

公路沿线分布式光伏发电并网关键技术探讨

罗小杰

广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司，广东广州，510080；

摘要：随着全球能源结构转型加速，公路交通领域作为能源消耗关键部分，其绿色低碳发展愈发受关注。公路沿线跟隧道区域有不少能利用的空间，像边坡、服务区、隧道口这类，为分布式光伏发电提供了潜在场所，但怎样把这类分散、间歇性光伏电力安全、稳定、高效接入公路既有供配电系统，且符合隧道照明等关键负荷高可靠性的需求，是当下遇到的主要技术难题。本研究着重于公路沿线跟隧道场景，针对它太阳能资源评估、光伏系统跟公路照明及供配电系统协同并网的关键技术展开探讨。研究发现，构建契合公路线性特点的分布式光伏资源评估模型，能更精确地规划光伏布局；采用有低压穿越跟孤岛检测功能的智能并网逆变器，结合储能系统做功率平滑和应急支撑，能有效提高并网稳定性以及电能质量；专门针对隧道场景，给出光伏跟市电、储能多源协同的智能微电网供电方案，保证照明系统在光伏波动或者故障之际的无缝切换以及持续供电。本研究意义是给公路交通基础设施和新能源深度融合提供具体技术路径，能降低公路运营碳排放和用电成本，提高能源自给本领和供电可靠程度，对推进绿色公路跟智慧交通建设有实际参考作用。

关键词：公路；隧道；太阳能；照明；供配电

DOI：10.64216/3080-1486.25.09.080

引言

在全球能源转型和“双碳”目标驱动下，交通领域作为能源消耗及碳排放的重要源头，它绿色低碳发展成了紧迫课题。公路系统有着许多路域空间资源，像服务区、收费站、边坡还有隧道隔离带这类的，这些呈线性分布的闲置土地跟构筑物表面给光伏发电提供了天然载体。把分布式光伏发电系统跟公路基础设施结合起来，能实现土地跟空间的复合高效利用，更可直接给沿线设施（像照明、监控、充电桩）供应清洁电力，切实减少公路运营对传统电网的依靠以及碳排放，是推进交通能源结构清洁化、实现交通自治能源供给的战略路径。

该举措有多重战略价值，它可以把公路从单纯能源消费者变成“产消者”，提升能源自给率与应急保障能力，尤其在偏远地区，分布式光伏能大幅增强供电可靠性。同时，光伏发电本地消纳降低了远距离输电损耗，平缓公路用电负荷峰谷差，利于区域电网稳定运作。发展公路光伏是交通与能源两大基础设施网络深度融合典范，对构建绿色智慧交通体系、培育新经济增长点有重要意义。

1 公路沿线分布式光伏资源评估与系统规划

1.1 适应线性特征的太阳能资源评估方法

公路沿线线性特征决定其太阳能资源评估要突破

传统点状或面状评估局限，传统评估模型常常基于开阔平坦区域，公路走廊常顺着地形蜿蜒，还伴有边坡、隧道、桥梁等构筑物呢，致使光照条件在空间中展现明显动态变化以及局部遮挡。因此，搭建适配线性特征的评估模型，需把公路走向、沿线地形地貌（像山体、植被遮挡）还有隧道出入口特殊光照条件当作核心输入参数，模型得能模拟太阳轨迹在一天还有一年里不同时段对线性路段的投射情形，量化分析因公路方向和太阳方位角不同造成的辐照度改变，且精准评测隧道口附近因山体遮挡形成的“阴影区”对光伏阵列实际接收辐射量的影响。

这一评估模型的构建，给后续光伏系统科学规划打了基础，通过地理信息系统（GIS）平台整合数字高程模型（DEM）、高分辨率卫星影像以及实测气象数据，能对公路全线搞网格化或者分段化的太阳能资源精细化模拟，模型输出不光包含理论年总辐射量，更重要的是能给出有时序特性的辐照度曲线，进而揭示资源分布的时空不均衡性。这类动态评估结果，可直接指导光伏阵列于公路沿线（像服务区、收费站、边坡、声屏障以及隧道口过渡区）的优化选址和容量配置，让所规划光伏系统发电本领和公路沿线实际负荷需求于时间与空间上达成更精确匹配，提高资源利用效率跟投资经济性。

1.2 光伏系统与公路供配电负荷的协同规划策略

依据精细太阳能资源评估成果，光伏系统跟公路供配电负荷协同规划成提升系统效能和经济性的关键。规划要着重处理光伏发电间歇性跟公路负荷时空分布特性的匹配问题，公路沿线负荷包含服务区、收费站、隧道照明、监控以及通信设备用电等，其中隧道照明负荷有连续、稳定且可靠性要求特高的特性，服务区负荷有明显昼夜和季节性波动。协同规划策略首先要依照动态评估得出的时序辐照数据，预估各潜在安装地点（像边坡、声屏障、服务区屋顶、隧道口过渡区）的光伏出力曲线，在此基础上，把光伏出力曲线跟对应供电区段内各类负荷的历史还有预测用电曲线做对比分析，识别发电跟用电时间上的匹配程度和缺口。

光伏容量配置不是求理论最大装机，是以达成特定供能目标下经济最优化作导向。例如，针对隧道这类关键负荷，光伏容量配置要考虑日照足时尽量覆盖基础照明能耗，还预留跟储能系统协同的接口，安装位置优化要兼顾发电效率、工程可行性以及对公路运营安全的影响。把光伏组件整合在公路边坡、声屏障或者中央隔离带处，能利用闲置土地资源，但要精准评估它局部阴影遮挡效应和维护可达性，借助构建以“净负荷波动最小化”、“自给率最大化”或“全生命周期成本最低”为目标的优化模型，能算出不同情形下光伏系统最佳安装地方、容量还有技术方案，进而构成跟公路供配电网深度融合的分布式能源供给体系。

2 分布式光伏并网关键设备与技术

2.1 智能并网逆变器与电能质量控制技术

智能并网逆变器是公路沿线分布式光伏系统实现高效、安全并网的关键设备，它不光承担直流电变交流电的转换任务，还集成多项保障电网稳定运行的关键功能。拥有低压穿越能力的逆变器可在电网电压出现短时

跌落之际，不离开电网且持续给电网供应一定无功功率，支撑电网电压恢复，这对保障公路沿线特别是隧道等重要负荷供电连续性十分关键。孤岛保护功能可精准检测电网失压状况，且在规定时间把光伏系统和电网断开，避免形成非计划的孤岛运行状态，防止给电网设备及维修人员带来安全隐患。

电能质量是并网系统得严格把控的指标。智能并网逆变器采用先进脉宽调制技术与闭环控制策略，可以有效抑制并网电流谐波，保证输出电流波形符合电网要求。同时，它有的快速无功功率调节本领，能动态补偿线路里无功功率波动，稳定并网点电压，降低对公路周边其他敏感电气装置的干扰。这些技术综合运用，让光伏发电系统不再成为电网的“累赘”，而是能主动参与电网调节、提高局部供电可靠性和电能质量的“友好型”电源。

2.2 储能系统配置与功率平滑控制策略

储能系统是处理公路沿线光伏发电间歇性跟波动性、提高并网可靠性的关键部分，它配置要综合考量公路沿线负荷特性、光伏出力曲线以及电网接入要求，针对功率平滑，储能系统靠着实时监测光伏出力跟负荷需求，采用基于模型预估控制或者自适应滤波的算法，快速吸收或释放功率，能滤掉秒级到分钟级的功率波动，让并网功率曲线变得更平滑稳定，符合电网对友好型电源调度需求。在应急支撑方面，电网故障或光伏出力骤降时，储能系统能切换成独立运行模式，给公路沿线关键负荷，特别是隧道照明、监控跟通信设备，给予不停歇的应急电力保障，保证公路运营安全。

储能的配置方案需进行多目标优化，核心参数包括系统功率、容量、类型及控制策略。以下表格对比了适用于公路场景的典型储能技术特性。

储能类型	功率密度	能量密度	响应时间	循环寿命	典型应用场景
锂离子电池	高	中高	毫秒级	3000-6000 次	高频次功率平滑、短时备用
铅炭电池	中	中	秒级	2000-3000 次	日内能量转移、备用电源
超级电容	极高	低	毫秒级	>50 万次	瞬时功率支撑、频率调节
飞轮储能	高	低	毫秒级	>10 万次	短时高频功率补偿

数据来源：中国电力科学研究院《储能技术发展白皮书（2023 年）》，中关村储能产业技术联盟《2023 年储能产业研究白皮书》

实际应用中，常采用混合储能架构兼顾功率型和能量型需求。例如，用“超级电容 + 锂电”的组合，超级电容应对光伏云层遮挡引发的秒级功率突变，锂电池负责分钟级以上能量吞吐以及较长时间应急供电；控制策略上，要设计分层协调控制系统，上层依据光伏预测跟负荷计划来定储能调度指令，下层执行单元达成各储能单元精准功率分配及状态管理，进而在平抑波动跟提

供支撑当中获取最优平衡。

3 面向隧道照明的多源协同智能微电网方案

3.1 隧道照明供电可靠性需求与挑战

隧道照明成公路安全运营关键保障，它供电系统对可靠性有很高要求，照明中断影响行车安全，也会引发严重交通事故。传统隧道照明一般依靠市电电网，虽相

对稳定，但于偏远山区或电网薄弱路段，有线路长、故障点多、电压波动大这类风险。尝试引入分布式光伏作补充或部分替代电源时，就面临一系列挑战的情况，光伏发电有明显间歇性和波动性，受昼夜、天气、季节以及公路沿线地形地物遮挡的影响，输出功率很不稳定，这种不稳定和隧道照明负荷要持续、稳定供电的特性有根本矛盾。要是把光伏直接连到原有供电系统里，会致使照明显度频繁起伏乃至忽然灭掉，满足不了“不间断、高质量”供电需要。此外，光伏发电和照明负荷在时间上不完全契合，像夜间没光照的时候就是隧道照明需求高峰，单的光伏系统没法独自撑全时段供电。因此，怎样在充分运用光伏清洁能源之际，保证隧道照明供电绝对可靠跟稳定，是得解决的关键问题。

传统供电方式接入光伏之际，它原本的保护跟控制策略或许不再适用，光伏接入改变系统短路电流水平跟方向，或许影响原本继电保护的灵敏程度与选择特性，致使故障时误动作或者拒动作，同时，光伏逆变器生出的谐波也会影响照明灯具(特别是 LED 灯)性能跟寿命，引发电能质量方面问题。仅“光伏 + 市电”的简易并联方式，两者切换时容易出现电压暂降或者短时中断，实现不了无缝衔接，这对要求毫秒级持续供电的隧道照明情形来说是无法接受的。这些技术问题共同作用下，在满足高可靠性要求前提下，把波动性光伏安稳、高效、智能地放进隧道供电体系变得特别复杂。

3.2 光伏-市电-储能多源协同控制与无缝切换技术

为应对上述挑战，本文给出一种面向隧道照明的光伏 - 市电 - 储能多源协同智能微电网架构，这架构把保障照明供电连续性和电能质量当作根本目标，关键是打造一个整合了分布式光伏阵列、双向储能系统(像磷酸铁锂电池)、智能并网/离网逆变器、静态切换开关(STS)还有中央能量管理系统的本地供电网络。系统设计依照“源 - 储 - 荷”协调准则，光伏当作主要发电单元，储能系统作为功率缓冲跟能量时移的关键部分，市电作可靠背景支撑及后备电源，中央能量管理系统依据实时监测的光伏出力、储能荷电状态、照明负荷需求以及市电质量，靠预设的优化算法动态决定系统运行模式，实现三种电源间最优功率分配以及平滑切换。

协同控制策略关键在于保证无缝切换。在正常并网

模式当中，系统优先吸纳光伏发电，盈余能量存进储能或者馈进电网，储能同时平抑光伏波动，检测到市电异常或者计划离网时，控制系统会提前调节储能输出，毫秒级完成并网到离网模式转换，储能跟光伏一起支撑负荷，达成照明供电零中断。反之，当市电恢复时，系统会同步微电网跟市电电压、频率还有相位，借助静态切换开关达成无冲击并网，对着光伏突然下降或者夜里无光的情形，储能系统能依据负荷预测预先储备充足能量，保证独立供电时间长度，整个控制过程着重预测跟实时的结合，且有孤岛检测、黑启动等多重保护功能，最后形成一个能适应公路隧道特殊环境、抵御多重扰动的高可靠性智能供电解决办法。

4 结语

本文围绕公路沿线跟隧道场景，探讨分布式光伏发电并网关键技术路径，构建适配线性特征的太阳能资源评估模型，实现光伏系统科学规划；用有低压穿越跟孤岛保护功能的智能逆变器，联合储能系统做功率平滑和应急支撑，大幅提高了并网稳定性跟电能质量；专门针对隧道照明的高可靠要求，给出光伏 - 市电 - 储能多源协同智能微电网方案，实现了不同电源间无缝切换及持续供电。本研究给公路交通跟清洁能源深度融合提供了可行技术办法，能推动公路系统朝绿色、低碳、智慧方向转变，提升能源自给能力与运营可靠性，拥有重要工程应用跟推广价值。

参考文献

- [1] 李兆博,蔡丹路,周峰,等.浙江省分布式光伏空间分布驱动因素研究[J].测绘科学,2024,49(09):92-103.
- [2] 陆旭东,江山,张晓峰,等.分布式光伏-公路交通多场景融合发展潜力研究与展望[J].公路,2024,69(06):204-211.
- [3] 王冠,陆旭东,张越,等.山东临滕高速公路光伏隧道应用技术研究[J].公路,2024,69(01):250-254.
- [4] 艾舜,孟海龙.四川高速公路范围内分布式光伏发电潜力浅析[J].交通节能与环保,2023,19(04):95-99.
- [5] 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,(04):173-176+181.