

“光伏+AI”自适应微网智能充电系统研究

——以云南边境充电系统为例

郭祖意 普兴强 唐志

(云南机电职业技术学院 绿色能源学院, 云南 昆明 650203)

摘要: 云南边境区域光伏储备充足, 但山地县域配网建设底子薄弱, 市面普通充电设备缺少一体化智能协同调控能力, 场站弃光比例普遍高于 15%。2024 年下半年课题团队前往红河、德宏、普洱三地, 走访调研 78 座光储充电站点, 实地摸排后总结四大突出问题: 光伏储能调度脱节、大功率充电频繁冲击配网、线下运维人力开销大、设备输出功率无法动态调节。围绕调研痛点, 团队搭建终端感知—边缘计算—云端管控三层协同体系, 自主研发三项核心技术: 轻量化 LSTM 时序网络可提前预判设备故障, 识别精准度 92%; 融合 GRU 网络与 Q-learning 算法动态分配充电功率, 场站设备平均利用率从 7% 提升至 71%; FPGA 配套固态切换开关实现并网、孤岛、V2G 馈电三种工况 0.8 毫秒无缝切换, 场站弃光率压缩至 3% 以内。多站点实测数据证明, 这套系统适配云南高海拔、供电容量不足的边境山地场景, 能为国内外同类型弱电网区域光储配套建设提供可行落地方案。

关键词: 分布式光伏; 微网控制; V2G; 边境充电; 弱电网

中图分类号: TM615 **文献标识码:** A **文章编号:** 3134-9986(2026)04-0004-03

一、绪论

(一) 研究背景

2024 年全国光伏装机突破 6 亿千瓦, 新能源汽车保有量超 3000 万辆, 但充放电与光伏出力之间存在明显时间错配。多数充电桩采用简单并网方式运行, 既不能根据光伏发电量调整输出, 也无法预判负荷波动, 光伏闲置和电网冲击普遍存在。

云南省清洁能源发电占比逾 90%, 红河、德宏等边境地区光照充沛, 中老铁路通车后跨境电动货车数量持续增加。但边境乡镇电网处于输电末端, 变压器容量小、线路阻抗大, 几台快充同时工作就容易跳闸。课题组 2024 年 8 月在河口口岸实测, 三台 120 千瓦桩同时启动后电压从 380 伏跌落至 340 伏以下, 谐波超标触发保护。此外, 通用光储设备以城市强电网为设计前提, 既没有弱电网适配能力, 也不具备孤岛运行功能, 电网一停充电全瘫。云南本地一些小企业虽然组装光储充设备, 但缺少智能调度, 光伏发了电要么上网要么浪费。

(二) 国内外进展

海外相关研究多聚焦欧美完善城市电网, V2G 技术仅服务居民小区, 边境山地供电薄弱场景暂无成熟方案; 东南亚各国新能源车辆尚处于起步阶段, 充电配套几乎一片空白。国内同类项目大多落地城区产业园, 针对云、贵、川高海拔边境县域的研究十分稀缺, 现有设备依靠机械继电器完成模式切换, 响应耗时动辄数百毫秒, 故障仅能事后报警, 无法提前预判。

(三) 研究内容与创新

主要工作: 其一, 赴边境充电场站开展实地走访, 梳理行业现存实际痛点; 其二, 搭建三层联动能源管控整体架构; 其三, 自研三套核心技术并落地场站完成实测校验; 其四, 分层划定目标市场, 设计多元化运营收益路径; 其五, 梳理项目各类潜在隐患, 配套对应化解方案。

创新之处: 其一, 打造专门适配云南边境薄弱配网的一体化光储充电成套装备; 其二, 将 GRU 与强化学习算法部署在场站本地边缘设备, 无需依托云端算力实时调度; 其三, 采用固态切换元件实现 0.8 毫秒工况切换, 支持单台车辆 30 千瓦反向输电; 其四, 依托职校跨专业研发队伍, 搭建硬件售卖、平台订阅、能源分红、技术服务四类营收渠道。

二、痛点调研: 基于 78 处站点的实地考察

2024 年 7 月至次年 1 月, 课题小组前往昆明、红河、德宏沿线高速站点、口岸货运场地及边境乡镇, 合计调研 78 个充电点位, 结合设备现场检测、运维人员深度交流、车主问卷采集等多种调研手段, 总结共性问题。

(一) 光伏与充电割裂

磨憨口岸一处物流园区布设 400 千瓦光伏组件, 正午时段每小时发电量突破 300 度, 过境货运车辆此时数量偏少, 多余电能只能以 0.3 元以内的低价并网; 傍晚车流迎来高峰, 光伏发电量大幅衰减, 场站又要高价采购市电储能设备仅按固定时段启停充放电, 不会随光照、车流灵活调节, 当地近四成场站绿电自用比例

作者简介: 郭祖意, 专科在读, 研究方向为绿色能源、电气工程; 普兴强, 专科在读, 研究方向为绿色能源、电气工程; 唐志, 专科在读, 研究方向为绿色能源、电气工程。

本刊网址: <https://www.csepress.org/>

不足六成。

（二）电网承载不足

边境配网变压器多介于200千至400千伏安，线路阻抗高。瑞丽畹町口岸四台快充同时启用即触发电压骤降和谐波超标，保护跳闸。且设备无孤岛功能，2024年11月磨憨线路检修停电6小时期间，所有充电桩瘫痪，冷链车货物面临变质风险。

（三）运维成本高

站点沿国道分散，间距几十到上百公里。按每月巡检一次计算，一名运维跑11个站需五天。运行超三年的充电模块故障率超25%，偏远站点故障后停机两天以上常见。人工差旅维修占运营总支出三成以上。

（四）分配固化，收益低下

无预判能力，高峰满负荷运转，排队超40分钟；低谷和夜间设备闲置。调研站点平均利用率仅6%至7%，仅靠充电服务费回本周期超过六年。

此外，边境还存在三项特殊需求：跨境车辆偶有反向送电需求；进出口企业需要绿电溯源和碳核算证明；设备须耐受强紫外线和雨季高湿环境。

三、系统架构

系统分三层：终端感知、边缘决策、云端管控。覆盖7千瓦慢充、120千瓦快充、480千瓦超充三款硬件。

（一）感知层

光伏板、电池、充电桩、电网接入点部署霍尔传感器、PT100温度探头、ADE9000计量芯片，配套电磁屏蔽和滤波电路。毫秒级采集电压、电流、辐照度、储能SOC、负荷数据。

（二）决策层

场站配备边缘计算盒，运行精简LSTM和GRU模型。本地完成负荷预测、故障判断、功率分配、模式切换，不依赖云端。IGBT驱动和FPGA逻辑板自研，内置600安固态开关。

（三）管控层

云平台提供可视化大屏、远程启停调参、故障自动派单、碳核算、设备升级。分级权限管理，自动生成运营报表。

四、核心技术原理与实测数据

（一）LSTM故障预警

将设备连续一分钟内电压、电流、温度时序数据导入LSTM网络运算，输出部件老化概率与故障风险系数。系统设置三重判定标准，温度超限、电流波形失真、故障置信系数高于0.7任一条件达成，本地立刻声光示警并向后台推送维修工单。实测数据：昆明、凭祥两座站点连续半年投运，现场实际故障21起，系统

提前预判23次，识别精准度91.7%，其中两台散热风机老化故障提前三天预警，规避停机损失。站点巡检频次由每月一轮调整为季度一轮，人工运维开支缩减67%；设备稳定运行时长可达八千小时，一百二十小时不间断拷机测试数据无偏移。

（二）GRU+Q-learning调度

GRU预测未来15、30、60分钟光伏出力和充电负荷，输入历史光照、电价、季节、车流。Q-learning同时优化等待时长、弃光率、电网波动、电能质量四个目标，每秒更新功率分配方案，联动无功补偿。

实测数据：昆明盘龙站改造后利用率从7%升至71%，高峰排队时长由40分钟缩至25分钟。功率因数从0.82提至0.96，无功损耗降60%。晴天午间光伏余电全部储存或就地消纳。

（三）V2G固态微网切换

直流母线连接光伏、电池、桩、车。MOSFET固态开关由FPGA控制，并网、孤岛、馈电三模式切换耗时0.8毫秒。区间二型模糊逻辑根据光照、电价、SOC自主决策充放电方向和功率，符合GB/T27930协议，单车最大反送30千瓦。

边境效果：瑞丽模拟电网断电，系统2毫秒内切孤岛，由储能和一辆反送电的重卡持续为货场供电近2小时。弃光率由16.2%压至2.8%，谷电峰用收益增加，可参与电网调峰获取补贴。

（四）功能总成

六项打包：毫秒采集抗干扰、AI预判动态调功、故障预警自动派单、孤岛+V2G应急、云平台统一报表、分功率型号适配不同场景。

五、市场与商业模式

（一）三级市场

本土市场：云南60%县域属弱电网，25个边境县需求最急迫。“高速+光伏”规划82个项目，光储充投资20亿至30亿元，三年边境细分市场预估超60亿元。

西南市场：川西、黔西、桂西地形气候相似，三至五年整体市场规模可破300亿元，系统可直接复制。

东盟市场：老挝、缅甸、柬埔寨电网弱、日照足，新能源车开始融入，依托中老铁路和中缅走廊，五至十年市场超百亿美元。

（二）差异优势

相较头部品牌通用产品，独有弱电网孤岛切换、边缘AI、V2G套利；相较本地组装厂，拥有自主算法和微网硬件。依托院校资源，成套设备定价低15%至20%，配套碳核算和跨境能源服务。

（三）收入来源

硬件销售占七成：7千瓦慢充800元/台，120千瓦快

充3万元/台，中小场站成套18万至25万元，EPC另计。

SaaS订阅占两成：按年分基础、高级、定制三档，边际成本低、现金流稳定。

运营分成占5%：与场地方共建，分享峰谷套利、V2G补贴收益。

技术服务占5%：存量改造、代运维、方案咨询、算法授权，毛利率高。

（四）渠道

对接省交投和地州能源国企推示范站；与本地电气厂ODM合作生产；随中资出海企业进入东盟；校内实训基地作展示窗口。

六、运营流程与风险管控

（一）标准流程

前期实地测电网、日照、车流定方案；ODM生产配送，持证施工并网；云平台全天监控，省内24小时、西南48小时到场维修；按月输出运营报表，按年迭代预测模型。

（二）风险应对

技术迭代：季度算法更新，专利和软著构筑壁垒，多站点长周期实测验证。

市场竞争：不打价格战，突出弱电网和V2G专属优势，用实测数据说话。

跨境风险：与已出海的中资企业合作，设当地代理，买出口信用保险。

资金周转：国企项目分期付款，SaaS年付优惠，控制重资产投入节奏。

七、综合效益

碳排放：弃光率由16%以上压至3%以内，一座中型口岸站年减碳约480吨。

电网：无需大规模改造线路即可承载大功率充电，电网故障时持续保供。

跨境物流：电动重卡年省燃料费约1.2万元，车队日有效里程延长8%至12%。

人才培养：已培训120余名本地学生和在职人员，形成可复制的校企实训模式。

应急保供：光伏+储能+车辆构成三重备用电源，极端情况下保关键负荷6小时以上。

八、结束语

78处实地调研加两个站点半年实测，验证了这套系统的有效性：LSTM预判准确率92%，GRU调度将利用率从个位数拉至71%，固态切换0.8毫秒，弃光率压到3%以内。证明了在弱电网边境环境下，AI调度加速切网的技术路线可行。该项目既解决了边境实际问题，也服务了“双碳”目标和云南辐射东南亚战略。希望这套系统从云南起步，延伸到川西、黔西、桂西，再沿中老、中缅通道走向东盟。

参考文献：

[1] 国家能源局.2024年全国电力工业统计数据[R].北京, 2025.
[2] 云南省能源局.云南省新能源发展规划(2024—2025年)[R].昆明, 2024.
[3] 刘振亚, 李明.光储充一体化微网系统关键技术研究[J].电力系统自动化, 2023, 47(8): 112-120.

Research on a "Photovoltaic + AI" Adaptive Microgrid Intelligent Charging System
——A Case Study of Charging Systems in Yunnan Border Areas

Guo Zuyi, Pu Xingqiang, Tang Zhi

(School of Green Energy, Yunnan Vocational College of Mechanical and Electrical Technology, Kunming, Yunnan 650203)

Abstract: Yunnan's border areas possess abundant photovoltaic resources, but the distribution network infrastructure in mountainous counties is weak. Conventional charging equipment on the market lacks integrated intelligent collaborative regulation and control capabilities, and the photovoltaic curtailment rate at stations generally exceeds 15%. In the second half of 2024, the research team conducted field investigations at 78 photovoltaic-storage-charging stations in Honghe, Dehong, and Pu'er. After on-site assessments, four prominent problems were identified: disconnects between photovoltaic and energy storage dispatching, frequent impacts of high-power charging on distribution networks, high labor costs for offline operation and maintenance, and the inability to dynamically regulate equipment output power. To address these issues, the team established a three-layer collaborative system comprising terminal sensing, edge computing, and cloud-based management and control, and independently developed three core technologies. A lightweight LSTM time-series network can predict equipment failures in advance, with an identification accuracy of 92%; a GRU network integrated with the Q-learning algorithm dynamically allocates charging power, increasing the average equipment utilization rate at stations from 7% to 71%; and an FPGA-supported solid-state transfer switch enables seamless switching among grid-connected, islanded, and V2G feed-in modes within 0.8 ms, reducing the photovoltaic curtailment rate at stations to below 3%. Multi-site test data demonstrate that this system is suitable for border mountainous areas in Yunnan characterized by high altitudes and insufficient power supply capacity, and can provide a feasible implementation solution for photovoltaic-storage supporting construction in similar weak-grid regions at home and abroad.

Keywords: distributed photovoltaics; microgrid control; V2G; border charging; weak power grid