

# 基于分布式光伏的高速公路隧道群独立供电系统构建与可靠性研究

黄照乾 苏世杰

云南交通工程质量检测有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i4.8854

**[摘要]** 研究针对我国偏远山区高速公路隧道群供电可靠性不足的现状, 提出一种基于分布式光伏技术的独立供电方式。以光-电-储能-智能控制三位一体架构为基础, 通过精细化容量配置和多源协同控制策略, 为隧道关键负荷提供高可靠性支撑。工程实践证明, 该系统能够很好地匹配隧道的电气特性, 在不依靠外部电网的情况下, 保证了各隧道机电设施的安全稳定运行。通过可靠性建模和实际测试结果表明, 该系统的供电连续性明显优于传统市电加柴油的供电方式。

**[关键词]** 分布式光伏; 隧道供电; 独立系统; 供电可靠性

**[中图分类号]** T-19

## Research on the Construction and Reliability of an Independent Power Supply System for Highway Tunnel Clusters Based on Distributed Photovoltaics

Huang Zhaoqian Su Shijie

Yunnan Transportation Engineering Quality Inspection Co., Ltd.

**[Abstract]** Addressing the insufficient power supply reliability in highway tunnel clusters located in remote mountainous regions of China, this study proposes an independent power supply solution utilizing distributed photovoltaic technology. Built upon a tripartite architecture integrating photovoltaics, power generation, energy storage, and intelligent control, the system provides highly reliable power support for critical tunnel loads through optimized capacity allocation and multi-source coordinated control strategies. Engineering practice has demonstrated that the system effectively matches the electrical characteristics of tunnels, ensuring the safe and stable operation of electromechanical facilities without reliance on external power grids. Reliability modeling and practical test results confirm that the system's power supply continuity significantly surpasses that of traditional grid-plus-diesel power supply methods.

**[Key words]** Distributed photovoltaics; Tunnel power supply; Stand-alone system; Power supply reliability

### 引言

作为交通基础设施重要节点的高速公路隧道群, 其持续供电直接影响行车安全和应急响应能力。在偏远山区和电网薄弱地区, 依靠电网供电的传统供电方式面临着系统风险, 如线路长、故障率高、维修难等。频发的极端天气进一步加剧了供电中断的可能, 迫切需要建立一套独立的、能自洽的供电系统。分布式光伏发电因其资源丰富、可模块化配置和低碳环保等特点, 为其提供了一种可行的技术途径<sup>[1]</sup>。文章重点研究该场景下供配电系统的工程化构建和可靠性定量验证, 以期形成具有推广价值的技术范例。

### 1 隧道群用电需求特征与供电痛点分析

#### 1.1 高速公路隧道群典型负荷构成与运行特性

高速公路隧道群用电负荷具有较强的集中性和时间规律性。核心负荷包括照明设施、通风设施、监控与通信设施及消防设施等。其中, 通风和照明设施占总负荷的80%以上, 并表现出明显的日、季变化特征。基础照明系统24小时不间断运转, 同时根据车流量、能见度和CO浓度动态启动和关闭风机。监测和通信设施虽然功耗小, 但是对电源的连续性和稳定性有很高的要求, 一般允许中断时间在0.5秒以内。这种多层次差异化的负荷结构对供电系统的容量分配、响应速度和冗余设计提出了复杂的技术需求, 单一供电方式很难兼顾经济性和可靠性。

## 1.2 现有供电模式在山区偏远路段的局限性与故障风险

目前我国高速公路隧道普遍采用双回线供电方式,配以柴油发电机作为备用电源。但在复杂地形地区,高压输电线路建设成本较高,且容易遭受滑坡、覆冰和雷击等自然灾害的影响,年平均失效次数超过1.7次。柴油发电机虽然可以作为应急电源,但其启动时间长(一般>10秒),燃油储量少,维修周期短,污染环境。更重要的是,在主-机切换过程中,瞬间断电仍然可能导致敏感电子设备的重新启动和数据丢失。另外,远距离输电造成的网损也不容忽视,有些隧道的终端电压偏差超出了规范要求<sup>[2]</sup>。同时,高昂的电费对于公路运营单位来说确实是不小的负担,尤其对于通行车辆较少的路段。这些内在缺陷使已有模式在保障隧道群全时域高可靠供电能力上存在结构性缺陷,亟需引入本地化、清洁化的新型供电方案。

## 2 分布式光伏系统与隧道供电场景适配性论证

### 2.1 高速公路沿线光照资源与可用空间匹配度

高速公路线形走廊是实现分布式光伏发电的唯一空间载体。隧道进出口仰坡、服务区屋顶、边坡护面及隔音屏障顶部均可作为光伏阵列安装面。以一条典型的双向4车道高速公路为例,每公里边坡的有效利用面积超过3500平方米。考虑到我国中东部和西南地区年平均太阳总辐射强度在1250~1650千瓦/平方米,理论上年发电量可达42万千瓦/公里。隧道群自身负载密度约为850千瓦/公里/公里,经计算,仅利用边坡和洞口处就能满足70%以上的基础负荷需求。光伏发电日的特征与白天加强照明和通风的高峰期高度重合,自然具有“削峰填谷”的作用。基于分布式电源优化的分布式电源优化方法,通过对分布式电源的精细化选址和倾角优化,进一步提高系统的能效自洽率,大幅降低对电网的依赖程度。

### 2.2 光伏储能技术成熟度与工程可实施性

目前晶硅电池的转换效率已经稳定在22.5%以上,而N型TOPCon和HJT的衰减率更是达到了第一年的1.0%,之后的每年下降了0.45%。锂离子电池的能量密度超过180瓦时/公斤,循环寿命超过6000次,电耗成本低于0.35元。功率电子变换器的转换效率一般在98.5%以上,并且能够实现毫秒级的无缝切换。上述技术的进步,为建立高可靠、独立的供电系统提供了坚实的硬件基础。在工程实施层面上,采用模块化装配式储能站,大幅缩短了现场建设时间;该智能光储能器集最大功率点跟踪、SOC管理、离网切换和远程监测为一体,大大简化了系统的集成复杂性。高速公路机电系统标准化程度较高,接口协议统一,方便了光伏储能装置的接入。在运行维护上,通过远程诊断和自动报警系统,可以实现较少的人工值班,符合交通基础设施管理的需要。

### 2.3 独立供电对隧道关键负荷的支撑能力边界

独立供电系统以保证与生命安全相关的负荷连续运行为其核心目标。基础照明,紧急疏散,消防和重要通信线路都属于第一级负荷,必须保证零中断供电。射流风机和轴流式风机

都是两级负荷,允许短时间中断,但要在30秒之内恢复。配有充足容量的储能系统,可保证连续阴雨天气72小时以上。系统的设计需要准确地将负荷曲线和光伏功率的概率分布进行匹配<sup>[3]</sup>。模拟结果显示,当储能容量达到2.3倍日平均负荷时,该系统全年无电时间不超过8.6小时,供电可靠性达到99.90%。在极端长时间无照明的场合,小型柴油发电机可以作为最终备用,但其启动概率不到0.8%。该结构在保证安全底线的前提下,最大限度地提高清洁能源渗透率,兼顾技术可行性和经济性。

## 3 独立供电系统架构设计与关键技术集成

### 3.1 光伏+储能+智能控制三位一体系统拓扑构建

该系统采用分层分布式结构,包括光伏发电、电化学储能、能源管理和负荷分配等四个部分。光伏阵列按照隧道划分,就近接入直流汇流箱,通过组串逆变器将交流电压转换成380V交流电压,最后接入隧道变电站的低压母线。该储能系统采用磷酸铁锂电池,采用预制舱式布置在隧道配电站旁,采用双向换流器与母线相连。能量管理系统作为控制中心,实时采集光伏发电功率、储能状态、负荷需求和电网信号,实现源-荷协同优化。在正常情况下,优先采用光伏直供负载,并对剩余电量进行充电;当光伏电量不足时,通过储能来补足电量;在电网可用的情况下,作为后备电源参与调峰。当电网出现故障时,系统可在10毫秒内切换为离网模式,由光伏和储能共同支撑所有关键负荷,以保证持续供电。

### 3.2 关键设备选型与容量配置方法

光伏组件选择了555瓦特、开路电压为49.8伏特、短路电流为13.82安培的单晶硅双面组件。该逆变器具有低电压穿越能力,额定功率为60千瓦,效率为98.7%。储能电池单体容量为280安培,标称电压为3.2伏特,组合后为800伏特,总容量为2.15兆瓦时。双向逆变器的功率为1.2兆瓦,充电和放电效率为96.5%。基于多年气象资料和历史负荷曲线的卷积算法,并利用卷积算法计算了系统的净负荷,并利用迭代优化的方法确定了储能系统的最小经济容量<sup>[4]</sup>。先求出全年的逐时光伏发电功率;其次,将实际负荷曲线与实际负荷曲线进行叠加,求得系统的净负荷值;然后对储能充、放电过程进行仿真,统计未满足的负荷小时;对储能容量进行调整,直到可靠性指标满足要求。该方法既考虑了电网的波动性,又考虑了负荷的刚性需求,又避免了电网的过度投资。

### 3.3 多电源协同控制策略与无缝切换机制

该系统采用了主从式控制结构,主站为主站,各子单元为从站。主站运行的多时间尺度优化算法是:在日前调度层根据气象预报产生充、放电曲线;在一天之内,每15分钟滚动一次计划;在实时控制层进行功率分配,周期为100ms。当市电电压低于额定值85%或者频率变化大于±0.5Hz且持续200ms时,切换逻辑以电压和频率双重标准为基础,触发离网切换。开关过程分为三个阶段:第一个步骤是先断开主电源开关;其

次，储能变换器由电流源转换为电压源型，构建稳定的微网；最终实现光伏逆变器的同步接入。整个过程只需 10 毫秒，输出电压波动不超过±3%，频率偏差不超过±0.1 Hz，完全满足了灵敏度负载的要求。黑启动功能是在整个系统断电后，通过储能装置独立设定电压，逐步唤醒光伏和负载。

### 3.4 与隧道机电系统的接口标准化设计

该系统采用标准的电气和通讯接口，与既有隧道的机电网络相结合。采用 IEC60364 标准的电气接口，输出电压为 380 V/220 V，三相四线制，谐波失真率在 3%以内。保护配置遵循选择性原则，各级断路器整定值准确协调，保证了故障隔离范围的最小。通信接口采用 IEC61850 标准，经光纤以太网连接隧道监测系统，128 个遥测点和 32 个遥测点，接收负荷调节命令<sup>[5]</sup>。所有新增加的设备外壳均应具有 IP54 以上的保护等级，EMC 符合 GB/T17626 标准。安装地点应避开通风管道和安全出口，并留有足够的作业和维修空间。这种标准化的设计保证了新老系统的无缝结合，减少了改造的风险和后期的维护难度。

表 1 独立供电系统季度运行性能数据

季度	光伏发电量/兆瓦时	负荷消耗量/兆瓦时	储能吞吐量/兆瓦时	自洽率/%
Q1	1865.37	2103.84	1520.65	88.67
Q2	2012.45	1987.23	1385.72	101.27
Q3	1756.89	2054.16	1632.48	85.53
Q4	1623.74	2189.52	1705.33	74.16

### 4.3 基于故障树的供电可靠性建模

以一级负荷供电中断为顶事件，构建包含光伏失效、储能失效、控制失效、切换失效等 12 类底层事件的故障树。采用专家评分法和历史资料统计相结合的方法确定每一次事件的发生概率。最小割集分析结果表明，储能换流器的故障和控制电源的故障是系统的薄弱环节。通过定量计算，得出了该系统的年均失效率为  $9.85 \times 10^{-10}$  亿次/年，平均无故障运行时间 10152 小时。采用蒙特卡洛方法对 10 万次运行情景进行了模拟，计算结果显示，全年的缺电量期望值为 8.57h，与实测值 8.6h 具有较好的一致性。

表 2 两种供电模式年度可靠性指标对比

指标	独立光伏系统	传统市电+柴油机
年停电次数/次	0.37	1.82
年停电总时长/小时	8.57	24.36
最大单次停电/小时	3.24	8.75
应急电源启动次数/次	2	15

### 4.4 可靠性指标对比：独立系统与传统模式

与传统供电方式相比，独立供电方式的可靠性指标明显提高。全年停电次数和总停电时间分别下降了 79.7%和 64.8%，单次停电时间不超过 4 个小时，大大少于传统方式的 9 个小时。柴油发电机的启动次数由原来的 15 次减少到了 2 次，大大减少了运行维护工作量和燃油消耗。研究表明，基于分布式光伏技术的独立供电方式，既可以提高供电连续性，又可以优

## 4 工程应用验证与供电可靠性量化评估

### 4.1 某山区高速公路隧道群示范项目实施方案

隧道，总长 8.7 km。在隧道进出口边坡和中间隔离带边坡的基础上，共安装 12800 组光伏组件，总装机容量为 7.10 兆瓦。配套建设总装机容量 2.15 兆瓦的储能系统 4 套，每组 537.5 千瓦。该系统与原隧道变电所相连，保留原干线供电线作冷备。安装时严格按照高速公路机电工程规范要求进行，组件架采用抗风压设计，储能舱配有七氟丙烷自动灭火装置。

### 4.2 系统全年运行数据采集与能效表现分析

该系统全年总发电量为 7258.45 兆瓦时，可满足 8334.75 兆瓦电力需求的 87.09%；第二季度由于光照充足而没有启动空调负荷，实现了电量富余；在第四季度，由于持续的阴雨天气和供暖负荷的增加，自洽率是最低的。蓄能系统平均循环深度达到 42.3%，全年总发电量 6244.18 兆瓦时，有效地抑制了源荷波动。研究表明，该系统能够在大部分时间内独立支撑隧道的正常运行，只有在极端天气时才需要短时间启动备用电源。

化应急资源配置，保障隧道的安全运行。

## 结语

研究表明，以分布式光伏为基础的独立供电方式可有效解决弱网地区高速公路隧道群持续供电问题，其源、储协同优化及毫秒级无缝切换机制可显著提高供电可靠性和能量自洽性。该系统具有工程可行性，并能很好地兼容已有的机电设备，为交通能源融合提供了实用的范例。未来，应进一步探索光伏、风电、氢能等多能互补方式，结合人工智能预测控制技术，提升系统对极端天气环境的适应能力和适应能力，促进绿色交通基础设施向更高层次的自主供能发展。

## [参考文献]

- [1]柯予宸. 高速公路隧道分布式智慧供配电技术应用研究[J]. 运输经理世界, 2025, (23): 137-139.
  - [2]侯建宇. 高速公路隧道照明工程多脉冲直流供电方案设计研究[J]. 运输经理世界, 2025, (21): 144-146.
  - [3]曹宝康. 隧道直流照明供配电设计要点分析[J]. 现代建筑电气, 2024, 15(05): 44-48.
  - [4]王曙理, 朱伟. 高速公路短距离隧道群照明节能研究[J]. 低碳世界, 2021, 11(06): 255-256.
  - [5]李新祥, 魏丽彬. 智能长距离供电技术在公路隧道群中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(07): 293-295.
- 课题名称：公路隧道机电设施养护管理评价体系研究及数智管养平台研发与应用 (JKYZLX-2023-27)。