加氢制氢站需要外部能源系统(如电、天然气网)的能源补给,需要考虑电、天然气网的网络拓扑限制,此外,部分现场加氢制氢站在站内布置分布式可再生能源进行补充产能。现场加氢制氢站内基本设备包含:制氢设备、车辆加氢设备、氢储能设备。

2)集中制氢-统一配送模式主要是在异地制氢站大规模制氢,并结合氢气运输,集中制氢-统一配送模式可以根据不同的氢气运输方式分为:管线输送和物流输送模式,其中管线输送主要通过氢气管线进行加氢站氢气补给,物流输送主要通过氢气物流系统进行加氢站氢气补给。由于统一配送模式中制氢站和加氢站处于不同的地理位置,加氢站站不进行氢气制备,加氢站可以布置在城市负荷中心,而制氢站可以布置在对土地限制较小的地区(如郊区),所以可以布置大容量高效制氢设备以及大容量清洁能源进行产能。该模式加氢站无能源管线约束,选址更加灵活。同时,该模式可以更加灵

活地根据加氢站需求进行氢气物流配送,可以避免电力、天然气、氢气管线在负荷高峰时出现的拥堵现象。统一配送模式下制氢站基本设备包含制氢、氢储能设备;加氢站基本设备包含车辆加氢、氢储能设备。不同的是管线输送模式包含氢气管线,而物流输送模式包含 HL V。

此外,不同的加氢制氢网络商业模式可以构成组合,从而提高系统的灵活性和可靠性。此外,由于集中制氢-物流输送模式具备灵活的交通能源运输特性,可以在不同的加氢、制氢设施之间构建灵活氢能交互,比如在不同现场加氢制氢站之间、现场加氢制氢站与集中制氢-统一配送模式加氢站之间等,从而进一步提高系统灵活性和供氢可靠性。

2 HRPN 主要基础设施

2.1 现场加氢制氢站

加氢制氢站的主要设备包括电解槽、压缩机、储氢罐和加氢机^[1],通过电解槽将电能转化为氢气,然后经压缩机压缩存储到储氢罐中^[54]。电力、交通网络通过加氢制氢站耦合在一起^[1]。加氢制氢站是集中电解制氢与满足加氢需求为一体的新型电气设施^[8],加氢站的配套设备和建设运营规模不断扩大^[55]。

对加氢制氢站进行科学规划布局至关重要^[38]。加氢站从电网获取电能实现制氢, HFCV 在加氢站补充氢气,实现能量转化与传递^[29]。区别于充电站的布局,加氢制氢站布点优化要同时考虑安全性和经济性^[36]。

加氢制氢站将氢气出售给氢负荷获得收益,其运行成本包括购电、储氢、电解槽运维和氢气运输费用^[56]。加氢站配置储氢可平抑新能源发电与负荷波动^[28],且充电、加氢站共享土地资源,消纳光伏电能,实现站内氢能自产自消^[9]。现场加氢制氢站结构如图 2 所示。

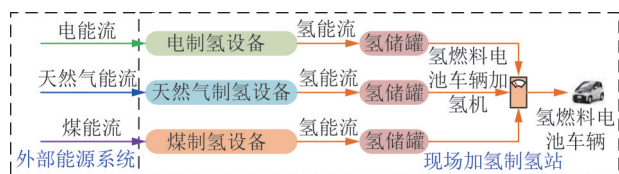


图2 现场加氢制氢站结构

Fig. 2 Structure of on-site hydrogen refueling and production station

2.2 集中制氢-管线输送加氢网络

HFCV 氢气可以通过卡车或管道从氢气生产厂以液体或气体的形式输送到加氢站^[53]。在现有的研究中,管道运输在大规模氢气运输中具有显著的经济优势,因此,规划管道和构建氢能网络对 HFCV 规划具有重要意义^[50]。目前未有足够的需求来证明建造管道系统的合理性^[44]。

从长远来看,通过管道输送压缩氢气对于大量和远距离输送氢能而言是最具成本效益的^[57]。通过管道拖车运输压缩氢气或通过冷罐车运输液氢费用高^[40]。管道是大容量氢气输送最有效、最方便的方法;然而,这需要巨大的资本投资,目前氢气需求有限,氢能管道输送并不经济^[58],并且管道的长度限制了氢气的输送能力^[41]。氢气运输成本在氢气总成本中占很大比例^[59],连接所有加氢站的加氢管网需要大量投资和较长的建设时间^[60]。

管道输送在长距离输送大量氢气方面具有显著优势^[39]。氢气管道比天然气管道贵得多^[42]。氢气管道可以通过管线起到氢气储存的作用^[43]。尽管大规模集中制氢更经济,但昂贵的运输成本或专用管道的巨大初始基础设施投资更有可能抵消经济优势^[61]。气体供应管线的动态特性滞后于负荷需求的变化^[62]。氢气还可以与天然气混合,并通过天然气管道输送^[48]。额外生产的氢气可以通过单独的管道注入工业或天然气网络^[63]。集中制氢-管线输送加氢网络结构如图 3 所示。

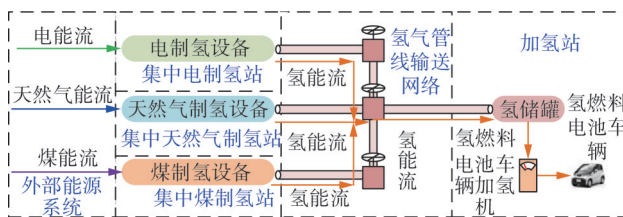


图3 集中制氢-管线输送加氢网络结构

Fig. 3 Structure of centralized hydrogen production-pipeline transportation refueling network

2.3 集中制氢-物流输送加氢网络

早期研究侧重于规划具有现场可再生能源和电解槽的加氢站,随着 HL V 和管道成本的降低,氢运输网络规划的研究愈发重要,氢气物流系统模型包含经典运输、车辆级运输和柔性路径运输模型,在公路运输中,氢被转化为压缩气体、液体或氢化合物形式^[45]。氢气可以通过管道、低温液氢罐

车和高压氢气罐拖车输送^[48]。HLV会受到交通拥堵的影响^[39],HLV作为移动存储设备,具有时空灵活性^[43],增强区域综合能源系统的弹性^[24]。

氢能服务运行是一个能源和运输的耦合问题,与分布式制氢方式相比,集中式制氢在安全管理和规模上具有一系列优势^[42]。城郊可再生能源制氢物流一体化方案可以满足氢能产储和长途货运等多重需求^[51]。在加氢站中实施的技术还取决于氢气物流、环境影响和经济成本^[53]。通过运输网络将氢罐运送到终端用户可以实现故障辅助^[52]。集中制氢-物流输送加氢网络结构如图4所示。

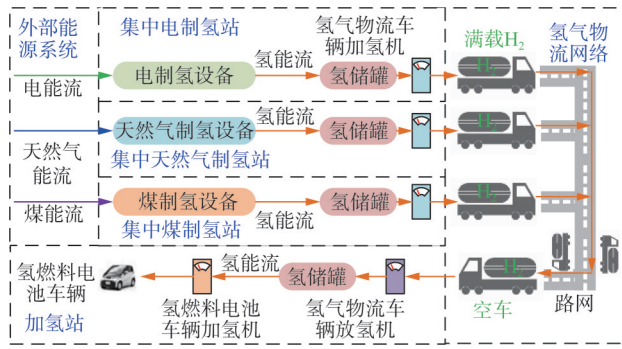


图4 集中制氢-物流输送加氢网络结构

Fig. 4 Structure of centralized hydrogen production-logistics transportation refueling network

3 HRPN 规划研究现状

3.1 现场加氢制氢站规划

现有研究中,文献[6]建立了电-氢汽车集成化能源站容量配置模型。文献[31]构建了包含家用氢能汽车的住宅氢能综合能源系统。文献[34]提出了基于可逆固体氧化物电池的电氢一体化能源站容量规划方法。文献[29]提出了一种计及碳排放流的光储充一体化电站和氢能汽车加氢站的联合规划模型。文献[8]提出了交通网-电网耦合框架下的加氢制氢站规划方法。文献[64]提出了电-热-氢综合能源系统多目标规划模型。文献[1]构建了考虑交通流量捕获的加氢制氢站与风电场规划模型。文献[38]构建了为加氢制氢站系统建模和运行模型。文献[36]构建了考虑配电网与氢燃料汽车耦合影响的加氢制氢站布点优化模型。文献[9]提出了耦合氢能的光储充电站多目标优化配置模型。

3.2 集中制氢-管线输送加氢网络规划

现有研究中,文献[40]采用氢能管线进行氢气

传输,提出了一种考虑碳排放流的为氢动力汽车供氢的电-氢-气一体化系统规划方法。文献[65]建立了加氢站、电解制氢站和氢气管道两阶段综合规划模型。文献[50]采用管道输送方式,提出了氢能汽车与可再生能源融合的供氢基础设施规划模型。文献[60]基于氢气管线传输建立了考虑氢气再分配的城市加氢站规划模型。

3.3 集中制氢-物流输送加氢网络规划

现有研究中,文献[66]考虑氢气公路运输,提出了具有可运输季节性储氢的发电和输电系统以及加氢链的协调规划模型。文献[59]提出了配电和氢能系统的多阶段规划模型,采用管道拖车进行氢气输送。

3.4 集中制氢-管线-物流输送加氢网络规划

现有研究中,文献[39]在氢气管线输送和氢气物流输送的架构上,提出了一种氢燃料电池电动汽车电网与加氢生产站协调规划策略。文献[43]基于氢气管线和物流运输的前提下,提出了一种氢供应链规划方法。文献[45]提出了一种输电和氢气运输网络的联合规划方法以协调优化电力和氢气基础设施的投资和运营。文献[67]提出了弃风/制氢/燃料电池汽车的系统规划模型,氢气在被压缩通过卡车或管道运送到燃料电池汽车加氢站。

4 HRPN 规划研究现状

4.1 现场加氢制氢站规划

4.1.1 制氢设备运行模型

4.1.1.1 质子交换膜电解槽电制氢设备运行模型

电制氢设备的电压和电流关系满足式(1)^[68]。

$$V_{\text{cell}}(t) = V_{\text{rev}} + \frac{RT_T}{2F} \ln \left(\frac{p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}^{0.5}}{a_{\text{H}_2\text{O}}} \right) + R_{\text{cell}} i_{\text{cell}}(t) + \frac{RT_T}{a_{\text{an}} F} \text{arsinh} \left(\frac{i_{\text{cell}}(t)}{2i_{\text{an}}} \right) + \frac{RT_T}{a_{\text{cat}} F} \text{arsinh} \left(\frac{i_{\text{cell}}(t)}{2i_{\text{cat}}} \right), \forall t \quad (1)$$

式中: $V_{\text{cell}}(t)$ 和 $i_{\text{cell}}(t)$ 分别为运行电压和电流; V_{rev} 为可逆电压; T_T 为运行温度; p_{H_2} 和 p_{O_2} 分别为 H_2 和 O_2 的分压; $a_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 H_2O 活度; R_{cell} 为等效欧姆电阻; i_{an} 和 i_{cat} 分别为阳、阴极交换电流; a_{an} 和 a_{cat} 分别为阳、阴极电荷转移系数; R 和 F 分别为理想气体常数和法拉第常数。

电解水耗电功率 $P^e(t)$ 和制氢量 $m_{\text{H}_2}^e(t)$ 分别满

足式(2)—(3), 两者关系和电解水效率 $\eta_{H_2}(t)$ 分别满足式(4)—(5)^[68]。

$$P^e(t) = k_1 \sum_{i=1}^{N_{stack}} u_i^e(t) N_{cell} V_{cell}(t) I_{cell}(t), \forall t \quad (2)$$

$$m_{H_2}^e(t) = k_2 \sum_{i=1}^{N_{stack}} u_i^e(t) \eta_f N_{cell} \frac{I_{cell}(t)}{2F}, \forall t \quad (3)$$

$$m_{H_2}^e(t) = P^e(t) k_2 \eta_f / [2F k_1 V_{cell}(t)], \forall t \quad (4)$$

$$\eta_{H_2}(t) = \frac{m_{H_2}^{HHV} m_{H_2}^e(t) \Delta t}{k_3 P^e(t) \Delta t} = \frac{m_{H_2}^{HHV} k_2' \eta_f}{2F k_1 V_{cell}(t)}, \forall t \quad (5)$$

式中: $I_{cell}(t) = A_{cell} i_{cell}(t)$ 为运行电流, 其中 A_{cell} 为有效反应面积; $u_i^e(t)$ 为第 i 个电解槽运行状态变量; N_{cell} 和 N_{stack} 分别为串联电解室和并联电解槽数量; η_f 为法拉第效率; $m_{H_2}^{HHV}$ 为 H_2 高热值; Δt 为单位时长; k_1 、 k_2 和 k_3 为转换系数。

4.1.1.2 煤制氢设备运行模型

煤制氢设备的制氢量和煤耗量满足式(6)—(7)^[69]。

$$m_i^{C2H}(t) = \eta_C m_C(t), \forall i \in k_H^{nd}, \forall t \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^{24} m_C(t) = M_C, \forall t \quad (7)$$

式中: k_H^{nd} 为氢负荷节点集合; $m_C(t)$ 为 t 时段设备煤消耗量的质量流量; $m_i^{C2H}(t)$ 为 t 时段制氢量; η_C 为制氢效率; M_C 为一个运行周期内的总用煤量。

4.1.1.3 天然气制氢设备运行模型

通过天然气水蒸汽重整联合制氢, 天然气制氢设备模型满足^[26]式(8)—(11)。

$$V_{H_2}^{G2H}(t) = \eta_{G2H} q_G V_G^{G2H}(t) / q_{H_2}, \forall t \quad (8)$$

$$P_e^{G2H}(t) \Delta t = \alpha_{G2H} \eta_{G2H} q_G V_G^{G2H}(t) / q_{H_2}, \forall t \quad (9)$$

$$M_{H_2O}^{G2H}(t) = \beta_{G2H}^{G2H} \eta_{G2H} q_G V_G^{G2H}(t) / q_{H_2}, \forall t \quad (10)$$

$$M_{CO_2}^{G2H}(t) = \beta_{CO_2}^{G2H} \eta_{G2H} q_G V_G^{G2H}(t) / q_{H_2}, \forall t \quad (11)$$

式中: $V_{H_2}^{G2H}(t)$ 为 t 时段制氢量; η_{G2H} 为制氢效率; q_G 为天然气低热值; $V_G^{G2H}(t)$ 和 $P_e^{G2H}(t)$ 分别为 t 时段耗气量和电功率; α_{G2H} 和 β_{G2H}^{G2H} 分别为设备耗电和耗水系数; $M_{H_2O}^{G2H}(t)$ 为 t 时段设备耗水量; $M_{CO_2}^{G2H}(t)$ 为 t 时刻设备碳排放量; $\beta_{CO_2}^{G2H}$ 为设备碳排放系数。

4.1.2 储氢设备运行模型

由电解槽产生的低压氢气需通过增压操作来增大其在储氢罐中的储存密度。

一个典型的储氢设备如图5所示。

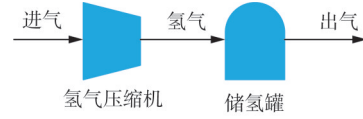


图5 一个典型的储氢设备

Fig. 5 A typical hydrogen storage device

4.1.2.1 氢气压缩机运行模型

氢气压缩机在工作时消耗的电功率如下^[36]。

$$P_{press}(t) = \frac{M_{cha}^{press, H_2}(t) E_{press}^{ref} \ln(F_{press}/F_{ini})}{\ln(F_{press}^{ref}/F_{ini})}, \forall t \quad (12)$$

式中: $P_{press}(t)$ 为 t 时段压缩机功率; $M_{cha}^{press, H_2}(t)$ 为流入压缩机的氢气质量; E_{press}^{ref} 为压缩机在参考压力下电力消耗; F_{ini} 为标准大气压强; F_{press}^{ref} 为参考压缩机压力; F_{press} 为压缩机压力。

4.1.2.2 储氢罐运行模型

储氢模型如下^[36]。

$$S_{H_2}^{sto}(t+1) = S_{H_2}^{sto}(t) + M_{cha}^{sto, H_2}(t) - M_{dis}^{sto, H_2}(t), \forall t \quad (13)$$

$$M_{cha}^{sto, H_2}(t) = (1 - \gamma_{H_2}^{press}) M_{cha}^{press, H_2}(t), \forall t \quad (14)$$

式中: $S_{H_2}^{sto}(t)$ 为 t 时段储氢的储氢量; $\gamma_{H_2}^{press}$ 为压缩机到储氢设备的氢耗散率; $M_{cha}^{sto, H_2}(t)$ 和 $M_{dis}^{sto, H_2}(t)$ 分别为 t 时段储氢中充氢、放氢量。

4.1.3 车辆加氢设备运行模型

加氢设备主要实现对HFCV的氢气加注, 运行模型如下。

$$\begin{cases} M_{out}^{HR}(t) = \eta_{HR} M_{in}^{HR}(t) \\ M_{out, min}^{HR} \leq M_{out}^{HR}(t) \leq M_{out, max}^{HR} \end{cases}, \forall t \quad (15)$$

式中: $M_{out}^{HR}(t)$ 和 $M_{in}^{HR}(t)$ 分别为 t 时段加氢设备的输出和输入氢气量; η_{HR} 为加氢设备的加注效率; $M_{out, max}^{HR}$ 和 $M_{out, min}^{HR}$ 分别为加氢设备加注量上、下限。

4.2 HRPN能源设备配置模型

基于上述运行模型构建相应设备配置模型。

4.2.1 制氢设备配置模型

HRPN制氢设备的装机容量一般要大于其出力 and 负荷需求, 其配置模型满足式(16)。

$$\begin{cases} M_{HPE}(t) \leq S_{HPE} \\ M_{load}(t) \leq S_{HPE} \\ S_{HPE} = N_{HPE} S_n^{HPE} \\ S_{min}^{HPE} \leq S_{HPE} \leq S_{max}^{HPE}, \forall t, \forall N_{HPE} \in Z \end{cases} \quad (16)$$

式中: $M_{HPE}(t)$ 和 $M_{load}(t)$ 分别为 t 时段制氢设备运行制氢量和氢负荷量; S_{HPE} 、 S_{max}^{HPE} 和 S_{min}^{HPE} 分别为制氢设备配置容量及其上、下限; S_n^{HPE} 和 N_{HPE} 分别为制氢设备额定配置容量和配置组数; Z 为整数集合。

4.2.2 储氢设备配置模型

HRPN 储氢设备的装机容量一般要大于其储氢量,其配置模型满足式(17)。

$$\begin{cases} E_{HS}(t) \leq S_{HS} \\ S_{HS} = N_{HS} S_n^{HS} \\ S_{min}^{HS} \leq S_{HS} \leq S_{max}^{HS}, \forall t, \forall N_{HS} \in Z \end{cases} \quad (17)$$

式中: $E_{HS}(t)$ 为 t 时段储氢设备运行储氢量; S_{HS} 、 S_{max}^{HS} 和 S_{min}^{HS} 分别为制氢设备配置容量及其上、下限; S_n^{HS} 和 N_{HS} 分别为制氢设备额定配置容量和配置组数。

4.2.3 车辆加氢设备配置模型

HRPN 的 HFCV 加氢设备的装机数量一般要大于其站内车辆负荷需求,其配置模型满足式(18)。

$$\begin{cases} N_{HFCV}(t) \leq N_{HRE} \\ N_{min}^{HRE} \leq N_{HRE} \leq N_{max}^{HRE}, \forall t, \forall N_{HRE} \in Z \end{cases} \quad (18)$$

式中: $N_{HFCV}(t)$ 为 t 时段 HFCV 负荷车辆数量; N_{HRE} 、 N_{max}^{HRE} 和 N_{min}^{HRE} 分别为加氢设备配置数量及其上、下限。

5 HRPN 氢气输送网络模型

氢气供应网络一般分为管线和 HLV 输送网络。

5.1 HRPN 氢气输送网络运行模型

5.1.1 氢气管线输送网络运行模型

一个典型的氢气管线输送网络如图6所示。

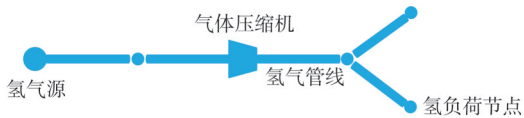


图6 一个典型的氢气管线输送网络

Fig. 6 A typical hydrogen pipeline transportation network

采用 Weymouth 方程对氢气管线的氢气传输进行描述,如式(19)~(21)所示^[65]。

$$F_{ij}^{HP}(t) = \text{sgn}[\pi_i(t) - \pi_j(t)] W_1 \sqrt{|\pi_i^2(t) - \pi_j^2(t)|}, \forall i, \forall j, \forall t \quad (19)$$

$$0 \leq \pi_i(t) \leq \pi_{max}, \forall i, \forall t \quad (20)$$

$$P_i^{HG, in}(t) + \sum_{j \in \Theta(i)} P_{ij}^{HG, pi}(t) - P_i^{HG, no}(t) = 0, \forall i, \forall t \quad (21)$$

式中: $F_{ij}^{HP}(t)$ 为 t 时段以氢气节点 i 与节点 j 分别为首末节点的管线流量; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; $\pi_i(t)$ 和 $\pi_j(t)$ 分别为 t 时段氢气节点 i 与节点 j 处的氢气压力; W_1 为管线系数; π_{max} 为氢气节点气压上限;

$P_i^{HG, in}(t)$ 为 t 时段氢气节点 i 注入的氢气功率; $P_{ij}^{HG, pi}(t)$ 为 t 时段管线 i, j 传输的氢气功率; $P_i^{HG, no}(t)$ 为 t 时段氢气节点的负荷; $\Theta(i)$ 为与氢气节点 i 相邻的节点集合。

5.1.2 HLV 输送网络运行模型

一个典型的 HLV 输送网络如图7所示。

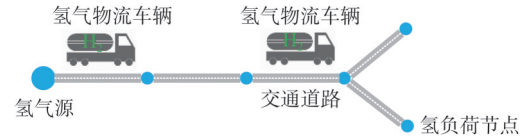


图7 一个典型的 HLV 输送网络

Fig. 7 A typical HLV transportation network

HLV 输送网络包括车辆发车调度、物流运输容量和物流行驶路径3个方面。

5.1.2.1 车辆发车调度

促使 HLV 发车进行氢气输送的系统运行条件为同时满足: 1) 加氢站氢储量小于预先设定的阈值或无法满足某个时段的加氢需求; 2) 达到计划发车时间。HLV 发车状态如式(22)所示。

$$z_{HT}(t) = \begin{cases} 1, & E_o^{HRS}(t) \leq E_{o, min}^{HRS}, t \in T \\ 1, & E_o^{HRS}(t) \leq E_{dc}^{HFCV}(t), t \in T \\ 0, & E_{o, min}^{HRS} < E_o^{HRS}(t) \text{ 或 } t \notin T \end{cases} \quad (22)$$

式中: $z_{HT}(t)$ 为 t 时段 HLV 物流的发车状态, 0、1 分别表示不发车、发车; $E_o^{HRS}(t)$ 和 $E_{dc}^{HFCV}(t)$ 分别为 t 时段加氢站氢储量和 HFCV 加氢负荷; $E_{o, min}^{HRS}$ 为加氢站储氢量最小阈值; T 为 HLV 物流发车时间集合。

5.1.2.2 物流运输容量

某个时段加氢站和制氢站之间 HLV 运输的总氢气量以及车辆发车的数量即为 HLV 输送网络物流容量, 车辆运输的总氢气量满足式(23), 车辆发车的数量满足式(24)。

$$E_o^{HRS}(t) - E_{dc}^{HFCV}(t) \leq E_{total}^{HT}(t), \forall t \quad (23)$$

$$\begin{cases} E_{total}^{HT}(t)/E_{HT} \leq N_{HT}(t) \\ N_{HT}(t) < E_{total}^{HT}(t)/E_{HT} + 1 \end{cases}, \forall N_{HT}(t) \in Z, \forall t \quad (24)$$

式中: $E_{total}^{HT}(t)$ 为 t 时段 HLV 运输的总氢气量; $N_{HT}(t)$ 为 t 时段 HLV 发车数量; E_{HT} 为 HLV 车载氢储罐的最大容量。

5.1.2.3 物流行驶路径

氢气物流路径优化主要考虑两类因素: HLV 行驶距离和时间。以图8的交通路网为例, 图8(b)和

(c)分别表示行驶距离、时间最优的物流路径,图8(d)表示车辆综合成本最优物流路径。其中,车辆行驶距离最短路径可以直接采用最短路径算法(Dijkstra算法等)进行优化求解,也可以构建0-1混合整数规划模型进行优化求解^[70-73]。对于行驶时间最小路径,若不考虑道路车流量动态变化,可直接采用上述最短路径方法进行求解;反之,则需首先求解某个时段的车流量,并利用路阻函数(如式(25)所示^[74])求解车辆通过路段时长,并利用上述最短路径方法进行求解。若需同时考虑距离和行驶时间最优为路径规划目标,通常折算为考虑两者的综合成本,并采用上述最短路径方法进行HLV路径优化。

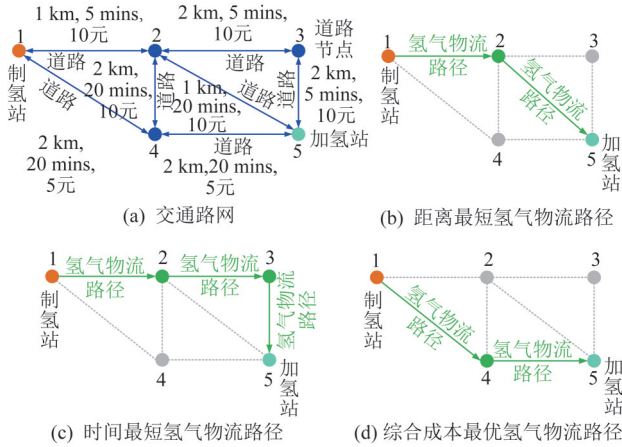


图 8 HLV 行驶路径选择

Fig. 8 Route selection of HLV

$$\Delta t_{i,j} = \Delta t_{i,j}^0 [1 + 0.15(x_{i,j}/c_{i,j})^4], \forall i, j \quad (25)$$

式中: $\Delta t_{i,j}$ 和 $\Delta t_{i,j}^0$ 分别为 HLV 通过路段 i, j 的行驶时间及其零交通流量下自由行驶时间; $x_{i,j}$ 和 $c_{i,j}$ 分别为道路 i, j 的车流量和交通容量。

考虑车辆行驶距离和行驶时间的 HLV 物流综合成本如式(26)所示。

$$C_{i,j}^{\text{HT}} = \sum_{r_{m,n} \in R_{i,j}} [c_{\text{time}}^{\text{HT}} \Delta t_{m,n} + c_{\text{energy}}^{\text{HT}} E_{m,n}^{\text{con}}], \forall i, j \quad (26)$$

式中: $C_{i,j}^{\text{HT}}$ 和 $R_{i,j}$ 分别为 HLV 在加氢站 i 和制氢站 j 之间的物流综合成本和行驶路径; $r_{m,n}$ 为路段 m, n 的路径; $c_{\text{time}}^{\text{HT}}$ 和 $c_{\text{energy}}^{\text{HT}}$ 分别为 HLV 单位行驶时间和距离成本; $E_{m,n}^{\text{con}}$ 为 HLV 通过路段 m, n 的能耗。

5.2 HRPN 氢气输送网络配置模型

5.2.1 氢气管线输送网络配置模型

涉及氢气管线拓扑配置和容量配置两个方面。

5.2.1.1 氢气管线拓扑配置

氢气管线拓扑配置通过式(27)~(30)获得。

$$\mathbf{D}_{\text{pi}}^{\text{HG}} = \begin{bmatrix} d_{1,1}^{\text{HG,pi}} & d_{1,2}^{\text{HG,pi}} & \cdots & d_{1,N_{\text{node}}}^{\text{HG,pi}} \\ d_{2,1}^{\text{HG,pi}} & d_{2,2}^{\text{HG,pi}} & \cdots & d_{2,N_{\text{node}}}^{\text{HG,pi}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N_{\text{node}},1}^{\text{HG,pi}} & d_{N_{\text{node}},2}^{\text{HG,pi}} & \cdots & d_{N_{\text{node}},N_{\text{node}}}^{\text{HG,pi}} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{X}_{\text{pi}}^{\text{HG}} = \begin{bmatrix} x_{1,1}^{\text{HG,pi}} & x_{1,2}^{\text{HG,pi}} & \cdots & x_{1,N_{\text{node}}}^{\text{HG,pi}} \\ x_{2,1}^{\text{HG,pi}} & x_{2,2}^{\text{HG,pi}} & \cdots & x_{2,N_{\text{node}}}^{\text{HG,pi}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N_{\text{node}},1}^{\text{HG,pi}} & x_{N_{\text{node}},2}^{\text{HG,pi}} & \cdots & x_{N_{\text{node}},N_{\text{node}}}^{\text{HG,pi}} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\mathbf{S}_{\text{pi}}^{\text{HG}} = \begin{bmatrix} S_{1,1}^{\text{HG,pi}} & S_{1,2}^{\text{HG,pi}} & \cdots & S_{1,N_{\text{node}}}^{\text{HG,pi}} \\ S_{2,1}^{\text{HG,pi}} & S_{2,2}^{\text{HG,pi}} & \cdots & S_{2,N_{\text{node}}}^{\text{HG,pi}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N_{\text{node}},1}^{\text{HG,pi}} & S_{N_{\text{node}},2}^{\text{HG,pi}} & \cdots & S_{N_{\text{node}},N_{\text{node}}}^{\text{HG,pi}} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$C_{\text{cost}} = \sum_{\forall i,j} f_{\text{cost}}(d_{i,j}^{\text{HG,pi}}, x_{i,j}^{\text{HG,pi}}, S_{i,j}^{\text{HG,pi}}) \quad (30)$$

式(27)中: $\mathbf{D}_{\text{pi}}^{\text{HG}}$ 为氢气管线长度矩阵, 矩阵元素 $d_{i,j}^{\text{HG,pi}}$ 表示氢气节点 i 和 j 间待建氢气管线长度, 若两个节点之间无可行氢气管线则 $d_{i,j}^{\text{HG,pi}}$ 为无穷大, 节点与其自身为 0。式(28)中 $\mathbf{X}_{\text{pi}}^{\text{HG}}$ 为氢气管线拓扑决策变量矩阵, 矩阵元素 $x_{i,j}^{\text{HG,pi}}$ 表示氢气节点 i 和 j 之间的氢气管线配置决策变量, $x_{i,j}^{\text{HG,pi}} = 1/0$ 分别表示两个节点之间架设/不架设氢气管线。式(29)中 $\mathbf{S}_{\text{pi}}^{\text{HG}}$ 为氢气管线容量矩阵, 矩阵元素 $S_{i,j}^{\text{HG,pi}}$ 表示氢气节点 i 和 j 氢气管线容量。式(30)中 C_{cost} 为氢气管线拓扑配置总成本满足, $f_{\text{cost}}(\cdot)$ 为氢气管线成本计算函数, 通过 $d_{i,j}^{\text{HG,pi}}$ 、 $x_{i,j}^{\text{HG,pi}}$ 和 $S_{i,j}^{\text{HG,pi}}$ 计算。

5.2.1.2 氢气管线容量配置

氢气管线的配置容量一般要大于流过其的氢能流量, 其管线配置模型如式(31)所示。

$$\begin{cases} P_{i,j}^{\text{HG,pi}}(t) \leq S_{i,j}^{\text{HG,pi}} \\ S_{i,j}^{\text{HG,pi}} = N_{\text{HG,pi}} S_n^{\text{HG,pi}}, \forall i, j, \forall t, \forall N_{\text{HG,pi}} \in \mathbb{Z} \\ N_{\text{HG,pi}}^{\text{min}} \leq N_{\text{HG,pi}} \leq N_{\text{HG,pi}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (31)$$

式中: $S_n^{\text{HG,pi}}$ 和 $N_{\text{HG,pi}}$ 分别为管线额定容量和配置组数; $N_{\text{HG,pi}}^{\text{max}}$ 和 $N_{\text{HG,pi}}^{\text{min}}$ 分别为氢气管线配置组数上、下限。

5.2.2 HLV 输送网络配置模型

HLV 的配置购置数量一般要大于任一时刻的物流容量, 其配置数量模型如式(32)所示。

$$N_{\text{HT}}(t) \leq N_{\text{pur}}^{\text{HT}}, N_{\text{min}}^{\text{HT,pur}} \leq N_{\text{pur}}^{\text{HT}} \leq N_{\text{max}}^{\text{HT,pur}}, \forall t \quad (32)$$

式中 $N_{\text{pur}}^{\text{HT}}$ 、 $N_{\text{max}}^{\text{HT, pur}}$ 和 $N_{\text{min}}^{\text{HT, pur}}$ 分别为 HLV 购置数量及其上、下限。

5.3 HRPN 氢气输送网络跨区域氢能交互模式

在上述氢气管线网络和 HLV 输送网络两种基本氢气输送网络基础上,不仅可以实现加氢站、制氢站之间的氢能交互,还可以在多区域之间构建氢能交互,交互模式架构如图9所示。

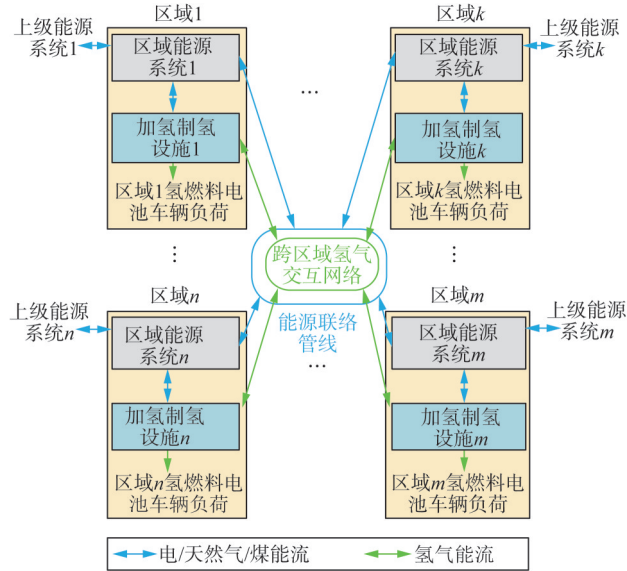


图9 氢气输送网络跨区域氢能交互模式架构

Fig. 9 Structure of cross regional hydrogen energy exchange mode for hydrogen transportation network

氢气输送网络跨区域氢能交互模式时空特性如图10所示。可知,氢气管线输送网络可以直接在不同区域之间构成氢能交互;而HLV输送网络通过道路交通的氢气运输,在不同时间不同区域之间的加氢制氢设施中进行充放氢,从而构成氢能灵活交互。

6 HRPN 规划统一模型

6.1 加氢站、制氢站、氢气输送网络独立规划模型

现有研究中,加氢站、制氢站、氢气输送网络独立规划统一模型可以通过式(33)进行描述。

$$\begin{cases} \min F_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k) \\ \text{s.t.} \begin{cases} f_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k) \leq 0 \\ g_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k) = 0 \end{cases} \end{cases}, k \in \{ \text{HRS}, \text{HPS}, \text{HTN} \} \quad (33)$$

式中: $\mathbf{x}_k$ 和 $\mathbf{y}_k$ 分别为 HRPN 中类型 k 设施(下标 k 为 HRS、HPS 和 HTN, 分别表示加氢站、制氢站、氢

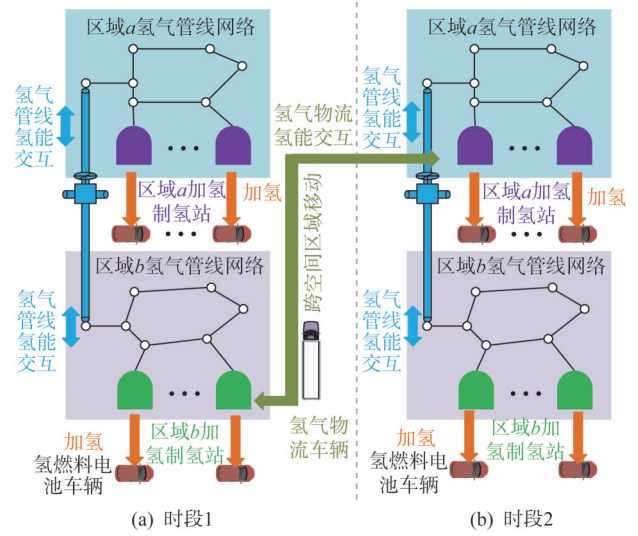


图10 氢气输送网络跨区域氢能交互模式时空特性

Fig. 10 Spatial-temporal characteristics of cross regional hydrogen energy exchange mode for hydrogen transportation network

气输送网络)的配置和运行决策变量向量,其中 $\mathbf{x}_k = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 向量元素 x_i 表示配置决策变量,如制氢、储氢设备容量1等, $\mathbf{y}_k = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$, 向量元素 y_i 表示运行决策变量,如制氢设备制氢功率等; $F_k(\cdot)$ 为规划的目标函数,如成本最小化等; $f_k(\cdot)$ 和 $g_k(\cdot)$ 分别为不等式、等式约束,其中 $f_k(\cdot)$ 包含氢燃料车辆负荷服务约束等, $g_k(\cdot)$ 包含氢气输送量供需平衡约束等。

6.2 HRPN 规划统一模型

相对于上述独立规划模型,HRPN 规划模型需计及更多的规划和运行的耦合因素,系统需要更为全面地考虑规划配置、运行方面的因素,也将导致系统变量的增加。HRPN 规划耦合因素如图11所示。

由图11可知,在HRPN 规划整体上主要受到能源系统等约束,规划主要为满足 HFCV 负荷需求。基于上述约束条件和目标,对系统中加氢站、制氢站、氢气输送网络进行协调规划,协调耦合因素包含:加氢站与制氢站站与站之间氢储能协调耦合环节、氢气输送网络的氢气管线输氢与氢气物流调配等站与网协调耦合环节等。

基于上述分析,在式(33)的独立规划模型基础上,构建 HRPN 规划统一模型,如式(34)所示。

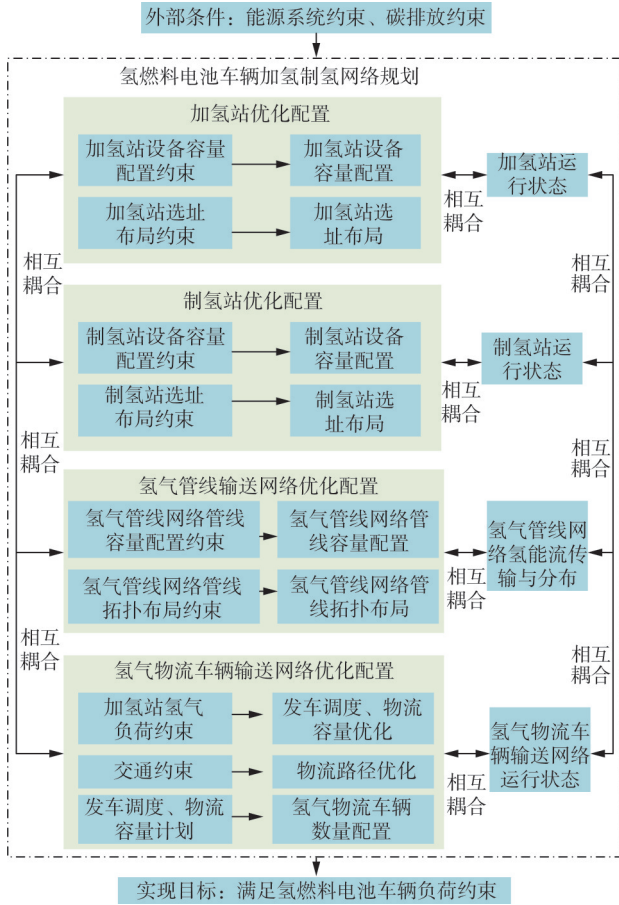


图 11 HRPN 规划耦合因素

Fig. 11 Planning coupling factors of HRPN

$$\begin{cases} \min F_{CO}(\mathbf{x}_{HRS}, \mathbf{x}_{HPS}, \mathbf{x}_{HTN}, \mathbf{x}_{CO}, \mathbf{y}_{HRS}, \mathbf{y}_{HPS}, \mathbf{y}_{HTN}, \mathbf{y}_{CO}) \\ \text{s.t.} \begin{cases} f_{CO}(\mathbf{x}_{HRS}, \mathbf{x}_{HPS}, \mathbf{x}_{HTN}, \mathbf{x}_{CO}, \\ \mathbf{y}_{HRS}, \mathbf{y}_{HPS}, \mathbf{y}_{HTN}, \mathbf{y}_{CO}) \leq 0 \\ g_{CO}(\mathbf{x}_{HRS}, \mathbf{x}_{HPS}, \mathbf{x}_{HTN}, \mathbf{x}_{CO}, \\ \mathbf{y}_{HRS}, \mathbf{y}_{HPS}, \mathbf{y}_{HTN}, \mathbf{y}_{CO}) = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (34)$$

式中: $F_{CO}(\cdot)$ 、 $f_{CO}(\cdot)$ 和 $g_{CO}(\cdot)$ 分别为 HRPN 规划的优化目标函数、不等式和等式约束,在加氢站、制氢站、氢气物流网络独立规划优化目标及约束条件之外还包含了站与站、站与网等协同配置和运行相关的优化目标和约束条件; $\mathbf{x}_{CO}$ 和 $\mathbf{y}_{CO}$ 分别为 HRPN 规划配置和运行的决策变量,包括站与站、站与网之间的协调决策变量等。

7 HRPN 规划面临的难题

在大力推进 HFCV 技术发展,加快加氢基础设施规划布局和建设方针政策下,受到能源企业、车企、车辆消费者的大力推崇。随着 HFCV 的不断发

展及其渗透率的逐步提高,HRPN 这一新兴模式存在的问题也日益凸显。

7.1 安全可靠建设与运营

氢气具有易燃易爆性,其生产利用所涉及的安全性问题一直备受关注,一定程度上制约了 HRPN 的快速发展。安全可靠的生产、运输和使用氢气至关重要,在 HRPN 建设与运营需要予以特别重视。在 HRPN 建设中,需要对制氢、储氢、运氢、加氢、氢气管线等设备的密封性、耐久性、耐压性等安全性因素予以充分考虑,建设时需留有足够的安全性冗余。运营过程中则需要建立高标准氢安全监测及预警机制。

7.2 合理经济规划配置

合理规划配置是 HRPN 能够安全、经济、稳定运行的基础,如何充分考虑未来 HFCV 的快速发展,考虑地区经济发展规划及氢能产业发展对 HRPN 进行合理经济整体规划、分阶段优化配置、动态并行各类 HRPN 建设是重要研究方向。目前,通过 HLV、管线输送氢气投资较大,尤其是管线初始建设投资巨大,而目前 HFCV 氢气需求有限。现场加氢制氢站的运输网络投资较小,但却面临高昂土地成本。在技术及经济方面具有可行性的 HRPN 建设需要仔细考虑 HRPN 所有环节的规划,包括生产、输送、储存和消费,并充分计及各环节之间的紧密耦合,从而带来较好的经济、环境、社会效益。

7.3 精准运行调度控制

未来 HFCV 达到一定渗透率后,其具备的强时空不确定性和随机性将增加 HRPN 运行的复杂性,进而将复杂性耦合到能源系统;能源系统也会将复杂的运行状态耦合到 HRPN,并通过 HFCV 耦合到交通系统,增加交通系统的运行复杂性,各个环节之间的运行过程具有紧密的耦合性,在 HRPN 运行调度控制时需要深入考虑各个环节的精准运行调度控制。

8 结论和展望

HFCV 的快速发展可促进能源高效、清洁、绿色、低碳转型,HRPN 是 HFCV 规模化发展和利用的重要供能载体,通过不同的能源利用模式、制氢加氢方式和氢气输送模式的 HRPN 协调规划运行实现 HFCV 的安全、高效、经济的氢气供应。

本文首先对HRPN的基本架构进行了阐述,对不同形式的HRPN进行介绍。然后,对HRPN的国内外研究现状进行了概述。进而,对HRPN各类制氢设备、储氢设备、车辆加氢设备运行和容量配置模型进行了分类讨论。然后对氢气输送网络的运行和配置模型进行了构建,并介绍了HRPN氢气输送网络跨区域氢能交互模式。基于上述研究背景,构建了HRPN规划统一模型。最后,总结了目前HRPN规划发展所面临的瓶颈,并展望了今后的研究方向。本文在促使构建HFCV和HRPN规划理论体系方面具有重要意义。

参考文献

- [1] 江岳文, 杨国铭, 朱振山. 考虑交通流量捕获的风-氢-电耦合网络规划[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 19-28.
JIANG Yuewen, YANG Guoming, ZHU Zhenshan. Wind-hydrogen-electricity coupled network planning considering traffic flow capture [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 19-28.
- [2] 王丰, 杨函煜, 李林溪, 等. 考虑氢能交通运输时空特性的电-氢综合能源系统协同优化方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(19): 31-43.
WANG Feng, YANG Hanyu, LI Linxi, et al. Collaborative optimal method for electricity-hydrogen integrated energy system considering spatial-temporal characteristics of hydrogen transportation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 31-43.
- [3] 王文烨, 姜飞, 张新鹤, 等. 含规模氢能综合利用的高比例风光多能源系统低碳灵活调度[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 197-211.
WANG Wenye, JIANG Fei, ZHANG Xinhe, et al. Low-carbon and flexible dispatch of high-proportion wind-photovoltaic multi-energy system with comprehensive utilization of large-scale hydrogen energy [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 197-211.
- [4] 袁铁江, 计力, 田雪沁, 等. 考虑燃料电池汽车加氢负荷的电-氢系统协同优化运行[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 16-25.
YUAN Tiejiang, JI Li, TIAN Xueqin, et al. Synergistic optimal operation of electricity-hydrogen systems considering hydrogen refueling loads for fuel cell vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 16-25.
- [5] 王书征, 单婷婷, 赵洋, 等. 考虑不同制氢方法的高速公路加氢站布局规划[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(4): 9-17.
WANG Shuzheng, SHAN Tingting, ZHAO Yang, et al. Layout planning for highway hydrogen refueling stations considering different hydrogen production methods [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4): 9-17.
- [6] 刘尚奇, 胡健, 张晓杰, 等. 含光伏和储氢的电-氢集成能源站容量配置[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 171-179.
LIU Shangqi, HU Jian, ZHANG Xiaojie, et al. Capacity configuration of integrated electricity charging and hydrogen refueling station containing photovoltaic and hydrogen storage [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(8): 171-179.
- [7] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划(2021-2035年)》[EB/OL]. 2022-03-23. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jd/jd/202203/t20220323_1320045_ext.html.
- [8] 赵元发, 司杨, 麻林瑞, 等. 交通网-电网耦合框架下制氢加氢站选址定容[J]. 太阳能学报, 2024, 45(8): 54-62.
ZHAO Yuanfa, SI Yang, MA Linrui, et al. Location and capacity of hydrogen production and refueling stations in framework of transportation network-grid coupling [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(8): 54-62.
- [9] 王育飞, 刘德宾, 薛花, 等. 耦合氢能的光储充电站多目标优化配置策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 101-108.
WANG Yufei, LIU Debin, XUE Hua, et al. Multi-objective optimal configuration strategy of photovoltaic-energy storage charging station coupled with hydrogen energy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 101-108.
- [10] 夏威夷, 任洲洋, 潘珍. 考虑子母站灵活互联的分布式供氢网和配电网多主体协调规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(23): 9187-9200.
XIA Weiyi, REN Zhouyang, PAN Zhen. A multi-agent cooperative planning method for the distributed hydrogen supply network and the power distribution network considering the flexible interconnections between on-site and off-site hydrogen refueling stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(23): 9187-9200.
- [11] 中共中央, 国务院. 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. 2021-09-22. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [12] 国务院. 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL]. 2021-10-24. https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [13] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《能源生产和消费革命战略(2016-2030)》的通知[EB/OL]. 2016-12-29. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=2767>.
- [14] 国家发展改革委, 国家能源局. 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. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm.
- [15] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)的通知[EB/OL]. 2020-10-20. https://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5560291.htm.
- [16] 浙江在线. 全国首个海岛“绿氢”示范工程正式投运 年产氢气73000标方[EB/OL]. 2022-07-08. https://zjnews.zjol.com.cn/zjnews/202207/t20220708_24491791.shtml.
- [17] 中国政府网. 国内首座兆瓦级氢能综合利用示范站投运[EB/OL]. 2022-07-06. https://www.gov.cn/xinwen/2022-07/06/content_5699582.htm#1.
- [18] 张掖市人民政府. 中电工程张掖氢能综合应用示范项目投产暨绿氢合成氨一体化示范项目开工 卢小亨出席 陈继平宣布项目开工[EB/OL]. 2023-09-15. https://zwfw.gansu.gov.cn/zhangye/ztfw/qyrzyqzq/czcx/xw/art/2023/art_756e498773c045b9b1a6b0b79a81a5db.html.
- [19] 鄂尔多斯市人民政府. 鄂托克前旗250MW光伏电站及氢能综合利用示范项目用地预审与选址获批[EB/OL]. 2022-07-04. <https://www.ordos.gov.cn/ordosml/ordoszf/bmwj/szrzyj/>

- 202207/t20220721_3246046.html.
- [20] 河北省发改委. 我省开建国内首个风电制氢项目[EB/OL]. 2015 - 08 - 28. https://hbdrc.hebei.gov.cn/gzdt/202403/t20240326_110913.html.
- [21] 王永利, 向皓, 郭璐, 等. 面向多能互补的分布式光伏与电氢混合储能规划优化研究[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 564 - 576.
- WANG Yongli, XIANG Hao, GUO Lu, et al. Research on planning optimization of distributed photovoltaic and electro-hydrogen hybrid energy storage for multi-energy complementarity[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 564 - 576.
- [22] 彭生江, 杨淑霞, 袁铁江, 等. 广义风-氢-煤能源系统的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 6 - 12.
- PENG Shengjiang, YANG Shuxia, YUAN Tiejiang, et al. Challenges and prospects of generalized wind-hydrogen-coal energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 6 - 12.
- [23] 刘妍, 胡志坚, 陈锦鹏, 等. 含碳捕集电厂与氢能多元利用的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(1): 31 - 40.
- LIU Yan, HU Zhijian, CHEN Jinpeng, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system considering carbon capture power plant and multi-utilization of hydrogen energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 31 - 40.
- [24] BAN M, BAI W, SONG W, et al. Optimal scheduling for integrated energy-mobility systems based on renewable-to-hydrogen stations and tank truck fleets[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2666 - 2676.
- [25] 杨周义, 邢海军, 江伟建, 等. 基于低碳需求响应的含煤制氢与碳捕集电厂的综合能源系统优化调度[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(4): 25 - 32.
- YANG Zhouyi, XING Haijun, JIANG Weijian, et al. Optimal scheduling of integrated energy system with coal-to-hydrogen and carbon capture power plant based on low-carbon demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4): 25 - 32.
- [26] 李志伟, 赵雨泽, 吴培, 等. 基于制氢设备精细建模的综合能源系统绿氢蓝氢协调低碳优化策略[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2317 - 2326.
- LI Zhiwei, ZHAO Yuze, WU Pei, et al. Low-carbon dispatching strategy of integrated energy system with coordination of green hydrogen and blue hydrogen based on fine modeling of hydrogen production equipment[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2317 - 2326.
- [27] 崔杨, 闫石, 仲悟之, 等. 含电转气的区域综合能源系统热电优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4254 - 4264.
- CUI Yang, YAN Shi, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal thermoelectric dispatching of regional integrated energy system with power-to-gas[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4254 - 4264.
- [28] 胡泽春, 邵成成, 何方, 等. 电网与交通网耦合的设施规划与运行优化研究综述及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 3 - 19.
- HU Zechun, SHAO Chengcheng, HE Fang, et al. Review and prospect of research on facility planning and optimal operation for coupled power and transportation networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 3 - 19.
- [29] 陈威, 王永恒, 沈欣炜, 等. 计及碳排放流的光储充一体化电站及加氢站协同规划[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(13): 40 - 49.
- CHEN Wei, WANG Yongheng, SHEN Xinwei, et al. Synergistic planning of photovoltaic-storage-charging stations and hydrogen refueling stations considering carbon emission flows[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(13): 40 - 49.
- [30] 蒙军, 任洲洋, 王皓. 氢能交互下的多区域电氢综合能源系统可靠性提升策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5011 - 5027.
- MENG Jun, REN Zhouyang, WANG Hao. Reliability improvement strategies of multi-region electricity-hydrogen integrated energy systems considering hydrogen interaction between different regions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5011 - 5027.
- [31] 窦真兰, 张春雁, 赵慧荣, 等. 含氢能汽车负荷的住宅光-氢耦合能源系统容量优化配置[J]. 中国电力, 2023, 56(7): 54 - 65.
- DOU Zhenlan, ZHANG Chunyan, ZHAO Huirong, et al. Optimal capacity configuration of residential solar-hydrogen coupling energy system with hydrogen vehicle load[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 54 - 65.
- [32] 罗舒钰, 李奇, 阳洋, 等. 计及电-热-氢差异化激励需求响应的园区综合能源系统优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 214 - 221.
- LUO Shuyu, LI Qi, YANG Yang, et al. Community integrated energy system optimal scheduling considering differentiated power-heat-hydrogen incentive based demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 214 - 221.
- [33] 赵楠, 王俊, 黄桦, 等. 计及氢电混合动力车响应的多区域综合能源系统协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 257 - 264.
- ZHAO Nan, WANG Jun, HUANG Hua, et al. Coordinated optimal scheduling of multi-region integrated energy system with hydrogen-electric hybrid vehicle response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 257 - 264.
- [34] 高赐威, 王崴, 陈涛. 基于可逆固体氧化物电池的氢电一体化能源站容量规划[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6155 - 6170.
- GAO Ciwei, WANG Wei, CHEN Tao. Capacity planning of electric-hydrogen integrated energy station based on reversible solid oxide battery[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6155 - 6170.
- [35] 阳洋, 李奇, 蒲雨辰, 等. 考虑电动汽车充电方式的热-电-氢耦合孤岛综合能源系统优化配置[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3869 - 3880.
- YANG Yang, LI Qi, PU Yuchen, et al. Optimal configuration of CHHP island IES considering different charging modes of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3869 - 3880.
- [36] 黄文涛, 邓明辉, 葛磊蛟, 等. 考虑配电网与氢燃料汽车耦合影响的制氢加氢站布点优化策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 105 - 117.
- HUANG Wentao, DENG Minghui, GE Leijiao, et al. Layout optimization strategy of hydrogen production and refueling stations considering the coupling effect of distribution network and hydrogen fuel vehicles[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 105 - 117.

- [37] 陈胜, 张景淳, 卫志农, 等. 面向能源转型的电-气-氢综合能源系统规划与运行[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(19): 16 – 30.
CHEN Sheng, ZHANG Jingchun, WEI Zhinong, et al. Energy transition oriented planning and operation of electricity-gas-hydrogen integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 16 – 30.
- [38] 王辉, 梁凌, 李乃慧, 等. 考虑交通流量预测的光-氢-电耦合系统规划[J]. 现代电力, 2024, 41(6): 110 – 1108.
WANG Hui, LIANG Ling, LI Naihui, et al. Photovoltaics-hydrogen-electricity coupling system planning considering traffic flow prediction[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(6): 110 – 1108.
- [39] TAO Y, QIU J, LAI S, et al. Coordinated planning of electricity and hydrogen networks with hydrogen supply chain for fuel cell electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(2): 1010 – 1023.
- [40] WEI X, ZHANG X, SUN Y, et al. Carbon emission flow oriented tri-level planning of integrated electricity – hydrogen – gas system with hydrogen vehicles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2607 – 2618.
- [41] AHMAD J, IMRAN M, ALI S F, et al. Wind-to-hydrogen production potential for selected sites in pakistan[J]. IEEE Access, 2021(9): 134874 – 134898.
- [42] FENG C, SHAO C, XIAO Y, et al. Day-ahead strategic operation of hydrogen energy service providers[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 3493 – 3507.
- [43] HE G, MALLAPRAGADA D S, BOSE A, et al. Hydrogen supply Chain planning with flexible transmission and storage scheduling[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(3): 1730 – 1740.
- [44] XIAO W, CHENG Y, LEE W, et al. Hydrogen filling station design for fuel cell vehicles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(1): 245 – 251.
- [45] WANG S, BO R. Joint planning of electricity transmission and hydrogen transportation networks[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2887 – 2897.
- [46] 谢敏, 卢燕旋, 叶佳南, 等. 电-氢-混氢天然气耦合的城市综合能源系统低碳优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 109 – 117.
XIE Min, LU Yanxuan, YE Jianan, et al. Low-carbon optimal scheduling of electricity-hydrogen-HCNG coupled urban integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 109 – 117.
- [47] 严思韵, 周登极. 综合能源天然气网混氢输运的仿真与调度综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(24): 8816 – 8832.
YAN Siyun, ZHOU Dengji. Review of simulation and scheduling of hydrogen-blended transportation in natural gas network of integrated energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 8816 – 8832.
- [48] SHAO C, FENG C, SHAHIDEHPOUR M, et al. Optimal stochastic operation of integrated electric power and renewable energy with vehicle-based hydrogen energy system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4310 – 4321.
- [49] 蒋东方, 贾跃龙, 鲁强, 等. 氢能在综合能源系统中的应用前景[J]. 中国电力, 2020, 53(5): 135 – 142.
JIANG Dongfang, JIA Yuelong, LU Qiang, et al. Application prospect of hydrogen energy in integrated energy systems[J]. Electric Power, 2020, 53(5): 135 – 142.
- [50] GAN W, YAN M, YAO W, et al. Multi-network coordinated hydrogen supply infrastructure planning for the integration of hydrogen vehicles and renewable energy[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2875 – 2886.
- [51] SUN K, LI K, ZHANG Z, et al. An integration scheme of renewable energies, hydrogen plant, and logistics center in the suburban power grid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2771 – 2779.
- [52] LI B, LI J, JIAN B. Improve multi-energy supply microgrid resilience using mobile hydrogen trucks based on transportation network[J]. eTransportation, 2023(18): 100265.
- [53] HERNANDEZ B, ALKAYAS A, AZAR E, et al. Mathematical model for the placement of hydrogen refueling stations to support future fuel cell trucks[J]. IEEE Access, 2021(9): 148118 – 148131.
- [54] 赵黎, 毕晓甜, 朱劲松, 等. 含加氢站运行的微能源网优化调度方法[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(5): 45 – 50.
ZHAO Li, BI Xiaotian, ZHU Jinsong, et al. An optimization scheduling method for micro energy grid considering hydrogen station operation[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(5): 45 – 50.
- [55] 周专, 苗帅, 袁铁江. 基于系统动力学的交通领域氢能需求预测[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(4): 33 – 39, 47.
ZHOU Zhuan, MIAO Shuai, YUAN Tiejiang. Prediction of hydrogen demand in transportation field based on system dynamics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4): 33 – 39, 47.
- [56] 刘建树, 江岳文. 基于多智体强化学习的多风氢系统联合优化运行[J]. 现代电力, 2022, 39(4): 431 – 443.
LIU Jianshu, JIANG Yuewen. Joint optimal operation of multi wind-hydrogen system based on multi-agent reinforcement learning[J]. Modern Electric Power, 2022, 39(4): 431 – 443.
- [57] ZHANG K, ZHOU B, CHUNG C Y, et al. A coordinated multi-energy trading framework for strategic hydrogen provider in electricity and hydrogen markets[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(2): 1403 – 1417.
- [58] WU X, LI H, WANG X, et al. Cooperative operation for wind turbines and hydrogen fueling stations with on-site hydrogen production[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2775 – 2789.
- [59] SUN Q, WU Z, GU W, et al. Multi-stage co-planning model for power distribution system and hydrogen energy system under uncertainties[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(1): 80 – 93.
- [60] ZHANG J, LI C, CHEN G, et al. Planning of hydrogen refueling stations in urban setting while considering hydrogen redistribution[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2898 – 2908.
- [61] ZHANG K, ZHOU B, OR S W, et al. Optimal coordinated control of multi-renewable-to-hydrogen production system for hydrogen fueling stations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2728 – 2739.
- [62] LI J, LI G, MA S, et al. Modeling and simulation of hydrogen energy storage system for power-to-gas and gas-to-power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(3): 885 – 895.
- [63] DADKHAH A, BOZALAKOV D, KOONING J D M D, et al. Techno-economic analysis and optimal operation of a hydrogen refueling station providing frequency ancillary

- services [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(4): 5171–5183.
- [64] 侯慧, 刘鹏, 黄亮, 等. 考虑不确定性的电-热-氢综合能源系统规划[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S1): 133–144.
HOU Hui, LIU Peng, HUANG Liang, et al. Planning of electricity-heat-hydrogen integrated energy system considering uncertainties [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1): 133–144.
- [65] DONG W, SHAO C, LI X, et al. Integrated planning method of green hydrogen supply chain for hydrogen fuel cell vehicles [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(48): 18385–18397.
- [66] JIANG H, QI B, DU E, et al. Modeling hydrogen supply Chain in renewable electric energy system planning [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2780–2791.
- [67] CAI G, KONG L. Techno-economic analysis of wind curtailment/hydrogen production/fuel cell vehicle system with high wind penetration in China [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(1): 44–52.
- [68] 余娟, 时权妍, 杨知方, 等. 考虑电解水与甲烷化运行特性的电转气系统日前调度方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 18–25.
YU Juan, SHI Quanyan, YANG Zhifang, et al. Day-ahead scheduling method of power-to-gas system considering operation characteristics of water electrolysis and methanation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 18–25.
- [69] 李颢然, 薛屹洵, 戴铁潮, 等. 考虑氢负荷响应的化工园区电-氢耦合系统协同优化调度[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(1): 93–100.
LI Haoran, XUE Yixun, DAI Tiechao, et al. Collaborative optimal dispatch of electricity-hydrogen coupling system in chemical industry park considering hydrogen load response [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(1): 93–100.
- [70] HE C, ZHU J, LI S, et al. Sizing and locating planning of EV centralized-battery-charging-station considering battery logistics system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(4): 5184–5197.
- [71] HE C, ZHU J, LAN J, et al. Optimal planning of electric vehicle battery centralized charging station based on EV load forecasting [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(5): 6557–6575.
- [72] 崔露, 刘世林, 苗婉, 等. 考虑电转氢和需求响应的风光储综合充电站优化运行策略[J]. 发电技术, 2025, 46(1): 31–41.
CUI Lu, LIU Shilin, MIAO Wan, et al. Optimized operation strategy of wind-solar-storage integrated charging station considering power-to-hydrogen and demand response [J]. Power Generation Technology, 2025, 46(1): 31–41.
- [73] 朱继忠, 何子浩, 郑洁云, 等. 基于场景生成方法的配电网运营商主从博弈定价与电动汽车充电管理策略[J]. 南方电网技术, 2025, 19(6): 73–85.
ZHU Jizhong, HE Zihao, ZHENG Jieyun, et al. Stackelberg game pricing strategy and EV charging management for distribution network operator based on scenario generation method [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(6): 73–85.
- [74] FAN V H, DONG Z, MENG K. Integrated distribution expansion planning considering stochastic renewable energy resources and electric vehicles [J]. Applied Energy, 2020 (278): 115720.1–115720.10.

收稿日期: 2024-05-17; 网络首发日期: 2024-10-28

作者简介:

何晨可(1993), 男, 博士研究生, 研究方向为含新能源汽车的主动配电网和综合智慧能源系统的规划与优化, 1197958177@qq.com;

陈蕾(1970), 女, 高级工程师(教授级), 硕士, 国家电网首席专家, 研究方向为配电自动化、数字电网、分布式资源与电网协同运行及控制技术, chenlei3909@163.com;

朱继忠(1966), 男, 通信作者, 教授, 博士, 博士生导师, IEEE Fellow, 中国电机工程学会外籍会士, 意大利博洛尼亚科学院外籍院士, 研究方向为综合智慧能源系统优化运行与控制, zhujz@scut.edu.cn。