

光伏发电在高速公路隧道供电中的应用

孔祥辉

(中交一航局安装工程有限公司)

摘要: 为了在高速公路隧道中高效利用光伏发电资源,通过对高速公路隧道配电系统及用电设备的分析,结合光伏发电系统在不同光伏资源情况下的应用特点,提出了高速公路隧道配电系统中光伏发电资源的利用形式。同时结合高速公路隧道内设备运行特点与光伏发电系统运行特点,得出了中型光伏发电系统与高速公路隧道配电系统的结合方案,并设计了“三电源智能配电柜系统”,可实时判断配电系统及用电设备运行状态,在市电、发电机、光伏发电3个电源间自动切换。根据不同季节光照变化以及昼夜周期性变化的特点及时调整系统供电方式,充分利用了光伏发电系统电能,提高了高速公路隧道光伏发电系统的利用效率,同时减少了配电系统的储能装置,降低了高速公路隧道配电系统的建设及运营成本。

关键词: 高速公路;隧道;光伏;三电源配电系统

0 引言

光伏资源是可再生能源的重要组成部分,光伏发电系统的利用可有效减少温室气体的排放,同时降低能源利用成本。目前,光伏资源的利用形式从大型光伏电站及小型单个设备用电的光伏发电系统逐步进入到中型光伏发电系统应用阶段,采用所发的电能就地消纳的利用形式,与高速公路隧道用电设备的用电特点高度契合。本文主要研究中型光伏发电系统在高速公路隧道配电系统中的应用,通过对高速公路隧道用电设备的运行特点及中型光伏电站工作形式的分析,对中型光伏发电系统在高速公路隧道配电系统中的应用方式和方法进行系统阐述。

1 高速公路隧道配电系统

高速公路供电系统电源主要来自于高速公路沿线的市电,为保证供电可靠性,一般采用双回路供电。如无法满足双回路供电要求,可现场设置应急发电机,以满足紧急情况下的用电需求。市电通过专用线路引入附近的站、区、隧道等用电设备集中区域,其中收费站、停车区、服务区主要为生活用电,仅收费站内的收费系统供电要求较高,独立设置UPS系统。高速公路隧道内系统复杂、设备种类多,涉及行车安全,对供电可靠性要求高,且隧道内无自然光,照明系统需持续运行,耗电量较大,电能成本占总运营成本比重较大。

1.1 隧道供电方案

根据负荷分级及负荷分布情况,一般隧道变电所采用单电源配电方案+柴油发电机的供电方案,柴油发电机为一级及二级负荷供电。隧道箱变采用单电源配电方案,正常情况下由变压器供电,当外电失电时由柴油发电机组为隧道一二级负荷供电^[1]。

高压系统采用单母线的供电方案,变电所的变压器低压系统采用单母线的接线方式^[1]。

1.2 配电系统运行方式

低压配电柜采用单母线不分段接线,市电正常时,全部负荷由变压器供电。当市电电源停电时,低压柴油发电机通过双电源切换柜自动投入运行,脱开市电电源,向低压配电柜后段的消防风机、应急照明、监控设备等重要的负荷供电,对于涉及行车安全的应急照明、行车指示灯等负荷还设置了EPS系统。当市电恢复时,双电源切换柜可自动切除发电机组,将负荷投入正常的市电电源上。

2 光伏在隧道中的应用形式

2.1 光伏资源分布

光伏资源基于全年的太阳辐射总量和全年日照总时间计算。我国太阳能资源比较丰富,约70%的地区每年的太阳辐射总量超过了 $5\,024\text{ J/m}^2$,年日照总时间超过 $2\,000\text{ h}$ 。地势越高、地形越平坦的地区越能获得更多光照,太阳能资源相对丰

富。我国按照光伏资源的富集程度划分为五类地区,一类地区至三类地区光伏资源较为丰富,主要包括我国西北、西南、华北、东北、东南等地区,高速公路工程建设项目中可优先考虑增加高速公路光伏供电系统。

2.2 基本原理及系统结构

光线照射在太阳能电池上并且光在界面层被吸收,具有足够能量的光子能够在 P 型硅和 N 型硅中将电子从共价键中激发产生电子。界面层附近的电子和空穴在复合之前,将通过空间电荷的电场作用被相互分离,电子向带正电的 N 区、空穴向带负电的 P 区运动^[2]。

光伏发电系统主要由光伏板、直流柜、逆变系统、交流柜变压器及监控系统等组成。其中光伏板是光电转换的关键部分,直流柜为光伏板发电单元汇聚直流电,逆变器将光伏发出的直流电源转换成交流电,变压器将逆变器转换后的交流电升压至用电设备的工作电压,为用电设备供电。

2.3 高速公路光伏发电利用形式

光伏发电系统主要分两大类,独立光伏系统和并网光伏系统。独立光伏系统广泛应用于远离公共电网的无电地区和一些特殊处所,如偏远的高速、荒漠等地区,提供照明、电器等生活用电。并网光伏系统是与公共电网相连接的太阳能发电系统,使太阳能光伏发电进入规模化商业化运营阶段,成为电网组成部分。

目前,光伏资源的利用形式主要以大型光伏电站为主,大型光伏电站对于光伏资源的要求较高,占地面积大,建设成本高,技术难度大,故大型光伏电站的发展逐步放缓^[3]。为了拓展光伏资源的利用形式,光伏发电系统开始小型化,如单体建筑照明用电、路灯照明、高速公路上供电距离较远的小型用电设备等,但大型和小型的光伏发电系统均不符合高速公路项目光伏资源利用要求。

对于高速公路项目而言,光伏资源及土地资源大多无法承受大型光伏电站的建设,无法在高速公路建设项目中大规模推广。而小型的光伏发电系统在高速公路项目中主要用于环境检测、监控摄像机等小功率设备,光伏资源利用率低,供电范围受到严格限制。

据统计,高速公路隧道照明系统总功率一般为 100~200 kW,以 100 kW 中型发电系统为例,

光伏板约 80 W/m^2 , $100 \times 1\,000 / 80 = 1\,250 \text{ m}^2$,加上辅助设施占地 150 m^2 ,总共需要约 $1\,400 \text{ m}^2$ 。高速公路隧道光伏土地资源主要包括中分带、侧分带、隧道上方山体等位置,能够支持中型发电系统的建设。

结合上述特点,高速公路光伏资源的利用形式应该以建设 100~200 kW 中型光伏发电系统为主,利用本文所述技术方案,光伏系统发出的电能就地完全消纳。在资源的利用上也充分体现了规模优势,提高了光伏资源的利用效率。

3 光伏在隧道中的应用方案

3.1 总体方案

高速公路隧道运营成本中,隧道照明的电能成本占比最大,因行车安全需要,高速公路隧道内的照明常年运行。尤其在洞外阳光充足时,为保证行车安全避免产生黑洞效应,更要加强洞内照明,使隧道内外的光强基本一致。此时正是光伏发电系统发电高峰,可采用光伏电源对隧道加强照明供电,光伏发电与隧道照明的运行方式有着高度的互补性。结合高速公路建设特点,可在高速公路隧道上方山体或道路两侧征地红线范围内设置光伏发电系统。根据光伏总装机容量,智能控制系统根据隧道内负荷情况智能调整光伏发电系统的供电范围,实现光伏发电的完全就地消纳。既充分利用了光伏发电的容量,又保证了隧道供电系统的可靠性。

3.2 方案特点

高速公路隧道光伏智能配电系统中实时检测光伏系统发电功率,同时检测高速公路隧道内加强照明、正常照明、应急照明、监控系统等设备的用电情况,并与光伏发电系统容量实时匹配,根据光伏发电容量智能选择所带负荷情况,确保光伏发电的利用率,最大程度使用清洁的光伏供电系统进行隧道内的供电。光伏智能控制系统通过电源转换装置实现隧道负荷的智能匹配,在充分利用光伏发电容量的基础上,确保公路隧道照明的稳定,保证高速行驶安全。也可根据隧道应急照明功率和持续时间配置光伏发电电池储存,隧道变电所内可不设置 EPS 装置,利用光伏发电系统电池为应急照明供电。

3.3 隧道设备负荷分级

光伏发电系统供电范围内的回路采用双电源切换开关供电,并根据负荷的重要性在 PLC 程序

中确定光伏供电的先后顺序。最高级为一级，火灾报警、应急照明设置为一级；交通信号灯车道指示器、正常照明设置为二级；加强照明、隧道风机、水泵设置为三级。

3.4 系统结构

光伏供电的高速公路隧道采用智能配电系统，包括信号收集模块、中央控制模块、控制执行模块、三电源配电柜等部分。三电源配电柜设置3个电源接口，分别是市电接口、发电机接口、光伏发电系统接口。在三电源配电柜内设置常规馈线开关(单电源馈线开关)及双电源馈线开关，单

电源馈线开关主要为功率较大的风机、水泵供电，电源主要来自市电，也可以根据隧道运行状态采用应急发电机供电。双电源馈线开关主要为隧道照明、监控、信号灯、车道指示器、火灾报警系统等非动力设备供电。信号收集模块对市电、发电机、光伏等3个电源状态进行收集。对于市电和发电机主要收集电源运行状态。对于光伏发电系统，信号收集模块要收集光伏发电设备的实时发电量，实时光照。对于负载端，要收集负载运行状态及负载的用电量。

三电源配电柜系统结构形式见图1。

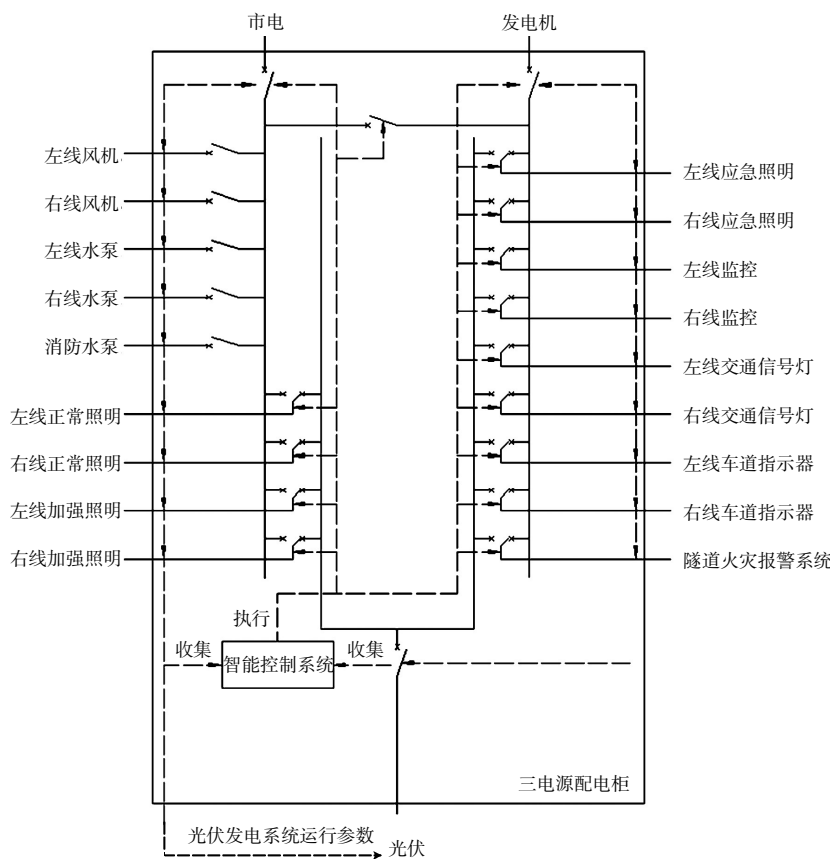


图1 三电源配电柜系统结构图

3.5 控制逻辑

信号收集模块通过检测器在三电源配电柜中收集市电、发电机、光伏发电设备、隧道风机、隧道照明、隧道监控、隧道信号指示灯等所有的电源状态信号及回路运行信号。中央控制模块主要对三电源配电柜中的电源及负载的状态进行逻辑判断，集中监控三电源配电柜内的电源及负载情况，根据系统实际运行状态通过PLC系统判断和控制。控制执行模块接收中央控制模块发出的

控制指令，对三电源配电柜中的电源开关、负载开关进行智能操作。三电源配电柜内设置市电、发电机、光伏3个电源进线，其中市电和发电机母线通过母联开关连接，光伏母线与市电和发电机通过双电源切换开关为负载供电，出线开关根据负载情况设置常规馈线开关和双电源馈线开关。

配电系统逻辑判断的原则为：

1) 当市电和光伏电源正常时，高速公路隧道正常运行，根据光伏电源发电量情况，通过控制

执行模块对三电源控制柜内的双电源馈线开关进行控制,根据光伏系统发电量情况将用电设备电源切换至光伏系统供电。

2) 当市电故障状态时,高速公路隧道处于应急状态,此时应急发电机启动,对隧道内的一级及二级用电设备供电,在昼间可将部分设备切换至光伏供电,减少发电机燃油消耗。当光照条件较好时且光伏供电系统容量足够时,可保证昼间隧道的正常运行。

3) 当市电及应急发电机电源均出现故障时,可通过光伏发电系统的电池,保持对隧道内的应急照明及小功率用电设备供电,可确保应急设备正常运行。

3.6 技术优势

1) 灵活性

可根据不同高速公路的光伏资源条件配置。高速公路建设的地理位置及光照条件都限制着高速公路隧道光伏供电系统的应用,本系统可根据三电源配电柜配置光伏发电系统的供电范围。高效利用就地的光伏能源,节约运行成本,减少碳排放。可根据光伏资源条件变化拓展或缩小光伏发电规模。

2) 实时性

根据设备运行情况动态配置用电负荷供电电源。系统可根据信号收集模块动态检测回路用电量,实时统计隧道设备用电负荷,与光伏发电系统容量动态匹配。通过中央控制模块的计算,给出最佳配电方案,使光伏发电系统始终处于接近满负荷的运行状态,高效地利用光伏能源。

3) 经济性

可降低配电系统容量,减少配电系统成本。采用光伏配电系统后,因光伏与隧道内照明的高度互补性,市电变压器容量可减小,同时应急发电机设备容量及燃油存储量也可减小,降低了配电系统运行损耗及一次建设成本。

4) 可靠性

提高了隧道供电系统的可靠性。通过对不同

供电状态及隧道运行状态的逻辑判断,动态分配电能,使供电系统更加稳定。可保证在市电及发电机停运状态下,昼间隧道检修照明及监控的正常运行,减小了配电系统故障带来的经济损失。

4 效益分析

4.1 经济效益

在隧道光伏发电系统中利用三电源智能配电柜,实时监测光伏发电功率,与设备用电回路的消耗功率自动匹配,不需要按照光伏发电周期配置储能装置,可降低光伏发电系统建设成本,并充分利用光伏能源。为了保证隧道内的行车安全,当隧道外光照强度较小时,隧道内也需要调小光照强度,反之亦然。光伏发电与隧道运行方式高度互补,可以有效降低市电消耗,具备可观的经济效益。

4.2 社会效益

光伏发电是可再生的清洁能源,清洁能源的利用有利于减少石化能源的消耗,同时可减少温室气体的排放,缓解温室效应,保护环境。利用“三电源智能配电柜系统”,可在原光伏发电系统的基础上进一步提高系统的利用效率,也为高速公路隧道光伏能源的利用提供了新方案,助力清洁能源的发展。

5 结语

本文介绍了高速公路隧道光伏发电利用形式及应用方案,通过高速公路光伏资源与公路隧道配电系统的结合,实现高速公路光伏发电系统的充分利用;提高了高速公路隧道供配电系统供电的可靠性,保证了高速公路隧道运行安全;降低了高速公路隧道运行费用,实现了节能减排。高速公路隧道光伏资源的利用方式可为高速公路光伏资源利用提供一种新的思路。

参考文献:

- [1] GB 50052—2009,供配电系统设计规范[S].
- [2] GB 50797—2012,光伏发电站设计规范[S].
- [3] 郑泽岳,李世博.基于智能控制技术的就地光伏并网发电系统概述及展望[C]//2018 江苏省研究生学术创新论坛. 2018.