

引用格式: 张力, 刘海洋, 段德萱, 等. 交能融合背景下的高速公路光储充一体化发展路线展望 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 86-94. ZHANG Li, LIU Haiyang, DUAN Dexuan, et al. Prospects for the development path of highway PV-Storage-Charging integration under the background of transportation and energy integration [J]. Southern energy construction, 2024, 11(5): 86-94. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.09.

交能融合背景下的高速公路光储充一体化 发展路线展望

张力¹, 刘海洋^{1,✉}, 段德萱¹, 黄晶晶¹, 张炳成¹, 叶小盛², 徐展³

(1. 中国电力工程顾问集团有限公司, 北京 100120;

2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

3. 中国能源建设集团浙江省电力设计院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: [目的] 新能源汽车的蓬勃发展给高速公路用电负荷带来了更高要求。文章基于我国高速公路用电负荷、光资源禀赋以及适用于高速公路服务区的储能技术分析, 研究了光-储-充一体化发展路线的公路交能融合模式的自洽性, 并结合工程实例, 对公路交能融合模式的可行性进行论证和分析。[方法] 通过分析我国公路里程数、新能源汽车市场渗透率、以及公路交通的光储资源, 基于新能源汽车增长可能导致的公路用电负荷增长和公路交通的光资源利用空间, 得出高速服务区的光储充综合能源利用模式。结合已有交能融合自洽模式的工程示例, 对高速公路光-储-充一体化发展模式提出建议。[结果] 数据表明, 到2025年, 全国新能源汽车保有量将超过2500万辆, 新能源车将达到37.5 TWh的电能消耗, 电能需求潜力巨大。同时我国道路沿线及周边地区光资源丰富, 所蕴含的光伏发电潜力约为1022.8 TW, 而通过测算可得, 高速公路的基础设施年均能耗约为17.99 TW。[结论] 交通与能源融合的主要路径应从开发基于道路交通自身基础设施的风、光自然资源禀赋, 形成自洽供给的交通能源系统入手, 从而构建交通系统能源供给分布式、清洁化、可再生、近零排放的系统解决方案。光-储-充一体化的交能融合开发路线能够将可再生能源就地消纳, 在推进公路用能清洁化的同时缓解电网压力, 潜力巨大。文章可为我国公路交能融合的发展提供一定的理论支撑与借鉴。

关键词: 高速公路; 储能; 光储充一体化; 光伏; 交能融合

中图分类号: TK519; TK9

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)05-0086-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.09

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Prospects for the Development Path of Highway PV-Storage-Charging Integration Under the Background of Transportation and Energy Integration

ZHANG Li¹, LIU Haiyang^{1,✉}, DUAN Dexuan¹, Huang Jingjing¹, ZHANG Bingcheng¹, YE Xiaosheng², XU Zhan³

(1. China Power Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100120, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

3. China Energy Engineering Group Zhejiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: [Introduction] The rapid development of new energy vehicles (NEVs) brings higher requirements for the power demand of highways. Based on the analysis of the power loads of highways, the photovoltaic endowment, and the energy storage technologies suitable for highway service areas in China, this paper explores the self-consistency of the highway transportation and energy integration mode of the PV-Storage-Charging integrated development path, and combines practical engineering project to demonstrate and analyze

收稿日期: 2024-01-09 修回日期: 2024-04-23

基金项目: 中国电力工程顾问集团有限公司重大科技专项“空港及高速服务区低碳自洽能源系统与关键技术研发”(DG3-A02-2022)

the feasibility of the highway transportation and energy integration mode. **[Method]** By analyzing the total mileage of highways in China, the market penetration rate of NEVs, and the PV & energy storage resources of highway transportation, based on the potential increase in highway power load due to the growth of NEVs and the utilization space of photovoltaic resources in highway transportation, a comprehensive energy utilization mode of PV-Storage-Charging for highway service areas was proposed. Combined with existing projects of self-consistent modes of transportation and energy integration, suggestions were proposed for the integrated development mode of highway PV-Storage-Charging. **[Result]** Data indicates that by 2025, the national stock of NEVs will exceed 25 million, consuming 37.5 TWh of electricity, showing tremendous potential for electricity demand. At the same time, the abundant photovoltaic resources along and around roads in China have a photovoltaic generation potential of approximately 1 022.8 TW, while the calculated annual energy consumption of highway infrastructure is approximately 17.99 TW. **[Conclusion]** The main path of integration between transportation and energy should start with developing wind and photovoltaic natural resource endowments based on the infrastructure of road transportation itself, and forming a self-consistent supply of transportation energy systems, thereby constructing a distributed, green, renewable, and net zero-emission energy supply system for transportation systems. The integrated development path of PV-Storage-Charging transportation and energy integration can consume renewable energy locally, alleviate grid pressure while promoting the clean energy utilization of highways, showing immense potential. This paper can provide theoretical support and reference for the development of highway transportation and energy integration in China.

Key words: highway; energy storage; integration of PV, storage and charging; PV; transportation and energy integration

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

2019年9月,党中央、国务院印发了《交通强国建设纲要》,明确了新时代交通强国建设的总目标和重点任务,并指出:要进一步提高交通领域的高效化、绿色化和智能化,优化交通能源结构,推进新能源、清洁能源应用,促进公路货运节能减排^[1]。交通网是潜力巨大的储能池,应充分利用、探索新能源发电、电力系统、储能电站、陆域基础设施、电动车或氢燃料汽车等路域内外的新能源电站、储能与充换电设施协调配合方式与智慧调度运行系统,创建发输储用一体化的新型交通基础设施网络。因而交能融合无论是对于交通还是能源方面都具有正面的作用,具有发展潜力。

截至目前,我国的交通用能结构中电力占比仅有5%,清洁用能需求与潜力巨大^[2]。其中,公路交通电气化水平较低,碳排放量在我国交通运输总量占比超87%,清洁用能替代转型发展空间巨大^[3]。2021年2月,党中央、国务院印发了《国家综合立体交通网规则纲要》,要求交通基础设施绿色化建设比例到2035年达到95%而数字化率要求达到90%^[4]。能源系统和交通系统均朝着高效、智能、绿色的方向发展,二者发展趋势和未来属性的一致性使得交通和能源的融合发展成为了一种必然趋势,构建绿

色、高效、智能的交通能源一体化系统已成为践行“双碳”战略和“交通强国”战略、实现经济社会可持续发展的必然选择^[5]。公路交通作为最便捷、高效的交通基础设施,且公路运输占全国交通运输排放量的85%以上^[5],然而,对于交能融合尤其是公路交能融合的研究和相关文献尚处于初期探索阶段,因此探索公路交通(尤其是高速公路)的交能融合发展道路,对于推动交能融合新能源系统发展具有先导意义和引领作用。

文章分析了高速公路交能融合的方案和应用场景,重点介绍了基于光储充一体化的交能融合技术,并对示范工程进行了评价,从多个角度展示了高速公路交能融合潜力和路径,为交能融合的技术实现和未来发展提供了参考依据。

1 高速公路用电负荷分析

1.1 高速公路陆运发展现状

截至2022年底,如表1所示,我国高速公路总里程达到17.7万km左右,居世界第一位。高速公路不仅提高了人员和货物的流动效率和便利性,也促进了区域经济一体化和城乡融合发展。

随着我国经济社会恢复性增长和人民生活水平提高,《“十四五”时期全国综合交通运输体系发展规划》提出到2025年全国公路通车里程预计将达

表 1 2017—2022 年全国公路总里程与高速公路总里程对比

Tab. 1 Comparison of national total road mileage and total highway mileage from 2017 to 2022

年份	全国公路总里程/ (10 ⁴ km)	高速公路总里程/ (10 ⁴ km)	高速公路占比/ %
2017	477.35	13.64	2.86
2018	484.65	14.26	2.94
2019	501.25	14.96	2.98
2020	519.81	16.1	3.10
2021	528.07	16.91	3.20
2022	535.00	17.7	3.31

550 万 km, 其中高速公路总里程预计达到 19 万 km 左右^[6]。

交通运输是碳排放的主要来源之一, 根据《国务院关于印发“十四五”节能减排综合工作方案的通知》^[7], 到 2025 年, 我国交通运输领域单位运输量能耗比 2020 年下降 10% 以上, 单位运输量碳排放比 2020 年下降 13% 以上。为实现这一目标, 我国将加快推进交通物流节能减排工程。交通运输的节能减排建设, 势必推动高速公路陆运交通的低碳发展, 增加高速公路服务区清洁能源消费占比, 促进高速公路的交能融合转型^[1]。从高速公路能源系统规划的角度来看, 发展分布式光伏对于高速公路的节能减排可行性较高^[8], 文献^[9]中也证实了光伏系统能够减轻电网的供电压力, 具有显著节能减排效果。

1.2 高速公路用电负荷预测趋势预测

相关分析文献^[10]预测, 在“十四五”期间, 中国交通用能仍将继续增长, 高速公路用电负荷主要包括隧道、服务区、收费站等沿线设施的用电需求。近年来, 日益增长的新能源汽车市场份额也给电动车充电站等新兴用电负荷带来深刻影响, 新能源汽车市场渗透率增加给高速公路服务区充电桩服务提出了更高要求, 而构建新型高速公路服务区建设模式、提高服务区充换电服务质量也会反过来推动新能源汽车的发展。

中国是全球最大的汽车生产和消费国, 也是全球最大的新能源汽车生产和消费国。根据中国汽车工业协会的数据, 2022 年中国新能源汽车整体销量为 688.7 万辆(图 1), 全球占比 35% 左右, 渗透率达 31.33%(图 2)。同比增长 93.4%。其中纯电动汽车销量达到 516.9 万辆, 同比增长 97.4%, 渗透率达 19.8%。

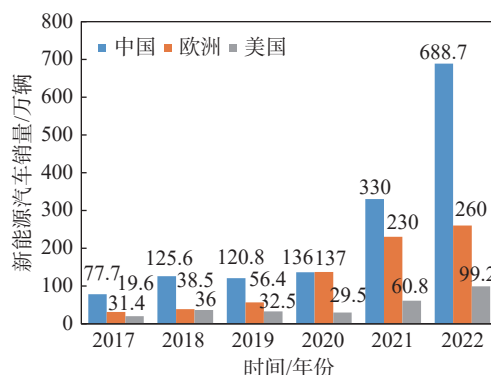


图 1 2017—2022 年中欧美市场新能源汽车销量图

Fig. 1 Sales chart of NEVs in European and US markets from 2017 to 2022

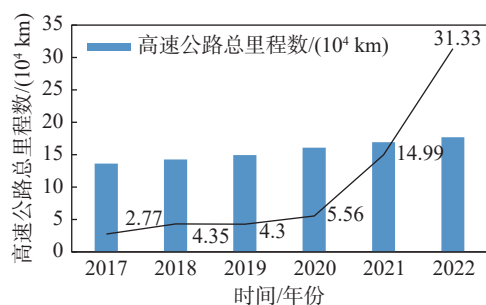


图 2 高速公路总里程数与新能源汽车市场渗透率逐年变化趋势

Fig. 2 Annual trend of changes in total highway mileage and market penetration rate of NEVs

根据国际能源署(以下简称 IEA)发布的《全球电动汽车展望 2023》^[11]。2023 年, 全球新能源汽车销量将达到 1400 万辆, 同比增长 35%, 新能源车渗透率将突破 18%, 而中国将接近 35%, 新能源汽车市场增长势头明朗, 增长动力强劲。

由图 1 可知, 新能源汽车市场渗透率近年来上涨势头明显, 在现有高速公路电气化水平以及基础设施建设水平不变的前提下, 新能源汽车渗透率应为高速公路用电负荷最大影响因素。截至 2022 年底, 全国新能源汽车保有量达到 1 310 万辆, 占汽车总量的 4.10%^[12]。其中, 纯电动汽车保有量 1 045 万辆, 占新能源汽车总量的 79.78%。自 2023 年 2 月以来, 新能源汽车渗透率一直保持在 30% 以上, 而且在 11 月份突破了 40%, 保有量也达到了 780 万辆以上^[13]。到 2025 年, 全国新能源汽车新车保有量将超过 2 500 万辆; 到 2030 年将达到 8 000 万辆^[14]。根据文献^[15]中的统计, 新能源车的平均能耗为 15 kWh/

100 km, 假设平均每辆新能源车每年行驶 1 万 km, 根据文献 [10] 中的数据, 2025 年新能源车将达到 37.5 TWh 的电能消耗, 在 2030 年将达到 120 TWh, 电能需求潜力巨大。

高速公路的全国总里程数增长与新能源汽车渗透率的大幅增加等因素势必叠加体现在其用电负荷的增长上, 并对高速公路服务区的充换电配置提出更高要求。如能利用其区域性光储资源就地消纳绿电, 将大幅推动公路交通节能减排。因此, 在交能融合背景下探讨高速公路服务区光储充一体化发展路线对于优化其能源消费结构, 探讨新型高速公路服务区建设模式, 实现公路绿色低碳发展具有重要意义。

2 公路交通的光储资源

2.1 光资源潜力分析

分布式光伏具有安全可靠、规模大小可调节、方便与建筑物等构造物相结合、可独立安装、施工维护简单、人工成本低等优点。我国太阳能资源丰富, 交通基础设施和沿线具有充足的空间资源可用于可再生能源开发利用。在高速公路交通网中, 公路占地、路肩、匝道等自有空间、服务区建筑顶棚、桥隧隔离带可为光伏发电的集成提供了空间资源, 同时桥隧照明通风设施、服务区用电设施也可为光伏发电提供充足的消纳空间, 提升光伏发电的消纳水平, 中国高速公路蕴含的光伏发电潜力如表 2 所示^[16]。由表 2 可知中国高速公路所蕴含的可供开发利用的光伏发电总潜力约为 1 022.8 TW。而且, 光伏技术进步形成转换效率不断提高、应用场景不断扩展, 中国的光伏可经济利用资源量正在大幅增加。2030 年, 预计陆上光伏装机 650 GW, 平均按利用小时 1 600 h 计算, 年发电量 1 040 TWh, 远大于前文中提到的新能源汽车耗电需求^[17]。同时, 根据文献 [18] 中的数据, 可以得出我国的公路系统基础设施年均总能耗约为 25.35 TWh, 根据高速公路占比可测算出其基础设施年均能耗约为 17.99 TWh, 通过适当储能, 高速公路在理想条件下可通过光伏实现完全的“自发自用, 余电上网”。除此之外, 由文献 [19] 和文献 [20] 可知, 火力发电的 CO₂ 排放量约为 1 000 g/kWh, 而光伏发电的 CO₂ 排放量约为 40 g/kWh, 减排量每度电可达 96%, 2021 年国内各省电网排放因子平均为 556.8 g/kWh, 因而基于以上数据, 如果能够实现

100% 光伏渗透, 公路基础设施每年 CO₂ 排放量可减少 10 016.83 t, 可节约标准煤 4 017.98 t。

表 2 全国高速公路的光伏资源与负荷

Tab. 2 Photovoltaic resources and loads of national highways

光伏利用空间	光伏发电潜力/ 公路系统年均能耗/ TWh	
	TWh	TWh
公路占地、路肩、匝道等自有空间	收费站	4.5×10^{-4}
	隧道	10.67
	沿线设备	2.28×10^{-3}
服务区建筑顶棚	23.465 8	服务区 5.36
桥隧隔离带	999.15	桥梁 9.31
总计	1 022.8	— 25.35

针对不同的应用场景, 建设交能融合系统, 需要根据应用场景的实际情况制定对应的建设策略。本文根据应用场景的新能源资源丰富程度、外部电网强弱、用电负荷大小这 3 个方面, 基于光伏发电, 给出指导性的对应策略如表 3 所示。其中, 强电网指当地有成熟的电网系统或能够以较低成本建立电网线路, 弱电网指当地没有成熟的电网系统或建立电网线路成本较高。表 4 中描述了光伏在公路领域的应用场景并列出了典型的案例, 可以看到高速公路 3 服务区及周边区域的光资源可以通过在服务区、停车场、隧道上部及出入口隔离带还有边坡等区域安装光伏板得到有效的利用。

表 3 交能融合应用场景对应策略

Tab. 3 Corresponding strategies for application scenarios of transportation and energy integration

光资源丰富程度	电网强弱	负荷大小	对应策略
光资源丰富	强电网	大负荷	自发自用, 电网调节
		小负荷	自发自用, 余电上网
	弱电网	小负荷	提升外送, 降低弃光
光资源一般	无电网	小负荷	发储协同, 发用平衡
		大负荷	电网为主, 自发自用
	强电网	小负荷	自发自用, 电网调节
		小负荷	自发自用, 电网补充
无电网	小负荷	发储协同, 发用平衡	

2.2 高速服务区的光储充综合能源利用

2.2.1 适用于交通基础设施的储能技术发展现状

根据文献 [21] 中的预测, 我国的装机规模到

表 4 光伏在公路领域可适应场景描述

Tab. 4 Description of photovoltaic adaptation scenarios in the highway field

可适应场景	已应用示例
高速公路服务区、 停车场、收费站、管理站	S14 杭长高速公路煤山服务区、 山东济南天桥高速服务区等
光伏公路	济南
隧道上部、隧道出入口中央 隔离带	湖北省鄂西北片区
路基边坡、互通圈	齐鲁交通发展集团所辖公路沿线边坡
信号灯、警示灯、标志灯、 摄像头	申嘉湖高速公路浦东段的 公路行车安全智能保障系统

2060 年预计达到 9 TWh 左右, 如果按照 20% 配置储能的规模要求, 同时考虑到储能容量本身的耗能需求, 届时储能容量总需求将达近 2 TWh。同时, 对未来的新型电力系统而言, 大数据、云平台、5G 以上通讯网络、超级计算、智能电网、超大规模储能系统, 是实现其“实时平衡、稳定运行”的 6 大支撑。而其中, 储能最具基础性^[22]。随着可再生能源的迅速发展, 加上新能源汽车等产业的需求响应, 电池储能技术得到了广泛发展与应用, 投资成本亦显著降低, 铅酸电池、锂电池(含磷酸铁锂电池)、液流电池等具有相当的规模化实用价值^[23]。而且电池储能电站的运行, 相比于其他类型的储能电站, 在运行上具有较高的灵活性, 适用于具有大量光伏发电的新型电力系统的运行。

由表 5 可见铅酸电池原材料来源丰富、安全可靠、技术成熟、成本低廉, 但在环保性、长循环寿命等方面有所欠缺。液流电池非常适合规模化、长时间、长服务寿命储能的应用场景, 但系统相对复杂, 能量密度低, 安装占地大, 且目前成本仍处于高位, 因此对于该种储能技术的选择应充分考虑储能场景实际的场地面积与使用周期。

综合而言, 锂离子电池是目前最适用于光储充一体化的电池技术, 其成本较低, 但储能配置灵活, 适用场景覆盖源荷侧, 极其多元化, 能够较好满足大规模交通基础设施储能技术的需要。

2.2.2 光储充一体化管理与调度运行控制

光储充一体化系统通常是由供电系统、充电系统、监控系统、光伏系统和储能系统组成的微电网系统。供电系统主要为一次设备和二次设备提供电源; 充电系统主要为电动汽车负荷充电; 监控系

表 5 几种电化学储能电池参数特性

Tab. 5 Parameter characteristics of some electrochemical energy storage batteries

参数指标	铅酸电池	磷酸铁锂电池	全钒液流电池
容量规模	百MWh	百MWh	百MWh
功率规模	几十MW	百MW	几十MW
能量密度/ (Wh·kg ⁻¹)	40 ~ 80	80 ~ 170	12 ~ 40
功率密度/ (W·kg ⁻¹)	150 ~ 500	1500 ~ 2500	50 ~ 100
响应时间	ms	ms	ms
循环次数/次	500 ~ 3000	2000 ~ 10000	>15000
寿命/a	5 ~ 8	10	>20
充放电效率/%	70 ~ 90	>90	75 ~ 85
投资成本/ (元·kWh ⁻¹)	800 ~ 1300	800 ~ 1200	2500 ~ 3900
优势	成本低, 可回收 含量高	效率高、能量密度 高、响应快	循环寿命高、 安全性能好
劣势	能量密度 低、寿命短	安全性较差、成本与铅酸 电池相比比较高	能量密度低、 效率低

统可实时监测、读取和备份数据; 光伏系统将太阳能转化为电能, 供充电站内负荷充电, 但是由于光伏发电本身的不确定性和波动性, 使得其需要配合储能来平衡其波动性以及夜间或出力不足时的响应; 储能系统存储能量, 在夜间电价低谷时将低价电能存入储能电池, 在白天用电高峰时刻将其送入充电站给电动汽车负荷充电。根据车辆的充电行为和光伏出力, 制定日前运行策略。

由于分布式光伏发电与风力发电都具有实时波动性、间歇性, 并不能满足稳定的用电需求, 因此需要升级现有公路交通能源系统的组织架构和运行方式, 加强对本地资源的自我管理, 从被动消纳转向主动控制, 进行公路交能系统的微电网开发, 可以将分布式光伏、用电负荷和储能系统等一次设备及其控制系统有机结合, 形成有序的局部供电微网。从而形成一个能够自我控制、保护和管理的自治系统, 基于光伏出力情况, 自发自用, 余电上网, 可以并网和孤岛运行。

3 公路交能融合分析

3.1 公路交能融合的自治模式

我国道路交通系统自身基础设施资产能源化潜力极其巨大, 从而基于交能融合提升交通系统能源

自洽率、系统碳减排前景十分广阔。能源自洽率为自洽能源系统出力与系统负荷的比值^[24]。自洽能源系统指在规划、建设和运行等过程中, 利用风、光等清洁能源对系统中能源的生产、转换、传输、分配、存储与消费等环节进行有机协调的能源产销一体化系统^[25]。如何改善我国道路交通系统的用能结构, 实现基础设施蕴含的风、光可再生清洁能源的充分利用, 为道路交通系统提供清洁、自洽的能源供给, 真正实现道路交通系统能源需求的分布式自洽供给, 已成为一种保障国家能源安全的战略选择^[18]。因此, 交通与能源融合的主要路径应从开发基于道路交通自身基础设施的风、光自然资源禀赋, 形成自洽供给的交通能源系统入手, 从而构建交通系统能源供给分布式、清洁化、可再生、近零排放的系统解决方案。

图 3 描述了交能融合的典型自洽模式。

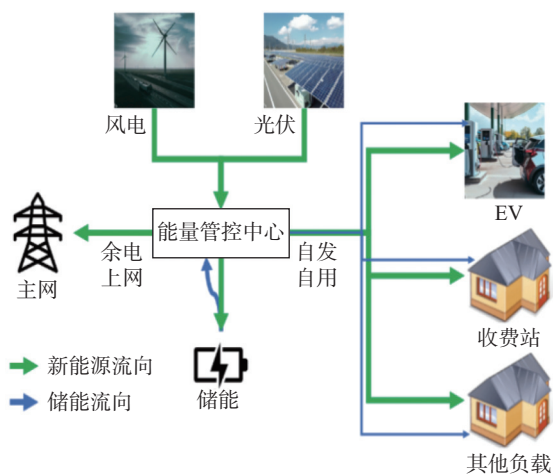


图 3 交能融合的自洽模式

Fig. 3 Self-consistent mode of transportation and energy integration

交能融合自洽模式是将多种可再生资源与交通模式的有机整合, 因地制宜, 根据不同交通模式的特征, 在交能融合自洽系统的技术构架的基础上形成合理的交通供电系统。可以看出, 交能融合的自洽模式类似于电力系统微网的自洽模式, 因而类比于微网, 根据不同交通系统的特点与用能模式, 可以将交通融合模式分为以风光能源为主体的融合模式和以风光能源为补充的融合模式。在交通基础设施方面可以利用双向公路隧道之间的间隔、公路边坡、匝道等空间资源, 在交通服务设施方面可以利用屋顶、停车棚等空间资源, 建设分布式光伏发电系统,

倡导“自发自用、就近发电、就近并网、就近使用”的原则, 通过分布式光伏发电与公路空间资源的结合, 实现交通基础设施、服务设施从消费者到生产者的转变。

3.2 交能融合自洽模式的融合工程示例

汕昆高速公路揭阳新亨至梅州畚江段及梅汕高速公路梅州程江至畚江段中“纵二线”的组成部分, 是广东省首条山岭重丘区高速公路改扩建项目。表 6 列出了梅汕高速公路沿线设施的主要耗能方式与能耗类型。项目总装机容量为 21.39 MW, 预计年平均上网电量约 22.811 13 GWh, 利用小时数为 1 066.57 h。

表 6 梅汕高速公路沿线设施能耗方式

Tab. 6 Energy consumption patterns of facilities along the Meizhou-Shanwei expressway

设施分类	耗能方式	能耗类型
服务区停车区	通风照明、雨污水处理、服务区办公设备、餐饮设备、制冷供暖系统	电力、天然气、汽油、柴油、液化气等
收费站	收费系统、监控系统、照明系统	电力、燃油、液化气
养护工区	运营管理办公设备、日常用车(养护车辆、公务车)、供电供暖系统	电力、天然气、汽油、柴油、液化气等
通信监控中心	通信设施、照明设施、机电设施	电力、天然气、汽油、柴油、液化气等
互通立交	局部照明	电力
特大桥	局部照明	电力
隧道	照明、通风、监控	电力、天然气、汽油、柴油、液化气等

综合考虑技术可行性与经济性、陆域交通设施现状位置及可接入并网点位置等因素, 拟依托高速公路所辖服务区、所辖收费站及管理中心、路域未利用地、路域边坡等区域进行光伏开发利用。针对隧道、路域光伏等远用能区域较远处通过交流电缆汇集至箱变, 升压(10 kV 或 35 kV)后通过集电线路接至就近变电站; 针对于高速公路所辖服务区、所辖收费站及管理中心等区域等近用能区域, 以逆变器输出 0.4 kV 电压等级就近接入其内部配电网系统(若需升压接入, 可考虑升压至 10 kV 接入配电网), 就地消纳, 余电上网。在近用能区内通过建设充(换)电站、智能微网和智慧管控平台, 打造源网荷储一体化系统, 提供绿色低碳的能源供应, 形成绿色能源利用生态体系, 从而综合高效地利用现有土地资源, 不仅可以提升用户用电可靠性和便利性, 还可

以降低用户的用能支出。项目建成后,每年可为电网提供清洁电能 22.811 13 GWh。按照火电煤耗每度电耗标准煤 326 g,投运后每年可节约标准煤约 7 436.43 t,每年可减少 CO₂ 排放量约 18 020.34 t、SO₂ 排放量约 130.94 t、氮氧化物排放量约 196.63 t。此外,每年还可减少大量的灰渣及烟尘排放,节约用水,并减少相应的废水排放,节能减排效益显著。

3.3 结论与讨论

“光伏+储能+充电站”一体化(简称光储充一体化)的交能融合方案是一种适合公路交能融合发展的交能融合模式,同时光储充一体化站是目前应用最广、技术最成熟的交能融合项目类型之一。高速公路本身具有相对稳定的大量基础设施负荷,同时也具有丰富的光资源,公路的光储充交能融合模式在电网以及交通系统的减排与清洁化发展上具有巨大潜力。光伏系统可以实现清洁能源的有效利用,储能系统可以存储光伏发电剩余电量,与电网协调配合,缓解电动汽车充电负荷对电网的冲击,充电站作为中间环节,有序控制能量交换。而且,文献[26]也证实了采用光伏+储能的形式能够有效地提升电网的频率稳定性。该模式能够高效利用到道路交通自身基础设施的风、光自然资源,通过分布式光伏发电与公路空间资源的结合,实现交通基础设施、服务设施从消费者到生产者的转变。

4 结论

本文针对公路交通系统的交能融合,基于对我国公路的光资源分布、适用于交通基础设施的储能技术、以及公路交能融合自洽模式的分析,提出并阐述了光储充一体化的交能融合方向,同时通过典型案例,展示了光储充一体化交能融合方案的基本系统构建。光储充一体化的交能融合方案是目前应用最广、技术最成熟的交能融合项目类型之一,它能较好地匹配现有的光储充技术,在实现交能融合的同时创造一定的经济价值,也能够良好地利用到公路的光资源,实现绿色、低碳的发展路径。未来除光资源外,应进一步探索其他绿色新能源如风能和地热等的综合交能融合方案,同时针对公路的交能融合,应扩大探索范围,建立以服务区为中心的微网系统,使得资源能够得到更充分的利用,建立智能化、数字化的交能融合方案。

通过互联的形式,或可进一步对周边地区进行辐射扩散,影响对应地区的基础供电,进一步扩大虚拟电厂的建设,开展需求侧响应、孤岛运行方案方面的研究工作。

参考文献:

- [1] 中共中央,国务院. 交通强国建设纲要 [EB/OL]. (2019-09-19) [2024-01-09]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm.
Central Committee of the Communist Party of China, The State Council. Outline for building a strong transport country [EB/OL]. (2019-09-19) [2024-01-09]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm.
- [2] 马新政. 交通与能源融合发展进入快车道 [EB/OL]. (2023-08-07) [2024-01-09]. http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2023-08/07/content_26011130.htm.
MA X Z. Transportation and energy integration development into the fast lane [EB/OL]. (2023-08-07) [2024-01-09]. http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2023-08/07/content_26011130.htm.
- [3] 姜波. 交通运输碳排放及绿色发展现状 [EB/OL]. (2023-05-31) [2024-01-09]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_23307959.
JIANG B. Carbon emission and green development of transportation [EB/OL]. (2023-05-31) [2024-01-09]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_23307959.
- [4] 中共中央,国务院. 国家综合立体交通网规划纲要 [EB/OL]. (2021-02-24) [2024-01-09]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5593440.htm.
Central Committee of the Communist Party of China, State Council. Outline of national comprehensive three-dimensional transportation network planning [EB/OL]. (2021-02-24) [2024-01-09]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5593440.htm.
- [5] 陈艳波,刘镇湘,田昊欣,等. 高速公路绿色能源系统研究综述及展望 [EB/OL]. (2024-04) [2024-04-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240402.1443.026.html>.
CHEN Y B, LIU Z X, TIAN H X, et al. A review and prospect of green energy systems for highways [EB/OL]. (2024-04) [2024-04-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240402.1443.026.html>.
- [6] 国务院. “十四五”现代综合交通运输体系发展规划 [EB/OL]. (2023-01-25) [2024-01-09]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/18/content_5669049.htm.
The State Council. The 14th five-year plan for the development of modern comprehensive transportation system [EB/OL]. (2023-01-25) [2024-01-09]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/18/content_5669049.htm.
- [7] 国务院. 国务院关于印发“十四五”节能减排综合工作方案的通知 [EB/OL]. (2023-01-24) [2024-01-09]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/24/content_5670202.htm.
The State Council. Notice of The State Council on issuing the

- "14th five-year plan" comprehensive work plan for energy conservation and emission reduction [EB/OL]. (2023-01-24) [2024-01-09]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/24/content_5670202.htm.
- [8] 李义, 刘志胜. 高速公路沿线发展分布式光伏发电项目可行性研究 [J]. 科技与创新, 2022(4): 173-176, 181. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2022.04.053.
LI Y, LIU Z H. Feasibility study on the development of distributed photovoltaic power generation projects along highways [J]. Science and technology & innovation, 2022(4): 173-176, 181. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2022.04.053.
- [9] 简丽, 杨艳刚, 李振洋. 分布式太阳能光伏并网发电在高速公路服务区的应用效果研究 [J]. 公路, 2017, 62(2): 210-213.
JIAN L, YANG Y G, LI Z Y. Study on the application effect of distributed solar photovoltaic grid-connected power generation in highway service areas [J]. Highway, 2017, 62(2): 210-213.
- [10] 廖华, 向福洲. 中国“十四五”能源需求预测与展望 [J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(2): 1-8. DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2021.7348.
LIAO H, XIANG F Z. Forecast and prospect of energy demand in China's "14th five-year" plan period [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (social sciences edition), 2021, 23(2): 1-8. DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2021.7348.
- [11] 国际能源署. 2023 年全球电动汽车展望 [R]. 巴黎: 国际能源署, 2023.
International Energy Agency. Global electric vehicle outlook 2023 [R]. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [12] 国务院总理李克强主持召开国务院常务会议 [EB/OL]. (2023-01-11) [2024-01-09]. https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content_5736281.htm.
Premier LI Keqiang presides over an executive meeting of The State Council [EB/OL]. (2023-01-11) [2024-01-09]. https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content_5736281.htm.
- [13] 百人会张永伟: 明年新能源汽车规模预计达 1300 万辆, 渗透率达 40% [EB/OL]. (2024-01-02) [2024-01-09]. <https://new.qq.com/rain/a/20240102A02DKT00>.
ZHANG Y W, Committee of 100: The scale of new energy vehicles is expected to reach 13 million next year, with a penetration rate of 40% [EB/OL]. (2024-01-02) [2024-01-09]. <https://new.qq.com/rain/a/20240102A02DKT00>.
- [14] 公路局.《加快推进公路沿线充电基础设施建设行动方案》解读 [EB/OL].(2022-08-25) [2024-01-09].https://www.mot.gov.cn/2022zhengcejid/202208/t20220825_3670514.html.
Highway Bureau. Interpretation of the action plan for accelerating the construction of charging infrastructure along highways [EB/OL]. (2022-08-25) [2024-01-09]. https://www.mot.gov.cn/2022zhengcejid/202208/t20220825_3670514.html.
- [15] 郑天雷, 王兆, 保翔. 电动汽车能量消耗率限值研究 [J]. 中国汽车, 2019(10): 57-61.
ZHENG T L, WANG Z, BAO X. Research on energy consumption limits standard of electric vehicle [J]. China auto, 2019(10): 57-61.
- [16] 索比光伏网. 我国光伏公路与铁路的发展展望 [EB/OL]. (2020-12-04) [2024-01-09]. <https://news.solarbe.com/202012/04/332809.html>.
www.solarbe.com. The development prospect of photovoltaic road and railway in China [EB/OL]. (2020-12-04) [2024-01-09]. <https://news.solarbe.com/202012/04/332809.html>.
- [17] 蔡绍宽. 双碳目标的挑战与电力结构调整趋势展望 [J]. 南方能源建设, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002.
CAI S K. Challenges and prospects for the trends of power structure adjustment under the goal of carbon peak and neutrality [J]. Southern energy construction, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002.
- [18] 贾利民, 师瑞峰, 吉莉, 等. 我国道路交通与能源融合发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 163-172. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.03.017.
JIA L M, SHI R F, JI L, et al. Road transportation and energy integration strategy in China [J]. Strategic study of CAE, 2022, 24(3): 163-172. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.03.017.
- [19] 生物质能观察. 生态环境部发布 2021 年电力二氧化碳排放因子 [EB/OL]. (2024-04-14) [2024-04-23]. https://mp.weixin.qq.com/s/?__biz=MzU4ODY0NzkyNw==&mid=2247590375&idx=1&sn=2eb37571a18b5ac4bb7169c334f06a32&chksm=fc8aba114935187ed962213d16aa33c29df2af547785532995fe395959bf69df0e67754c7fd3&scene=27 c.
Biomass Energy Observation. Ministry of Ecology and Environment releases 2021 power CO₂ emission factor [EB/OL]. (2024-04-14) [2024-04-23]. https://mp.weixin.qq.com/s/?__biz=MzU4ODY0NzkyNw==&mid=2247590375&idx=1&sn=2eb37571a18b5ac4bb7169c334f06a32&chksm=fc8aba114935187ed962213d16aa33c29df2af547785532995fe395959bf69df0e67754c7fd3&scene=27 c.
- [20] NREL. Life cycle greenhouse gas emissions from solar photovoltaics [EB/OL]. (2012-11) [2024-01-09]. <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56487.pdf>.
- [21] 蔡绍宽. 新型电力系统下的储能解决方案探讨 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(增刊 1): 17-23 DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.003.
CAI S K. Discussion on energy storage solutions under the new power system [J]. Southern energy construction, 2022, 9(Suppl.1): 17-23. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.003.
- [22] 才秀敏. 储能将成为新型电力系统中的要素 [J]. 电器工业, 2021(6): 58-59.
CAI X M. Energy storage will become an element in the new type of power system [J]. China electrical equipment industry, 2021(6): 58-59.
- [23] 杨青. 抽水蓄能与电池储能技术经济比较及建议 [J]. 电工技术, 2021(12): 35-36. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2021.12.014.
YANG Q. Comparison and suggestion of technology and economy between pumped storage and battery energy storage [J]. Electric engineering, 2021(12): 35-36. DOI: 10.19768/j.cnki.

dgjs.2021.12.014.

- [24] 苏小玲, 陈来军, 赵超凡, 等. 计及能源自洽率和共享氢储能
的电-氢-交通耦合配电网低碳经济运行 [J]. *高电压技术*, 2024,
50(6): 2424-2432. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20231381](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20231381).
SU X L, CHEN L J, ZHAO C F, et al. Low carbon economic
dispatch for electricity hydrogen transport coupling network
considering self-sufficiency and shared hydrogen storage [J].
High voltage engineering, 2024, 50(6): 2424-2432. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20231381](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20231381).
- [25] 张晓明, 李亚男. 一种交通自洽能源系统及其应用方法:
202111490605U [P]. 2021.
ZHANG X M, LI Y N. A traffic self-consistent energy system
and its application method: 202111490605 U [P]. 2021.
- [26] JAWAD A, NAIM S A, SAHA C, et al. Frequency stability
enhancement of a large-scale PV integrated grid [C]//2020 11th
International Conference on Electrical and Computer Engineering
(ICECE), Dhaka, Bangladesh, December 17-19, 2020. Dhaka:
IEEE, 2020: 290-293. DOI: [10.1109/ICECE51571.2020.9393073](https://doi.org/10.1109/ICECE51571.2020.9393073).

段德萱

1996-, 男, 硕士, 主要从事核电和电力系统方面工作(e-mail)
dxduan@cpecc.net。

黄晶晶

1985-, 女, 高级工程师, 博士, 主要从事氢能和电力方面工作(e-mail)
jjhuang@cpecc.net。

张炳成

1966-, 男, 正高级工程师, 主要从事热能动力以及电力相关工
作(e-mail)bczhang@eppei.com。

叶小盛

1983-, 男, 高级工程师, 主要从事电力、道路与桥梁工程方面工
作(e-mail)g8328@gedi.com.cn。

徐展

1987-, 男, 高级工程师, 主要从事能源电力规划方面工作(e-mail)
46406974@qq.com。

作者简介:



张力

张力(第一作者)

1966-, 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事电
力系统规划设计相关工作(e-mail)
lizhang@cpecc.net。

刘海洋(通信作者)

1993-, 男, 工程师, 博士, 主要从事电力系统方面工作(e-mail)
hyliu@cpecc.net。

项目简介:

项目名称 “空港及高速服务区低碳自洽能源体系与关键技术研发”
(DG3-A02-2022)

承担单位 中国电力工程顾问集团有限公司

项目概述 项目主要对交通枢纽节点关键共性技术、交能融合关键技
术在典型交通枢纽的应用以及未来新型交通枢纽节点进行研究。

主要创新点 (1)借深度解析双碳政策下对于交通行业的要求, 确定
对应的交通运输行业实现双碳目标的节能运行要求; (2)考虑使用地
热作为一种交通枢纽零碳供热方案; (3)通过收集现有交通枢纽运行
数据, 对交通枢纽开展多维度评估, 以此构建未来新型交通枢纽节点
模式。

《南方能源建设》19位编委入选2024年“全球前2%顶尖科学家榜单”

2024年9月16日, 美国斯坦福大学和爱思唯尔(Elsevier)发布了2024年“全球前2%顶尖科学家榜单”(聚焦2023年度的学术成就)。《南方能源建设》顾问编委会委员王成山院士、李立涅院士、李焯芬院士、周成虎院士、程时杰院士, 编委会委员 Guangya Yang 教授、Ram Rajagopal 教授, 青年编委会委员王盼宝副教授、汤雨教授、许传博讲师、李奇教授、杨应举副教授、肖迁副教授、周渠教授、郑伟业副教授、钟伟锋副教授、侯慧副教授、桂银刚副教授、靳小龙副教授入选2024年“全球前2%顶尖科学家榜单”。

《南方能源建设》编辑部