

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240897

基于用户出行与充能特性的电氢一体化站规划

李英量¹, 郭飞燕¹, 白博旭², 朱琦¹, 杨一¹

(1. 西安石油大学电子工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 陕西航空电气有限责任公司, 陕西 西安 710048)

摘要: 在电-氢-交通耦合背景下, 针对加氢站和充电站单独规划导致的资源利用率低、空间布局分散等问题, 提出一种基于用户出行路径与充能特性的电氢一体化站选址规划模型。该模型通过分析新能源汽车用户的出行链特征, 并利用改进 Dijkstra 算法预测电动汽车、氢能源汽车的差异化充能需求。构建以投资和用户成本最小为目标、综合用户与投资者的成本效益及电-氢能源转换为约束的融合路网出行特征的电氢一体化站规划模型, 并采用 Voronoi 图划分结合粒子群算法对模型进行求解。以某市主城区为算例进行分析, 通过对比不同规划条件下的设施布局效果, 验证了所提模型在提升能源设施协同性方面的优势。研究结果表明该方法能够通过电氢一体化站的耦合充能分析, 在降低用户出行成本的同时促进交通能源网络的弹性提升, 为多能互补型充能设施的规划提供了兼顾技术可行性与经济合理性的解决方案。

关键词: 电氢一体化站; 电-氢-交通耦合; 出行链; 电气化交通; 交通-能源系统

Integrated station planning of electricity and hydrogen based on user travel and charging characteristics

LI Yingliang¹, GUO Feiyan¹, BAI Boxu², ZHU Qi¹, YANG Yi¹

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Aviation Electric Co., Ltd., Xi'an 710048, China)

Abstract: In the context of electric-hydrogen-transportation coupling, an electric-hydrogen integrated station siting planning model based on users' travel paths and charging characteristics is proposed. This addresses the problems of low resource utilization and dispersed spatial layout caused by the separate planning of hydrogen refueling stations and charging stations. The model analyzes the travel chain characteristics of new energy vehicle users and predicts the differentiated charging demand of electric and hydrogen vehicles using the improved Dijkstra algorithm; constructs an electric-hydrogen integrated station planning model that integrates the travel characteristics of the road network with the goal of minimizing the investment and user costs. It also integrates the cost-effectiveness of the users and the investors, and the constraints on the conversion of electric and hydrogen energy, and adopts the Voronoi diagram particle swarm algorithm to solve the model. The main urban area of a city is used as an example for analysis, and the advantages of the proposed model in enhancing the synergy of energy facilities are verified by comparing the effect of facility layout in different planning conditions. The results of the study show that the method can promote the elasticity of the transportation energy network while reducing the travel cost of users through the coupled charging analysis of electric-hydrogen integrated stations, and provide a solution that takes into account the technical feasibility and economic reasonableness for the planning of multi-energy complementary charging facilities.

This work is supported by the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (No. 2024JC-YBMS-405).

Key words: electro-hydrogen integrated station; electricity-hydrogen-traffic coupling; travel chain; electrified transportation; transportation-energy systems

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目资助(2024JC-YBMS-405); 西安市科技计划项目资助(24GXF0071); 国家重点研发计划项目资助(2023YFC2810902)

0 引言

21 世纪以来,随着“双碳”政策的提出,我国能源体系改革进程亟待加速,清洁能源转型步伐需进一步加快^[1-2]。因此,如何高效地利用能源、减少环境污染,实现全社会的可持续发展成为当前急需解决的焦点问题^[3-4]。而城市交通系统作为重要的终端能源消费部门,在传统汽车所带来的能源消耗和环境污染日渐严重的背景下,大力发展以电动汽车(electric vehicle, EV)、氢能源汽车(hydrogen vehicle, HV)为主的新能源汽车,逐步替代传统燃油汽车,不仅是实现“双碳”战略目标的关键路径,还是推动城市交通-能源系统协同转型与可持续发展的重要突破口^[5-7]。

伴随着我国电动汽车、氢能源汽车相关产业的规模化开发及保有量的持续上升,以及新能源汽车的规模化发展,电动汽车充电负荷与氢能源汽车加氢负荷将给城市电力能源系统带来显著冲击,其时空分布特性可能导致电网运行压力增大,并对现有能源基础设施提出新的挑战,其能源补给需求加大了电网与氢能源网的运行负担。同时, EV、HV 用户的通行需求也将对交通网的运行产生额外影响^[8-9]。此时, EV、HV 能源补给站点作为能源系统与交通系统之间的关键耦合点,科学规划与建设电动汽车及氢能源汽车充能基础设施,不仅能够有效提升用户充能服务的可靠性与便捷性,从而增强消费者对新能源汽车的接受度与使用意愿,同时还可为风电、光伏等波动性可再生能源的大规模并网消纳提供重要的灵活性调节资源,进而推动清洁能源与交通系统的协同优化发展。

电动汽车充电站选址规划的实践经验与理论基础已较为完善,其研究成果可为氢能源汽车加氢站选址提供重要参考与借鉴。文献[10]基于交通流量最小化分析优化充电服务效率,通过构建最小服务路径模型和充电行驶距离机会约束条件,实现了充电站数量的科学规划与布局优化。文献[11]在综合能源系统框架下,构建了包含配电网、天然气网的充电站协同规划模型,进一步拓宽了规划视野。文献[12]运用层次分析法探究电动汽车用户充电行为,并据此建立选址模型,通过将层次分析与目标规划相结合,得到科学的选址方案。文献[13]基于充电负荷时空分布特性,构建了交通-配电耦合网络的能量-信息流协同分析模型,并提出双层联合优化求解方法,为多能源系统耦合网络的协同规划与运行提供了新的研究思路与方法支撑。文献[14]考虑加入了行驶里程约束,并分析了路径选择行为,

采用分支定界算法解决了充电站选址定容问题。文献[15]考虑了行驶里程限制,并结合交通流量对充电站进行了选址规划。此外,文献[16]将重心布站方法作为一种源于运筹学网络优化问题的经典模拟方法,因其计算效率高、实现简便等优势,在设施选址领域具有重要的理论价值与广泛的应用前景。以上研究指出了能源补给站点是新能源汽车接入电网的关键,协同规划电动汽车充电需求与配电网,可以显著降低系统扩建和运行成本,但氢能源汽车加氢站等 HV 能源补给设施的布局规划研究尚显不足,需进一步加强。

在 EV、HV 的协同规划问题上,部分学者从电-氢系统切入来研究耦合系统的布局规划。文献[17]建立了含加氢负荷的电-氢系统协同优化模型,计及加氢负荷的时空分布特性来优化系统运行,通过人为设置加氢站数量重点研究以加氢站为目的、以途中 EV-HV 的能耗成本为目标函数的调度问题;文献[18]通过设置电-氢混合系统的 SOC 值,建立了日前-实时运行方案;文献[19]提出了基于可逆固体氧化物电池的氢电一体化能源站(electric hydrogen integrated station, EHIS)设想,只对能源站内的可逆固体氧化物电池和储氢库进行容量规划,并未考虑 EHIS 的选址问题;文献[20]在考虑市场环境的前提下,建立了 EHIS 运行优化模型,从电力市场角度证明了 EHIS 可以提高电网对新能源的消纳能力。虽然两者从不同切入点研究 EV-HV 协同优化,但都未涉及 EHIS 的选址问题,并且通过直接确定 EHIS 的安装位置会增加模型的局限性。为此,本文基于充电站选址规划领域的现有理论研究基础,针对加氢站和充电站单独规划造成的土地占用及缺乏耦合网络下的加氢站布局规划等问题,综合考虑电动汽车、氢能源汽车用户充能负荷时空分布特性等因素的影响。以 EHIS 作为“电力网-氢能网-交通网”三者之间的耦合基础,基于用户的出行路径与充能特性,重点研究 EHIS 的选址及规划问题。

首先,在“电-氢-交通”三网耦合系统下,基于用户出行链理论,通过改进的 Dijkstra 算法对 EV、HV 用户的行驶路径进行分析规划。其次,在基于用户出行路径与充能特性的情况下对 EV、HV 用户充能需求的时空分布进行预测;在此基础上,从用户层面计及 EV、HV 的耗能、耗时成本,从建设者层面计及 EHIS 的建设运行成本,建立 EHIS 选址规划模型,并基于 Voronoi 划分及粒子群算法进行联合求解;最后,以某市部分主城区交通网为例进行算例仿真分析,得到耦合网络下基于用户出行路径与充能特性的 EHIS 服务范围、最优数量、最优选

址及各站点内充电桩与加氢桩配置数目的合理规划方案, 为推动城市交通与电-氢能源网的协同优化提供了一定的理论基础。

1 电氢一体化站模型

电氢一体化站由电解槽(electrolytic cell, EC)、压缩机、储氢设施(hydrogen storage facilities, HSF)、加氢设施(hydrogenation machine, HM)、燃料电池发电站(fuel cell power station, FCPS)、充电站 6 个部分组成, 如图 1 所示。

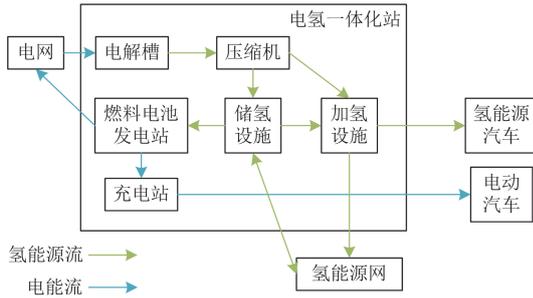


图 1 电氢一体化站结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electric-hydrogen integrated station structure

其主要面向交通网为电动汽车-氢能源汽车提供充电加氢服务, 同时依靠 FCPS 实现与电网之间的互联, 在 EV 充电高峰时期可以通过消耗 HSF 中的氢能源进行发电, 以满足 EV 的充电需求; 当风光等新能源发电过剩时, 可以通过 EC 将其转化为氢气储存在 HSF 中。

本文主要对 EHIS 的选址定容问题进行规划, 规划时只考虑储氢设施的建设成本。对于 HV 的加氢需求 EHIS 通过电解槽消耗电力生产氢气。生产出的氢气不能直接用于 HV, 需要通过压缩机得到高压氢气, 当 HV 需要加氢时通过 HM 加压冷却后以满足 HV 的加氢需求。本文所涉及 EHIS 的主要单元建模如下^[19-20]。

1.1 电解槽模型

当电流经电解槽形成闭环回路时, 氢气会在阴极产生。电解槽制取氢气会消耗大量的电力, 其值与氢气生产率有关, 如式(1)所示。

$$P_{\text{ele}} = \frac{H_{\text{H}} \cdot F_{\text{ele}}}{\eta_{\text{ele}}} \quad (1)$$

式中: P_{ele} 表示电解槽制氢过程中所消耗的有功功率; H_{H} 表示氢气的高热值; F_{ele} 表示电解产生的氢气量; η_{ele} 表示电解槽的能源转化效率。

1.2 压缩机模型

在氢气的压缩过程中, 压缩机消耗的有功功率如式(2)、式(3)所示。

$$P_{\text{comp}} = F_{\text{comp}} P_{\text{ref}} \ln \left(\frac{\beta_{\text{comp}}}{\beta^0} \right) \left(\ln \left(\frac{\beta_{\text{ref}}}{\beta^0} \right) \right)^{-1} \quad (2)$$

$$F_{\text{comp}} = (1 - \gamma_{\text{comp}}) F_{\text{ele}} \quad (3)$$

式中: P_{comp} 表示压缩机在工作时所消耗的有功功率; F_{comp} 表示进入压缩机需要压缩的氢气量; P_{ref} 表示压缩机工作在参考压力下时的有功功率消耗量; β_{comp} 表示压缩机正常工作时的压力; β^0 表示标准大气压力; β_{ref} 表示参考工作压力; γ_{comp} 为从电解槽到压缩机的氢气耗散率。

1.3 加氢设施模型

注入 HV 的氢燃料需要在加氢设施中进行加压冷却形成液态氢, 才可以被使用。冷却和加氢过程所消耗的能量和时间可以忽略^[21], 加氢机数量如式(4)所示。

$$N_{i,\text{HV}} = \frac{\sum F_{\text{comp}}}{F_{\text{ele,ave}}} \quad (4)$$

式中: $N_{i,\text{HV}}$ 表示第 i 个 EHIS 中的加氢机数量; $F_{\text{ele,ave}}$ 表示单台加氢机日平均加氢量, 目前一台加氢机日平均加氢量为 700 kg^[22]。

2 电-氢负荷需求分析

2.1 电-氢新能源汽车耗能模型

影响 EV、HV 单位里程耗能的主要因素为道路交通情况和气温情况。不同交通路况下的 EV、HV 行驶速度不同, 从而产生的单位能耗也大不相同; 同时气温的高低会影响司机对空调的开启频率, 从而增加 EV、HV 的能耗。其余因素对能耗的影响较小, 可以忽略^[23]。

综合交通、温度对 EV、HV 能耗的影响, 得出其单位里程耗电量如式(5)所示。同时, 本文中涉及的氢能源汽车为氢燃料电池汽车, 因此氢能源汽车的耗氢量如式(6)所示。

$$e_x = \begin{cases} K_{\text{temp}} \cdot e_{\text{LV}} & K_{\text{pect}} \geq 60\% \\ e_{\text{LV}} & K_{\text{pect}} < 60\% \end{cases} \quad (5)$$

$$h_x = e_x / \eta_{\text{h-e}} \quad (6)$$

式中: e_{LV} 表示单位里程耗电量; K_{pect} 表示空调的开启频率; K_{temp} 表示温度能耗系数; e_x 表示 EV 单位里程耗电量; h_x 表示 HV 单位里程耗氢量; $\eta_{\text{h-e}}$ 表示氢转电之间的转化效率(燃料电池为: 质子交换膜燃料电池, 氢转电之间的转化效率 $\eta_{\text{h-e}}$ 为 40%~

60%)^[24]。在本文规划中,在恒定气温25℃下, K_{pect} 取60%, K_{temp} 取1.2。

2.2 改进的 Dijkstra 路径规划算法

由于传统的Dijkstra算法需要对所有可能的路径进行比较,从而搜索到最短路径,该方法的规划速率较低。为此,本文引入了评估函数对Dijkstra算法进行改进,通过对路径代价进行对比评估,可以在缩短响应时间的基础上规划出最短路径。本文所加入的评估函数 f_g 如式(7)所示。

$$f_g(n) = A(n) + B(n) \quad (7)$$

式中: $f_g(n)$ 表示从初始状态 n_0 到目标状态 n 的评估价值; $A(n)$ 为由起始状态 n_0 到目标状态 n 的实际价值,取值为起点所经过的距离累加; $B(n)$ 表示到目标状态的最佳路径评估价值,如式(8)所示。

$$B(n) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \quad (8)$$

式中: x_1 、 y_1 表示起始状态的坐标值; x_2 、 y_2 表示目标状态的坐标值。

选取当前位置到目标位置的欧式距离 $R(n)$ 为评估值,如式(9)所示。

$$R(n) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (9)$$

本文所提出的改进的Dijkstra算法,首先通过式(7)分别计算每个子节点的评估函数值 f_g ,选取 f_g 值最小的节点作为最优路径节点。然后对 n 节点之后的节点进行对比迭代,寻找 f_g 值最小的节点,直至找到目标节点。最后从目标节点反向追溯所经过的节点,从而规划出最优路径。

2.3 电-氢新能源汽车负荷分析模型

在2.1节电-氢新能源汽车耗能模型的基础上,本文通过对用户出行链^[25-26]进行分析,结合Dijkstra路径规划算法,确定用户出行路径与充能特性,并对电-氢新能源汽车负荷需求进行分析预测。具体流程如图2所示。

具体步骤如下。

1) 初始化: 设置每个交通节点的EV和HV规模,分别用 N_E 和 N_H 表示。

2) 起始容量设置: 随机抽取每辆EV和HV的起始容量。

3) 确定行驶路径: 根据出行链的比例随机抽取终点,通过Dijkstra最短路径算法确定行驶里程和行驶路径。

4) 确定充电/加氢时刻: 根据行驶里程和车辆的起始状态计算行程结束时的电池容量或储氢状态,根据起始充电/加氢时刻,确定每辆车的起始充电/加氢时刻。

5) 设置边界条件: 预设EV和HV的最大数量,使得预测过程中EV和HV的数量不超过最大值。

6) 计算充电需求: 计算HV日加氢负荷制氢时消耗的电功率和压缩机消耗的电功率,最终根据EV和HV的日充电负荷计算各节点的年充电需求,至此预测过程全部完成。

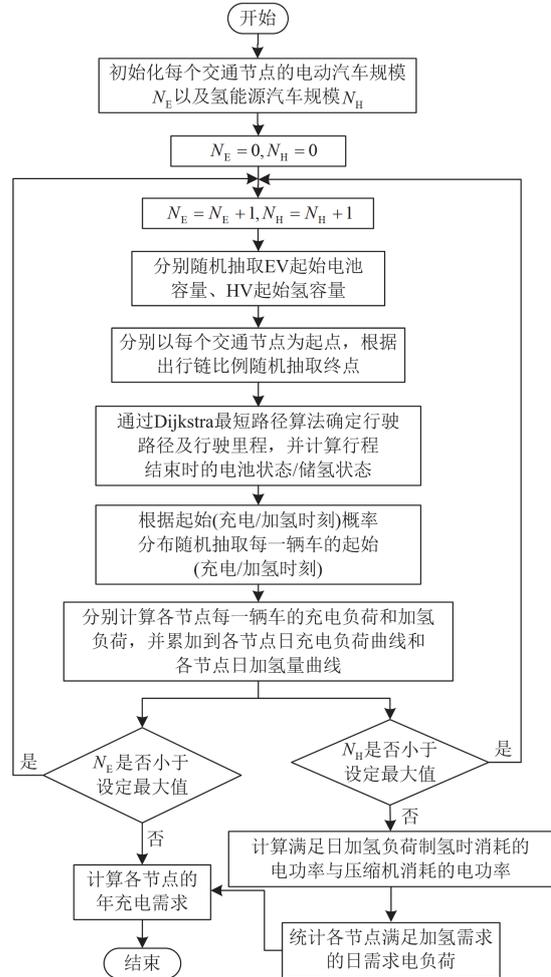


图2 基于出行与充能特性的电-氢负荷需求分析流程图

Fig. 2 Flow chart of electricity-hydrogen load demand analysis based on travel and charging characteristics

3 电氢一体化站选址规划模型

本文基于第2节得到的EV、HV电氢负荷需求,从用户与建设者两个层面对EHIS进行选址规划。

3.1 目标函数

以总成本最小为目标,考虑用户层面的EV、HV的耗能、耗时成本,以及建设者层面的EHIS建设运行成本。建立计及路网出行特性的EHIS选址规划模型,如式(10)所示。

$$\min f = \frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \cdot (\lambda_1 \cdot C_E + \lambda_2 \cdot C_P) \quad (10)$$

式中: r_0 表示贴现率; n 表示规划运行年限; C_E 表示EHIS建设运行成本; C_p 表示EV、HV的耗时耗能成本; λ_1 和 λ_2 表示权重系数。

其中, EHIS建设运行成本 C_E 包括建设EHIS的固定投资成本 C_{gd} 和EHIS的年运行管理成本 C_{yx} , 并且运行管理成本费用按固定投资成本的比例 α 进行折算, 计算如式(11)和式(12)所示。

$$C_{gd} = \sum_{i=1}^{N_i} \left(\sum_{j=1}^{N_{i,EV}} \left(c_{ev} \frac{P_{ev,ij}}{\eta_{ev,ij} \cos \theta_{ev,ij}} \right) + \sum_{j=1}^{N_{i,HV}} \left(c_{hv} \frac{(1-\gamma_{comp}) \eta_{hv,ij} F_{hv,ij}}{F_{ela,ave} H_H} \right) + c_{ele} P_{ele,i} + c_{comp} P_{comp,i} + c_{pot} + c_{FC} \right) \quad (11)$$

$$C_{yx} = \alpha C_{gd} \quad (12)$$

式中: N_i 表示所建设电氢一体化站的数量; $N_{i,EV}$ 表示第 i 个EHIS中充电机数量; $P_{ev,ij}$ 、 $\eta_{ev,ij}$ 、 $\theta_{ev,ij}$ 分别表示第 i 个EHIS中第 j 台电动汽车充电桩的输出功率、充能效率、功率因数; c_{ev} 表示充电桩单位投资成本; $\eta_{hv,ij}$ 、 $F_{hv,ij}$ 分别表示第 i 个EHIS中第 j 台加氢桩的充能效率、输出氢气量; c_{hv} 表示加氢桩的单位投资成本; c_{ele} 表示一个EHIS中电解槽单位投资成本; $P_{ele,i}$ 表示第 i 个EHIS中电解槽的耗能功率; c_{comp} 表示一个EHIS中压缩机单位投资成本; $P_{comp,i}$ 表示第 i 个EHIS中的压缩机耗能功率; c_{pot} 表示一个EHIS中储氢罐固定投资成本; c_{FC} 表示一个EHIS中燃料电池单位投资成本。

EV、HV的耗时耗能成本 C_p 包括EV、HV的耗能成本 C_{hn} 和EV、HV的充能耗时成本 C_{sj} , 表达式如式(13)和式(14)所示。

$$C_{hn} = \sum_{T=1}^{365} \left(\sum_{q=m_e} \left(S_{ev} \times \sum_{l=1}^{G_{ev}} L_{ev,l}^q \cdot e_{ev,x} \right) + \sum_{q=m_h} \left(S_{hv} \times \sum_{l=1}^{G_{hv}} L_{hv,l}^q \cdot e_{hv,x} \right) \right) \quad (13)$$

$$C_{sj} = \sum_{T=1}^{365} \left(\sum_{q=m_e} \left(\delta_{ev} \times \sum_{l=1}^{G_{ev}} L_{ev,l}^q \cdot e_{ev,x} \right) + \sum_{q=m_h} \left(\delta_{hv} \times \sum_{l=1}^{G_{hv}} L_{hv,l}^q \cdot e_{hv,x} \right) \right) \quad (14)$$

式中: T 表示天数; S_{ev} 、 S_{hv} 分别表示EV和HV的充能价格; $L_{ev,l}^q$ 表示第 q 辆EV经过第 l 段路时的行

驶距离; $L_{hv,l}^q$ 表示第 q 辆HV经过第 l 段路时的行驶距离; $e_{ev,x}$ 表示EV单位里程耗能量; $e_{hv,x}$ 表示HV单位里程耗能量; m_e 、 m_h 分别表示EV和HV的总数; G_{ev} 和 G_{hv} 分别表示EV和HV经过路段集合; δ_{ev} 表示电动汽车的时间成本系数; δ_{hv} 表示氢能汽车的时间成本系数。

3.2 约束条件

1) EHIS 选址距离约束

EHIS 应较为均匀地分布在规划区域内, 以满足全区域内 EV-HV 的充能需求, 为避免任意两个 EHIS 之间的距离过近需满足式(15)的约束条件。

$$L_{a,b}^T \geq L_{min}^T \quad (15)$$

式中: $L_{a,b}^T$ 表示第 a 个 EHIS 与第 b 个 EHIS 之间的直线距离; L_{min}^T 表示建站最短距离。

2) EHIS 站内充电机和加氢机数量约束

$$N_{min}^E \leq N_E \leq N_{max}^E \quad (16)$$

$$N_{min}^H \leq N_H \leq N_{max}^H \quad (17)$$

式中: N_{max}^E 、 N_{min}^E 分别表示单个 EHIS 站内充电机数量的最大值和最小值; N_{max}^H 、 N_{min}^H 分别表示单个 EHIS 站内加氢机数量的最大值、最小值。

3) 氢能功率交换约束

$$\begin{cases} E_{EL} = E_{HT} + L_H \\ 0 \leq E_{EL} \leq E_{EL,max} \\ 0 \leq L_H \leq L_{H,max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: E_{EL} 、 E_{HT} 、 L_H 分别表示电解槽制氢功率、储氢传输功率、氢负荷功率(单位: Nm^3); $E_{EL,max}$ 、 $L_{H,max}$ 分别表示电解槽的制氢功率上限、HV 负荷加氢功率上限。

4) 电-氢间功率交换约束

对于 EHIS 的选址规划, 不仅要满足充能方面的约束, 同时需要考虑到建设 EHIS 给电网带来的冲击, 如式(19)所示。

$$\begin{cases} P_g + P_{ele} + P_{comp} = P_{FC} \\ P_{FC,min} \leq P_{FC} \leq P_{FC,max} \\ P_{g,min} \leq P_g \leq P_{g,max} \\ P_{ele,min} \leq P_{ele} \leq P_{ele,max} \\ P_{comp,min} \leq P_{comp} \leq P_{comp,max} \end{cases} \quad (19)$$

式中: P_g 表示配电网处除去 EHIS 外的负荷总量; P_{FC} 表示燃料电池输出功率; $P_{g,max}$ 、 $P_{g,min}$ 分别表示除去 EHIS 外的负荷的上下限; $P_{ele,max}$ 、 $P_{ele,min}$ 分别表示电解槽制氢过程中所消耗的有功功率的上下

限; $P_{FC,max}$ 、 $P_{FC,min}$ 分别表示燃料电池输出功率的上下限; $P_{comp,max}$ 、 $P_{comp,min}$ 分别表示压缩机在工作时所消耗的有功功率的上下限。

3.3 基于 Voronoi 划分的粒子群联合求解

Voronoi 图即泰森多边形,它是由相邻两点之间的垂直平分线连接组成一组连续的多边形,按照相邻两点最近原则划分平面,此时每个点与它相离最近的邻近区域相互关联^[27-28]。

在通信网络中,利用加权 Voronoi 图设计中继站的位置可以提高利用率、降低成本。本文将其引入到交通网络中,从而求解 EHIS 的选址规划问题。但该方法需要提前设置候选控制节点,计算结果会出现局部最优的问题。为此本文将粒子群算法考虑在内,与其进行联合求解从而进行全局寻优。首先预设 EHIS 建设数量,按建设位置坐标生成 V 图,根据一体化站服务范围计算所需的充能负荷,求取适应度函数,采用粒子群算法获得 EHIS 的最优位置坐标和总成本,具体步骤如图 3 所示。

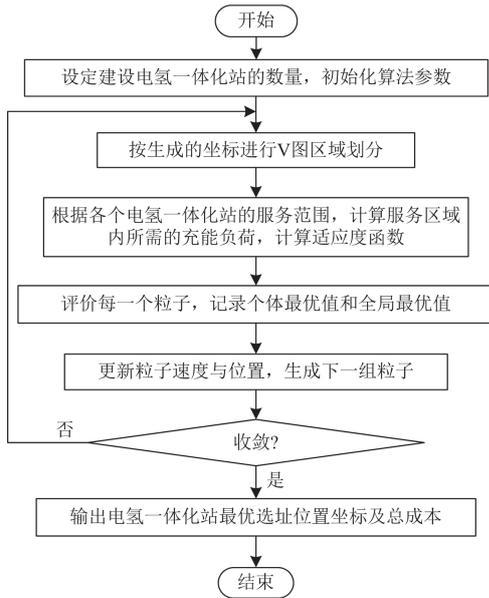


图 3 基于 Voronoi 划分的粒子群联合求解流程图
Fig. 3 Flow chart of particle swarm joint solution based on Voronoi partition

4 仿真及结果分析

4.1 算例参数及场景设置

为验证本文所提方法的有效性及其实用性,将南方某市城区部分 29 节点 49 道路网络作为待规划区进行算例分析。该区域分为居民区 1(节点 1—11)、居民区 2(节点 12—16)、工作区(节点 17—20)、商业区(节点 21—29)^[21],具体结构如图 4 所示。本文假设该区域内共有 15 000 辆电动汽车、5000 辆氢

能源汽车。本文假设 EV、HV 用户日出行概率符合日出行链比例,其出行链比例如表 1 所示。EHIS 关键设备配置参数如表 2 所示^[24]。粒子群算法参数设置:粒子群规模为 50 个;迭代次数设置为 300 次; $c_1 = 2.5$, $c_2 = 2$, $\omega = 0.4$;权重系数取 $\lambda_1 = 0.5$, $\lambda_2 = 0.5$ 。

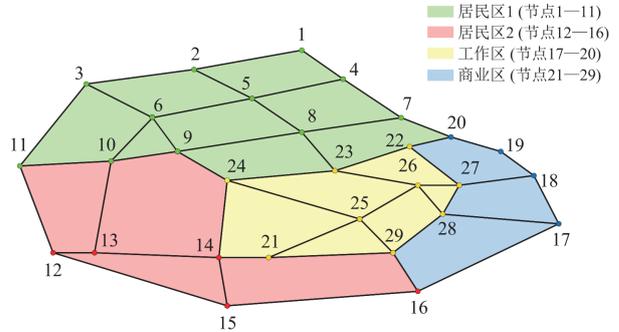


图 4 交通网络拓扑结构图

Fig. 4 Transportation network topology diagram

表 1 EV-HV 日出行链比例表

Table 1 EV-HV daily trip chain proportion table

| 行程序号 | 出行链 | 所占比例/% |
|------|-----------|--------|
| 1 | H-W | 46.5 |
| 2 | H-S/O | 16.1 |
| 3 | W-S/O | 12.2 |
| 4 | H-W-S/O | 12.1 |
| 5 | H-W+H-S/O | 13.1 |

表 2 算例参数配置表

Table 2 Example parameter configuration table

| 类型 | 参数名称 | 符号 | 数值 |
|-----|----------------------|-----------------|------|
| 电解槽 | 氢气高热值/(kWh/kg) | H_H | 39 |
| | 电解槽能源转化效率/% | η_{ele} | 73 |
| | 单位投资成本/(元/kW) | c_{ele} | 1457 |
| 压缩机 | 参考压力下的有功消耗率/(kWh/kg) | P_{ref} | 2.43 |
| | 正常工作压力/bar | β_{comp} | 350 |
| | 标准大气压力/bar | β^0 | 1 |
| | 参考工作压力/bar | β_{ref} | 200 |
| | 氢气耗散率/% | γ_{comp} | 1 |
| | 单位投资成本/(元/kW) | c_{comp} | 1963 |
| 充电桩 | 单位投资成本/(万元/台) | c_{ev} | 10 |
| 储氢罐 | 固定投资成本/(万元/台) | c_{pot} | 1 |

注: 1 bar = 0.1 Mpa。

4.2 基于用户出行路径与充能特性的充能需求预测结果

本文根据表 1 所示出行链信息,可得到 EV、HV 用户初始数量-位置分布曲线如图 5 所示。同时,

EV、HV 的充电加氢起始时间服从正态分布。根据 2.3 节基于用户出行路径与充电特性, 对 29 节点网络下典型 EV、HV 用户的电氢充能需求负荷数据进行分析, 预测得到各节点 EV 充电负荷及满足加氢需求的耗电负荷需求曲线如图 6 所示。

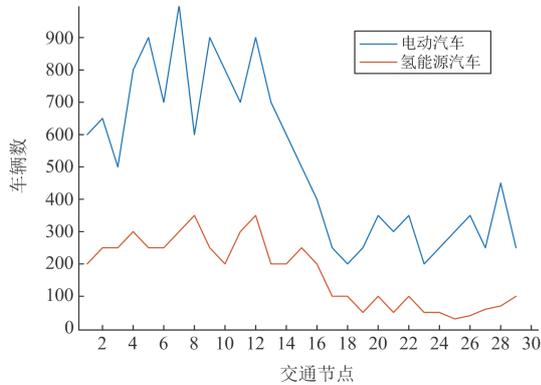


图 5 EV、HV 用户初始数量-位置分布曲线图

Fig. 5 Initial number-position distribution curves of EV and HV users

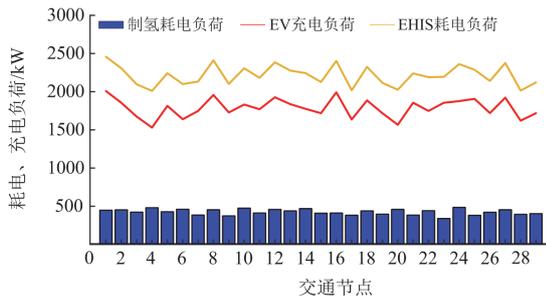


图 6 各节点耗电负荷需求曲线

Fig. 6 Power consumption load demand curve of each node

对比分析图 5、图 6 可知, 本文所涉及的车辆初始数量-位置分布曲线如图 5 所示, 大量汽车起初位于节点 1—16, 即居民区内。经过对用户出行链及出行路径的有效模拟, 通过图 6 的充能需求分布曲线可以看出本文预测方法的有效性, 各节点的充能需求相对平滑, 并未出现某一节点过高或过低的情况, 且几个充能需求较大的节点多邻近于商业区、工作区、居民区 3 种的交汇位置, 该区域车流量大, 充能需求更大, 符合实际情况, 证明了本文方法可以有效模拟 EV、HV 用户出行的随机性, 得到了有效可靠的充能需求预测结果, 为本文 EHIS 的选址规划奠定了基础。

4.3 电氢一体化站选址规划结果

在 2.3 节预测结果的基础上, 单独规划建设充电站和加氢站、统一建设 EHIS 两种情况的综合成本曲线如图 7 所示, 其中设置建站数量范围为 3~9 座。

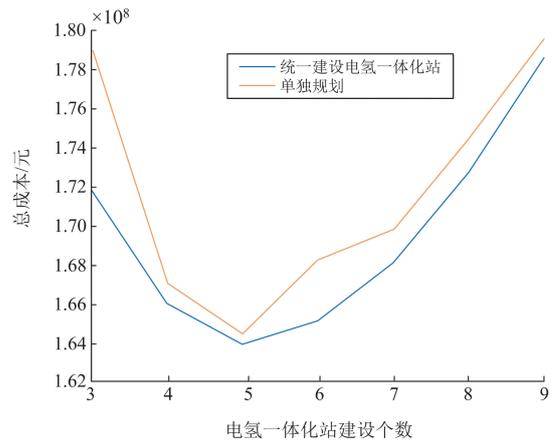


图 7 建站数量与成本曲线

Fig. 7 Number of stations and cost curve

由图 7 可知, 单独建设充电站和加氢站相对于统一建设 EHIS 来说, 其建设成本相对较高, 且氢能源需要重新供给, 增加了 HV 用户的用氢成本, 而统一建设 EHIS 则可以实现站内的电氢互转, 从而降低了整体的社会成本。因此统一规划建设 EHIS 更适用于未来城市交通能源需求, EHIS 建站数量最优规划表如表 3 所示。

表 3 EHIS 建站数量最优规划表

Table 3 Optimal planning table for the number of EHIS stations

| EHIS 建站数量 | 建设运行成本/万元 | 用户成本/万元 | 总社会成本/万元 |
|-----------|-----------|---------|----------|
| 3 | 1640.3 | 78.3 | 1718.6 |
| 4 | 1599.1 | 61.6 | 1660.7 |
| 5 | 1584.0 | 55.8 | 1639.8 |
| 6 | 1610.7 | 51.1 | 1661.8 |
| 7 | 1642.4 | 46.5 | 1688.9 |
| 8 | 1688.9 | 40.9 | 1729.8 |
| 9 | 1735.9 | 36.3 | 1772.2 |

结合图 7 和表 3, 对于建设者而言, 随着 EHIS 建设数量的增多, 其年建设运行成本近似呈正比趋势逐渐增加。而对于用户来说, 随着 EHIS 的建设数量增多, 用户前往各个 EHIS 途中的年耗时成本逐渐减小。这是因为随着 EHIS 建设数量的增多, 用户到达 EHIS 的距离缩短, 增加了用户充能的便利程度, 减小了各 EHIS 内的排队等待时间及用户耗时成本。

而在建设 3 个和 4 个 EHIS 时, 为满足当前区域内 EV、HV 用户的全部充能需求, 其中每一个 EHIS 中充电桩和加氢桩的数量相应增多, 从而导致建设一个站点的建设成本有所上升, 再加上其对于用户层面来说耗时成本过高。根据图 7 和表 3 可知, 在建

设 5 座 EHIS 时, 总社会成本最小, 为 1639.8 万元。

此时, 最优建设方案的最优选址位置和“V”图凸多边形对应的服务范围如图 8 所示。图中红色方块代表 EHIS 的选址最优规划点, 蓝线所划分的区域为对应服务范围。另外, 建设 6 个 EHIS 的选站规划图如图 9 所示。

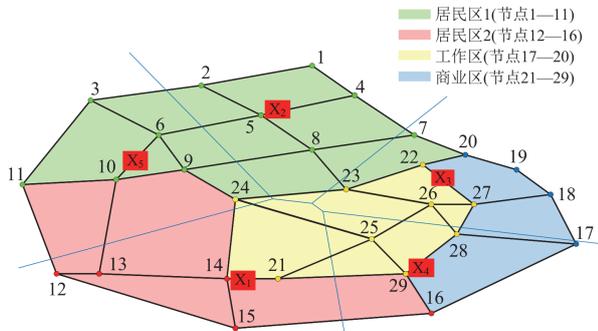


图 8 建设 5 座 EHIS 选址规划图

Fig. 8 Construction of five EHIS site selection planning map

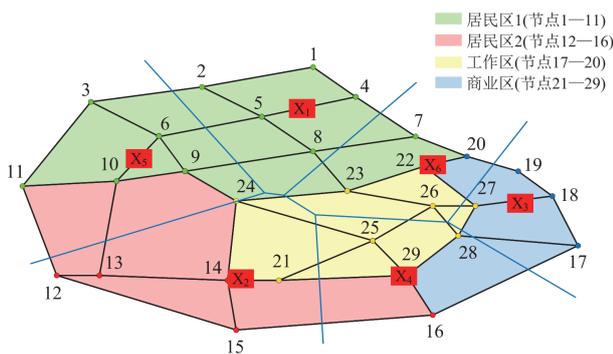


图 9 建设 6 座 EHIS 选址规划图

Fig. 9 Construction of 6 EHIS site selection planning map

由图 8 可以看出, EHIS 选址位置均匀分布, 可以满足全区域内 EV、HV 用户的充能需求, 且分布更偏向于充能负荷较大的节点, 这些节点通常是 EV、HV 用户出行的目的地或主要途径地, 充能需求较大, EHIS 的建设位置相对较近, 从而减少了用户的充能耗时成本, 证明了本文成本最低选址规划方法的有效性与合理性。对比图 8 与图 9, 在路网信息更复杂、充能需求更大的区域, 多建设一个 EHIS 显然可以充分满足该区域的充能需求, 从而进一步降低用户耗时成本, 更加便于 EV、HV 用户充能。

从用户层面考虑, 建设 6 座 EHIS 提供了更大的 EV 和 HV 用户充能裕度, 能够解决 EV、HV 需求增长而导致的充电不及时的问题, 更加便于 EV、HV 用户充能。但是多建设一个 EHIS 的建设成本及后续运行维护成本显然高于用户的耗时成本。而本

文方法在均衡考虑用户和投资者成本的基础上, 为规划建设提供了一定的思路。而在实际建设过程中用户耗时成本是无法精确衡量的, 这也是在实际建设中需要考虑的, 因此本文更侧重于对用户层面进行选择, 计及未来的用户充能裕度, 最终综合考虑建设 6 座 EHIS 为该区域最优建站数量, 总成本最小为 1661.8 万元。

4.4 电氢一体化站内充电桩、加氢桩优化结果

根据本文所提出的方法可得到各 EHIS 中充电桩与加氢桩的总数目, 以 4.3 节将建设 5 座 EHIS 最优为例, 结合图 8 选址位置, 在考虑电氢之间功率交换约束的基础上, 各 EHIS 站内充电桩与加氢桩数目配置情况及各站点用氢成本如表 4 所示。

表 4 建站位置及充电桩、加氢桩数目

Table 4 Location of station and number of charging piles and hydrogenation piles

| EHIS 编号 | X 轴坐标 | Y 轴坐标 | 充电桩数目 | 加氢桩数目 | 年用氢成本/万元 |
|----------------|--------|--------|-------|-------|----------|
| X ₁ | 276.28 | 121.94 | 14 | 6 | 109.5 |
| X ₂ | 345.25 | 469.13 | 12 | 5 | 90.1 |
| X ₃ | 546.36 | 327.74 | 18 | 9 | 146.3 |
| X ₄ | 508.04 | 144.48 | 11 | 4 | 95.8 |
| X ₅ | 157.03 | 366.51 | 11 | 6 | 97.4 |
| X ₆ | 513.61 | 360.37 | 12 | 6 | 103.46 |

根据表 4 优化结果结合图 8 可以看出, 不同 EHIS 中充电桩与加氢桩的个数与其服务区域内充电、加氢需求密切相关, 图 8 中明显可以看出 X₃ 号 EHIS 服务节点数量最多, 路网信息最复杂, 其服务节点多为商业区, 属于出行链的中末段, 此时正是 EV、HV 用户充能需求最大的时刻, 因此相应配置的充电桩与加氢桩数目最多; X₄ 与 X₅ 所服务的节点相对较少, 充电桩与加氢桩配置数量较少。

根据图 10 的算法对比结果可知, 从用户角度来看, 本文所采用的改进 Dijkstra 算法在路径选择上明显优于 Dijkstra 算法。并且由图 11 可以看出, 本文配置方法明显优于文献[19]的配置方法, 本文方法能够实现电能的充分利用, 在 10:00—13:00 和 18:00—20:00 时段为满足用户用电需求, 减少甚至不进行制氢储氢, 相比于文献[19], 在 14:00—17:00 非用电高峰时段制造了更多的用氢环境。

为了验证本文优化选址结果的有效性, 将该结果同重心布站方式^[16]下(将 EHIS 建设在负荷最大的 6 个节点上, 即节点 5、节点 10、节点 14、节点 18、节点 22、节点 29)的用氢成本进行对比, 结果如图 12 所示。

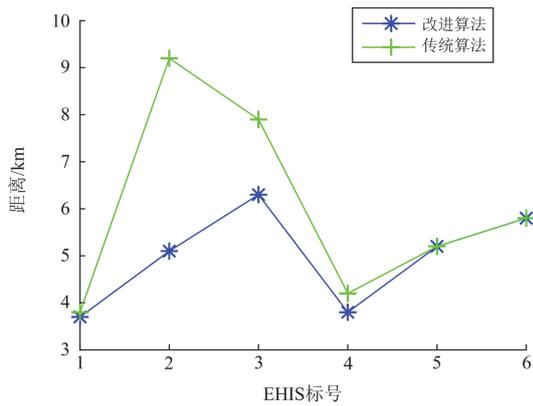


图 10 算法结果对比

Fig. 10 Comparison of algorithmic results

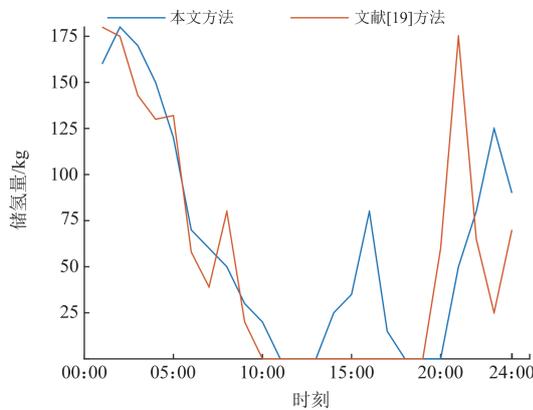


图 11 24 h 的储氢量分布

Fig. 11 Distribution of hydrogen storage in 24 hours

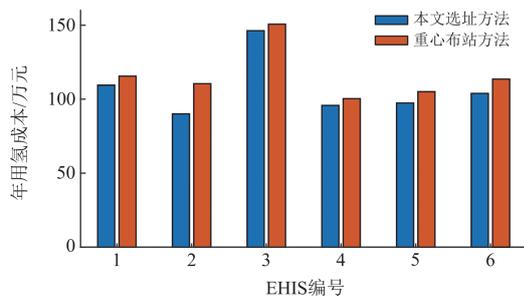


图 12 优化选址布站与重心布站下各 EHIS 的 annual 氢成本

Fig. 12 Annual hydrogen cost of each EHIS under the optimized site layout and the center of gravity layout

由图 12 可知, 通过本文优化选址布站后, 各个站点的年用氢成本均小于重心布站, 因为本文选址方法不仅考虑了充能需求大的节点还兼顾了其余节点, 证明了本文选址模型的优越性与可行性。

根据以上结果, 本文所提出的考虑电氢间功率交换约束的充电桩及加氢桩配置策略可以有效计及用户出行路径与充能特性, 根据不同地区的充能需

求进行有效配置。同时, 在确定电氢一体化站建设位置的基础上, 在站内根据电氢间的功率转换约束进行充电与加氢的互相配置, 有效避免了在区域内建设同等数量充电站和加氢站所带来的建设成本浪费。

5 结论与展望

5.1 结论

本文在基于用户出行路径与充能特性的情况下, 通过分析用户出行链结合 Dijkstra 路径规划, 对电动汽车及氢能源汽车的充能需求进行分析预测。为解决耦合网络下, 电-氢新能源汽车充能设施缺乏布局规划导致的能源补给困难等问题, 提出以 EHIS 为耦合关键, 分别从用户层面计及 EV、HV 的耗能、耗时成本, 建设者层面计及 EHIS 建设运行成本。并以总成本最小为目标, 建立计及路网出行特性的 EHIS 选址规划模型。通过基于 Voronoi 划分的粒子群算法进行联合求解, 得出以下结论。

1) 本文所提出的基于用户出行路径与充能特性的 EV、HV 需求负荷预测方法, 在缺乏实际路网数据的情况下, 通过分析用户出行链及最短路径规划的预测方法, 可以得出合理的充能需求分布情况。

2) 通过考虑 EHIS 的选址规划问题, 将加氢站和充电站进行结合, 从而为电-氢-交通三网的耦合提供基础。

3) 通过基于 Voronoi 划分的粒子群算法的联合求解, 并在某市 29 节点交通网络中得到合理的电氢一体化站服务范围、最优数量、最优选址及各站点内充电桩与加氢桩配置数目的规划方案, 证明了本文规划方法的可行性与合理性。电氢一体化站统一规划建设相较于单独规划充电站与加氢站可以有效减少建设成本及用氢成本, 且 EHIS 可以将富裕的电力转化为氢能, 一定程度上缓解了氢气在运输过程中的成本损耗。其选址问题为推动城市交通与电-氢能源网协同优化提供了一定的理论基础。

5.2 展望

针对电氢一体化站的规划与布局, 从以下几个方面进行展望。

1) 可以考虑动态交通网模型融合多源数据, 包括汽车行驶轨迹、交通流量信息、能源消费等数据等, 以此来提高充能需求预测的准确性和时效性。通过实时数据分析, 动态调整 EHIS 布局以更好地满足用户的即时充能需求。

2) 在电氢一体化站的基础上, 通过对可再生能源的充分利用, 从而形成多能互补的充能体系等, 利用光伏或风能提供绿色电力进行电解水制氢, 减小能源浪费, 促进电网、氢能网和交通网之间的协同优化。

3) 本文进行负荷预测采用的是交通网某一段时间的典型负荷进行负荷需求分析, 后续可以考虑计及 EV、HV 的动态需求变化, 使得预测值更加接近实际情况, 以便于系统规划。

参考文献

- [1] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] WANG Y, WANG Y, HUANG Y, et al. Operation optimization of regional integrated energy system based on the modeling of electricity-thermal-natural gas network[J]. Applied Energy, 2019, 251.
- [3] GEETH T S, AMUDHA V, CHELLASWAMY C. A novel dynamic capacity expansion framework includes renewable energy sources for an electric vehicle charging station[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2022: 1-25.
- [4] 方必武, 范展滔, 王科, 等. 考虑储能荷电超限的高比例可再生能源系统的源荷储协调优化[J]. 供用电, 2024, 41(7): 92-98.
FANG Biwu, FAN Zhantao, WANG Ke, et al. Coordinated optimization of source-load-storage for a high-proportion renewable energy system considering the overcharge of energy storage[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(7): 92-98.
- [5] 张学军, 韩鹏. “车-站-路-网”系统中时空分布充电电价的优化[J]. 现代电力, 2021, 38(6): 628-635.
ZHANG Xuejun, HAN Peng. Optimization of spatial-temporal charging price in the system composed of electric vehicle, charging station, traffic network and power network[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(6): 628-635.
- [6] 周卓, 芦翔, 刘海涛, 等. 含新能源发电的电动汽车充电站充电功率在线优化策略研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 101-107.
ZHOU Zhuo, LU Xiang, LIU Haitao, et al. Research on on-line charging power optimization strategy for EV charging station with renewable energy generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 101-107.
- [7] 潘超, 郭晨雨, 刘继哲, 等. 电-氢混合储能参与的多能系统低碳优化[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(2): 21-29.
PAN Chao, GUO Chenyu, LIU Jizhe, et al. A study on low-carbon optimization of the multi-energy system with electricity-hydrogen hybrid energy storage participation[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(2): 21-29.
- [8] 张巍, 祝童童, 苏瑾. 考虑电动汽车和5G基站的电力-信息-交通耦合网络需求响应策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 116-126.
ZHANG Wei, ZHU Tongtong, SU Jin. Demand response strategy for power-cyber-transportation coupling network considering electric vehicles and 5G base stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 116-126.
- [9] 熊轲, 吴思宇, 郑海娜, 等. 5G-V2X 辅助下基于站点区域类型的城市充电站规划方法[J]. 中国电力, 2021, 54(3): 89-98.
XIONG Ke, WU Siyu, ZHENG Haina, et al. 5G-V2X-based vehicle charging station planning method considering different land-use types[J]. Electric Power, 2021, 54(3): 89-98.
- [10] 张新松, 朱晨旭, 李大祥, 等. 考虑截获交通流量与充电行驶距离的电动汽车充电网络规划[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(17): 40-50.
ZHANG Xinsong, ZHU Chenxu, LI Daxiang, et al. Electric vehicle charging network planning considering captured traffic flows and charging driving distance[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(17): 40-50.
- [11] 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): 1100-1108.
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): 1100-1108.
- [12] 蔡子龙, 王品, 宋建, 等. 电动汽车公共应急充电站选址规划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 62-68.
CAI Zilong, WANG Pin, SONG Jian, et al. Location planning model of public emergency charging stations for electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 62-68.
- [13] 张美霞, 张倩倩, 杨秀, 等. 基于交通-电力均衡耦合的电动汽车快充站与配电网联合规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 51-63.
ZHANG Meixia, ZHANG Qianqian, YANG Xiu, et al. Joint planning of electric vehicle fast charging stations and distribution network based on a traffic-electricity equilibrium coupling model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 51-63.
- [14] ARSLAN O, KARASAN O, MAHJOUR A, et al. A branch-and-cut algorithm for the alternative fuel refueling station location problem with routing[J]. Transportation Science, 2019, 53(4): 1107-1125.

- [15] ZHANG H, MOUR S, HU Z, et al. PEV fast-charging station siting and sizing on coupled transportation and power networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2595-2605.
- [16] 张必达. 电动汽车充换电站址规划及路径优化问题研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
- [17] 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 Tiejing, 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.
- [18] 姜智霖, 郝峰杰, 袁志昌, 等. 考虑 SOC 优化设定的电-氢混合储能系统的运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 65-76.
JIANG Zhilin, HAO Fengjie, YUAN Zhichang, et al. Optimal operation of an electro-hydrogen hybrid energy storage system considering SOC optimization setting[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 65-76.
- [19] 高赐威, 王崑, 陈涛. 基于可逆固体氧化物电池的电氢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.
- [20] 顾玖, 王晨磊, 解大. 电力市场环境下的电-氢一体化站优化运行[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 130-139.
GU Jiu, WANG Chenlei, XIE Da. Research on optimal operation of electricity-hydrogen integrated station in electricity market environment[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 130-139.
- [21] 李蕊睿, 李奇, 蒲雨辰, 等. 计及功率交互约束的含电-氢混合储能的多微电网系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 53-64.
LI Ruirui, LI Qi, PU Yuchen, et al. Optimal configuration of an electric-hydrogen hybrid energy storage multi-microgrid system considering power interaction constraints[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 53-64.
- [22] 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.
- [23] 邵尹池, 穆云飞, 林佳颖, 等. “车-站-网”多元需求下的电动汽车快速充电引导策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 60-66, 101.
SHAO Yinchi, MU Yunfei, LIN Jiaying, et al. Fast charging guidance strategy for multiple demands of electric vehicle, fast charging station and distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43 (18): 60-66, 101.
- [24] 王众. 计及电动汽车时空分布的充电站规划与配网可靠性评估[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [25] YANG G, JIANG Y. Siting and sizing of the hydrogen refueling stations with on-site water electrolysis hydrogen production based on robust regret[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(2): 1-22.
- [26] 陈镜如. 基于出行链的电动汽车快速充电设施布局规划研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [27] 侯慧, 唐俊一, 王逸凡, 等. 城区电动汽车充电站布局规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 181-187.
HOU Hui, TANG Junyi, WANG Yifan, et al. Layout planning of electric vehicle charging stations in urban areas[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 181-187.
- [28] 赵炳耀, 陈璟华, 郭经韬, 等. 基于 Voronoi 图和改进引力搜索算法的电动汽车充电站选址定容[J]. 广东工业大学学报, 2021, 38(3): 72-78.
ZHAO Bingyao, CHEN Jinghua, GUO Jingtao, et al. Location and capacity of electric vehicle charging station based on Voronoi diagram and improved gravity search algorithm[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2021, 38(3): 72-78.

收稿日期: 2024-07-10; 修回日期: 2025-03-10

作者简介:

李英量(1979—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定控制、配电网规划与继电保护;

E-mail: yingliang.li@hotmail.com

郭飞燕(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网优化运行。E-mail: 1870570775@qq.com

(编辑 许威)