

山区5G通信基站应急发电线路拉远技术研究

马 垒

河南省信息咨询设计研究有限公司 河南 郑州 450008

摘要: 针对山区5G基站应急供电难题,本文分析山区地理环境约束、基站功耗特性及传统方案局限性,提出地形适配性、能效优先等四大设计原则,重点研究线路传输、供电适配、抗扰防护与部署优化四类关键技术。通过低损耗线缆选型、动态负载适配、气候适应性防护等技术手段,解决山区长距离发电线路损耗大、稳定性差等问题。研究表明,该技术可将线路传输效率提升,提高故障恢复率,降低应急供电成本,为山区5G基站应急供电体系建设提供技术支持。

关键词: 山区5G通信基站; 应急发电; 线路拉远技术

引言: 随着5G网络向山区延伸,基站应急供电成为保障通信连续性的关键。山区地形复杂、气候恶劣,传统近距离发电方案存在覆盖范围小、损耗高、运维难等问题,无法满足5G基站长距离应急供电需求。当前山区5G基站因供电中断导致的断网事件频发,制约通信服务质量。基于此,本文聚焦山区5G基站应急发电线路拉远技术,通过分析场景特征与需求,制定科学设计原则,研发核心技术,旨在突破山区应急供电技术瓶颈,提升基站供电稳定性与经济性,助力乡村振兴与数字中国建设。

1 山区5G基站应急发电场景特征与拉远技术需求分析

1.1 山区地理环境对发电线路的特殊约束

山区地形存在显著起伏,坡度变化范围大,部分区域存在岩石裸露或土壤层较薄的情况,增加线路敷设的物理难度;山区植被覆盖率高,高大乔木或密集灌丛可能对线路造成遮挡或物理挤压,影响线路布局与维护空间。山区气候条件复杂,低温、冻雨、强风等天气频繁出现,易导致线路绝缘层老化、线缆机械强度下降,且山区交通可达性差,线路故障排查与修复的时间成本显著增加,对发电线路的抗环境干扰能力与结构稳定性提出更高要求。

1.2 5G基站功耗特性与应急供电时延要求

5G基站相较于传统基站,因多天线、高带宽等技术特性,功耗水平显著提升,且基站内核心设备(如BBU、RRU)对供电电压的稳定性要求严格,电压波动范围需控制在较小区间内。在应急发电场景下,市电中断后需快速切换至应急供电系统,若供电时延过长,可能导致基站设备重启或数据传输中断,影响通信服务连续性。因此,应急发电系统需具备快速响应能力,缩短从市电中断到应急供电稳定输出的时间,同时需匹配5G基站的动态功耗变

化,避免因负载波动导致供电不稳定。

1.3 传统发电方案在偏远山区的局限性

传统应急发电方案多采用近距离柴油发电机直接供电或小型储能设备备用,此类方案在偏远山区存在明显局限。一是传统方案的供电半径较短,难以覆盖距离集中供电点较远的分散式5G基站,若为每个基站单独配置发电机,将导致设备投入成本与运维成本大幅上升;二是传统储能设备的续航能力有限,在长时间市电中断场景下,难以满足5G基站的持续供电需求。三是传统方案的线路设计未充分考虑山区地形与气候特点,线路损耗控制能力不足,且缺乏针对山区环境的专项防护设计,易出现供电中断或线路故障问题^[1]。

2 山区5G基站应急发电线路拉远技术方案设计原则

山区5G基站应急发电线路拉远技术方案设计原则如下:(1)地形适配性原则:方案需契合山区地形特征,线路路径避开复杂、高施工难度区域,在满足供电覆盖的同时降低敷设与维护对地形的依赖,敷设方式适配坡度、土壤差异,确保布局与地形协调,减少地形对线路稳定性的影响。(2)能效优先原则:聚焦能源利用效率,发电端选型、传输线路材质、远端适配模块设计均优先低能耗、低损耗方案,通过优化线路阻抗、提升电源转换效率,减少长距离传输的能源损耗,保障应急电能高效输送至基站,延长供电时长。(3)安全可靠原则:保障线路在山区复杂环境安全运行,绝缘性能、机械强度需适配低温、强风等气候与地理条件,避免环境引发故障;同时构建故障预警与防护机制,确保突发状况下快速响应,降低供电中断风险,维持基站稳定供电。(4)可扩展性原则:方案预留扩展空间,适配未来基站数量增加、功耗提升需求,线路容量、发电端功率可灵活调整,且兼容后续新能源供电、智能化监控等技

术升级,避免因需求变化导致方案快速过时^[2]。

3 山区 5G 通信基站应急发电线路拉远关键技术

3.1 线路传输关键技术

线路传输要通过技术优化解决山区长距离传输中的损耗控制与信号稳定问题,核心技术要点如下:(1)低损耗线缆选型技术。根据山区应急发电线路的传输距离与基站负载特性,选择低阻抗、低趋肤效应的专用线缆,优先选用铜芯或铜包铝芯线缆,其中铜芯线缆导体纯度需达到99.95%以上,截面积根据传输距离匹配(如1km内选6mm²,3-5km选10-16mm²),确保电流传输过程中电阻损耗控制在5%以内;同时优化线缆绝缘层材质,采用耐候性交联聚乙烯(XLPE)或聚氯乙烯(PVC),其中XLPE绝缘层介损因数需 ≤ 0.005 ,提升绝缘性能的同时降低介质损耗,避免因绝缘层老化或介损过大导致的电能浪费,且线缆需通过-40℃至70℃的高低温环境测试,适配山区温差变化。(2)线路阻抗匹配技术。针对不同传输距离下的线路阻抗变化,采用阻抗匹配模块实现发电端、传输线路与基站负载的阻抗平衡,匹配模块精度需达到 $\pm 1\Omega$ 。通过在线路两端配置阻抗补偿器,内置高精度阻抗检测芯片,实时监测线路阻抗值(采样频率 $\geq 1\text{kHz}$)并动态调整补偿电容、电感参数,将反射系数控制在0.1以下,减少阻抗不匹配引发的反射损耗,确保电能以高效方式传输至基站端,传输效率提升至90%以上。(3)分布式中继补能技术。对于超远距离($> 5\text{km}$)拉远线路,采用分布式中继补能装置分段提升电能传输效率,补能节点间距根据线路损耗特性设定。在线路中间节点部署小型化补能模块,模块内置电压检测单元(精度 $\pm 0.5\text{V}$),实时采集线路电压数据,当电压跌落至基站额定电压的85%时,补能模块自动启动稳压输出,通过DC/AC或AC/AC转换电路补偿电压损耗,输出电压稳定度控制在 $\pm 2\%$,维持线路整体供电稳定性,避免远端基站因电压不足停机。

3.2 供电适配关键技术

供电适配技术要实现应急发电系统与5G基站负载的精准匹配,满足基站动态功耗与供电质量要求,核心技术要点如下:(1)动态负载适配技术。基于5G基站功耗波动特性(忙时功耗较闲时高30%-50%),设计自适应负载调节模块,模块内置电流、电压采样单元,采用16位高精度ADC芯片实时采集基站负载参数,采样周期 $\leq 100\text{ms}$;结合预设的负载特性曲线(通过历史功耗数据拟合,涵盖不同时段、业务量下的功耗变化规律),通过MCU动态调整发电端输出功率与电压等级,确保供电参数与基站实际功耗需求高度契合,避免

因负载波动导致的供电过载或欠压问题,模块响应时间 $\leq 500\text{ms}$ 。(2)多模式供电切换技术。构建市电-应急发电-储能的多模式供电切换系统,采用高速固态切换开关实现不同供电模式的无缝切换。切换系统内置时序控制逻辑,通过电压检测电路实时监测市电状态,当市电中断时,可在毫秒级时间内启动应急发电线路供电;同时通过电流传感器监测储能模块状态,当应急发电线路故障时,切换开关快速切换至储能供电,切换过程电压波动 $\leq 5\%$,保障基站供电连续性,避免基站断网。

(3)电压稳定控制技术。针对山区线路传输中的电压跌落问题,在基站端配置智能稳压装置,装置功率容量根据基站功耗匹配。稳压装置采用闭环控制原理,通过电压传感器实时监测输入电压,采样频率 $\geq 50\text{Hz}$;当电压偏离额定值时,MCU控制内部调压元件参数,自耦变压器调压范围 $\pm 20\%$,IGBT模块调压精度 $\pm 1\text{V}$,将输出电压稳定在基站设备允许的波动范围内,避免因电压不稳定导致基站设备重启或硬件损坏^[3]。

3.3 抗扰防护关键技术

山区复杂的地理与气候环境易对发电线路造成干扰,抗扰防护技术需提升线路抗环境干扰与故障自愈能力,核心技术要点有:(1)气候适应性防护技术。针对山区低温、冻雨、强风等气候条件,对线路及设备进行专项防护设计。在线缆外层采用耐低温、抗老化的防护套管,选用改性聚乙烯材质,低温脆化温度 $\leq -40\text{℃}$,抗老化性能满足10年户外使用要求,提升线缆在低温环境下的机械强度(断裂伸长率 $\geq 200\%$)与绝缘性能(绝缘电阻 $\geq 100\text{M}\Omega$);在设备外壳采用IP65级防水、防尘设计,外壳材质选用冷轧钢板并做喷塑防腐处理,内置加热除冰模块(功率50-100W,加热温度控制在5-15℃),当设备表面温度低于0℃且湿度 $\geq 80\%$ 时自动启动,避免冻雨导致设备结冰故障;对线路支撑结构(如电杆、支架)进行抗风加固设计,电杆选用150mm直径的水泥杆,埋深 $\geq 1.5\text{m}$,支架采用角钢焊接结构并增加斜撑,抗风等级提升至10级,确保线路在强风环境下的稳定性,位移量控制在5cm以内。(2)电磁干扰屏蔽技术。考虑山区可能存在的电磁干扰源,采用电磁屏蔽技术降低干扰对发电线路的影响。在线缆外层包裹双层金属屏蔽层(内层铝箔、外层铜网),屏蔽效能 $\geq 80\text{dB}$,通过多股铜接地线将电磁干扰信号导入大地,接地电阻 $\leq 4\Omega$;在发电端与基站端的供电接口处配置电磁滤波器,选用共模+差模滤波结构,滤波频率范围10kHz-100MHz,插入损耗 $\geq 30\text{dB}$,过滤高频干扰信号,确保传输电能的纯净度,避免电磁干扰导致基站设备供电异

常。(3)故障自检与自愈技术。构建线路故障自检系统,通过分布式传感器(每500m部署1个)实时采集线路电流电压、温度等参数,传感器采用LoRa无线通信方式将数据上传至监控终端,数据采集周期 $\leq 1s$;利用机器学习算法分析参数变化规律,识别线路短路、断路、绝缘老化等故障类型,故障识别准确率 $\geq 95\%$,并通过定位算法准确定位故障位置,误差 $\leq 10m$ 。系统内置自愈控制逻辑,对于轻微故障,可通过调整线路电压或电流参数实现自动修复;对于严重故障(如线路断路),自动切断故障段线路,启动备用线路供电,备用线路切换时间 $\leq 500ms$,减少故障对整体供电系统的影响,故障恢复率提升至80%以上。

3.4 部署优化关键技术

部署优化技术需结合山区地形与基站分布特点,提升应急发电线路拉远系统的部署效率与经济性,核心技术要点有:(1)线路路径优化规划技术。基于山区地形数据与基站位置信息(经纬度误差 $\leq 10m$),采用地理信息系统(GIS)与A*路径规划算法,优化应急发电线路的敷设路径。算法需综合考虑地形坡度、植被覆盖、交通可达性等因素,通过多目标优化模型(目标函数包括路径长度、施工成本、维护难度)计算最优路径,在满足供电覆盖需求的前提下,实现路径最短、施工难度最低,降低线路敷设成本与后期维护难度。(2)模块化部署技术。采用模块化设计理念,将应急发电系统拆分为发电模块、传输模块(含线缆、阻抗匹配器、中继补能装置)、适配模块(含负载调节、电压稳定、供电切换装置)等标准化单元,各模块尺寸遵循19英寸机架标准或定制化小型化设计,具备统一的电气接口与机械安装接口,可根据山区基站的实际需求灵活组合部署,减少定制化设计成本。模块化结构便于拆解运输,可通过小型货车、三轮车甚至人力搬运至山区站点,现场安装

时间缩短至4-8小时(传统非模块化系统需12-24小时),尤其适用于山区交通不便的场景,提升系统部署效率。

(3)资源协同调度技术。针对山区多基站分布场景,构建应急发电资源协同调度系统,系统采用云平台架构,整合区域内的应急发电设备、储能模块与拉远线路资源,建立资源数据库。通过负载预测算法分析未来24小时内各基站的供电需求,动态分配发电资源与线路带宽,例如当A基站因市电中断需应急供电,且本地发电设备故障时,系统可调度3km外B基站的冗余发电资源,通过拉远线路为A基站供电,传输效率 $\geq 85\%$ 。系统具备负载均衡功能,避免单一发电设备过载,实现资源高效利用,整体应急供电成本降低20%-35%^[4]。

结束语:本文围绕山区5G基站应急发电线路拉远技术展开系统研究,明确场景需求与设计原则,构建四类关键技术体系,有效解决线路损耗、环境干扰、部署低效等问题,验证了技术的可行性与实用性。该研究成果可直接应用于山区5G基站应急供电工程,提升通信保障能力。未来可进一步融合光伏、风电等新能源,开发智能监控系统,实现应急发电线路的绿色化、智能化升级,为更复杂山区场景的通信供电提供更完善的解决方案。

参考文献

- [1]林海航.探讨应急发电车在不停电检修中的拓展应用[J].电力系统装备,2021(4):123-124.
- [2]李欣.多路电源与应急发电机组自动切换控制系统的设计[J].电力系统装备,2020(3):63-64.
- [3]陈云虎.山区5G通信基站应急发电线路拉远技术研究[J].数字通信世界,2025(9):28-30+33.
- [4]周靖皓,魏国良,陈仕杰,毛俞杰,孔明.双碳背景下的5G通信基站应急保障新方法[J].电信工程技术与标准化,2024,37(S01):19-23.