

户外箱式变电站雷电过电压防护改造技术应用分析

李 阳

天佑工程勘测（天津）有限公司 天津 300380

摘 要：户外箱式变电站的集成化结构与户外运行特性，使其极易遭受雷电过电压侵袭，传统防雷防护体系存在明显的性能短板与技术局限。本文结合箱变结构防护特性与雷电作用机理，系统性梳理各类雷电过电压的破坏形式，依托外部接闪、内部过电压抑制、接地系统优化及电位均衡四类改造技术，搭建完整的防雷改造技术体系，结合过电压类型、设备布局特点分析技术适配逻辑与协同机理，细化各环节改造施工的关键技术要点，全面完善户外箱式变电站雷电防护架构，提升设备复杂雷电环境下的运行稳定性。

关键词：户外箱式变电站；雷电过电压；防护改造；接地优化

引言：户外箱式变电站凭借集成化、轻量化的优势，广泛应用于各类户外配电场景，是电力配电系统的重要核心设备。长期露天运行的工况、紧凑化的设备布局以及外露的进出线结构，使其雷电防护能力存在天然缺陷。雷电过电压引发的绝缘损坏、设备故障等问题，持续影响配电系统的安全稳定运行。针对箱变现有防雷体系的技术短板，开展系统性雷电过电压防护改造技术研究，厘清各类防护技术的适配逻辑与实施要点，能够有效弥补设备防雷漏洞，强化户外配电设备的抗雷击干扰能力。

1 户外箱式变电站雷电过电压防护基础特性分析

1.1 户外箱式变电站结构与防护短板特性

户外箱式变电站属于一体化成套配电设备，整合高压开关、变压器、低压配电等核心装置，整体结构高度集成，安装与运维便捷，适配各类户外配电场景。设备外壳选用金属板材制作，可抵御风雨、沙尘等常规自然环境损伤，具备基础物理防护能力。紧凑化的整体布局大幅压缩内部安装空间，电气设备排布较为密集，绝缘隔离距离难以预留充足余量。箱体为满足设备散热与通风需求，预留多处通透孔洞，破坏壳体整体屏蔽结构。雷雨天气环境下，完整屏蔽结构的缺失会大幅降低箱体对电磁干扰的阻隔能力^[1]。户外架设的进出线线路直接连通箱体内部元器件，线路外露布设，不具备全程屏蔽防护条件。雷电活动产生的电压扰动可通过线路直接传入设备内部。结构设计带来的固有问题，让箱式变电站在雷电过电压防护层面存在天然短板。

1.2 雷电过电压对箱式变电站的作用机制

雷电过电压对户外箱式变电站的影响分为直击雷作用和感应雷作用两类。直击雷直接击打设备箱体、支撑构架或接入线路主体时，会生成幅值极高的瞬时电压，

大量电荷沿导体快速传导至内部各类配电设备。设备绝缘结构承载的电压负荷会突破额定运行标准，引发绝缘老化、击穿、破损等故障，直接损伤核心配电装置。雷电落点分布在设备周边区域时，大气空间电磁场会产生剧烈波动。户外架空线路受磁场变化影响，会生成瞬时高压脉冲。这类脉冲电压会沿输电线路侵入箱体内部电气回路。站内低压控制元件、信号采集装置等精密设备耐压性能偏低，高压脉冲冲击下极易出现运行故障。感应雷引发的过电压覆盖范围大，发生频次高，持续对户外运行的箱式变电站形成安全威胁。

1.3 常规防护体系的固有技术缺陷

目前户外箱式变电站配置的常规雷电防护体系，主要由基础避雷构件、简易接地系统和普通过电压保护器件构成。传统避雷构件仅可释放直接雷击产生的部分电荷，无法应对磁场波动诱发的感应过电压问题。现场接地系统多采用简易敷设工艺，接地体布设形式单一、结构简单。土壤湿度、土质结构的环境变化，都会改变接地电阻数值，削弱电荷泄放能力。常规过电压保护器件动作响应速度较慢，无法有效抑制陡度极高的雷电脉冲电压。现有防护方案设计思路较为单一，仅适配简单雷击工况，无法适配户外复杂多变的运行环境。防护层级划分模糊，各防护模块独立工作、缺乏联动，对不同类型雷电过电压的抵御能力存在局限，无法长久保障变电站设备稳定运行。

2 雷电过电压防护改造核心技术体系

2.1 外部雷电接闪防护改造技术

外部雷电接闪防护是箱式变电站防雷改造的第一道屏障，主要针对露天设备主体及外伸线路开展防护升级。传统接闪结构覆盖范围有限，难以全面规避雷击风险。改造作业依托专用接闪装置优化布设方式，调整接

闪点位与防护角度,提升整体空间覆盖范围。全新的接闪改造技术可以高效承接自然界雷击电荷,引导雷电流沿预设通道导入地下。技术改造重点优化装置固定方式与构架连接强度,强化户外环境适配能力,降低风雨侵蚀对防护结构的影响。针对性的结构改造能够弥补传统外部防雷覆盖盲区,阻断直击雷对变电站箱体及外部线路的直接冲击,筑牢设备外部防护基础^[2]。

2.2 内部过电压抑制防护改造技术

变电站内部精密电气元件耐压水平较低,对雷电衍生过电压的防控要求更高。内部过电压抑制改造聚焦箱体内部配电回路与控制回路,替换性能落后的保护器件。新型抑制器件具备更快的响应速度,可快速吸纳、截断线路侵入的瞬时高压脉冲。改造过程中重新规划器件布设位置,缩短高压脉冲传导路径,减少过电压在回路中的扩散范围。通过分级抑制的技术思路,对不同电压等级的回路配置适配的保护装置。层层弱化雷电脉冲带来的电压冲击,避免瞬时过电压击穿设备绝缘、干扰控制回路正常工作,提升站内设备内部抗扰能力。

2.3 接地系统优化改造技术

接地系统是雷电流泄放的关键载体,接地性能直接决定整体防雷体系的运行质量。老旧接地结构敷设方式简单,接地体延伸长度与埋深不足,土壤接触面积有限。接地优化改造通过增设接地体、调整接地网布局,扩大接地系统与土壤的接触范围。部分地质条件较差的区域,搭配专用降阻材料改良周边土壤导电性能,稳定接地电阻数值。改造工作完善接地结构的整体性,提升大电流冲击下的电荷泄放效率。有效规避接地电阻波动引发的雷电流堆积问题,为各类防雷装置提供稳定的泄放通道,支撑整体防雷系统稳定运行。

2.4 电位均衡防护改造技术

雷电冲击工况下,变电站各类金属构件、设备外壳、线路支架会出现电位差值。电位失衡会引发局部放电、电弧击穿等次生故障,威胁设备安全。电位均衡改造技术以等电位连接为核心,将站内所有可导电金属构件统一接入均压网络。通过专用连接构件缩短各点位之间的电位差,让整体设备电位保持统一水平。改造过程中排查并消除零散孤立金属部件,补齐电位连接盲点。均匀化的电位环境可以杜绝雷电冲击产生的电位偏移问题,消除设备内部次生雷击隐患,完善变电站整体雷电防护体系。

3 防护改造技术的适配原理与应用逻辑

3.1 不同雷电过电压类型的技术适配原理

雷电过电压主要分为直击雷过电压与感应雷过电压

两类,两种形式的能量特征、传播路径和破坏方式存在本质区别。防护改造技术的设计思路围绕各类过电压的独有特征展开,形成专属的适配逻辑。直击雷过电压能量密度高、瞬时冲击强度大,峰值电流可达20~100kA,可直接作用于箱体构架、外部导线等外露结构^[3]。外部接闪改造技术以高能电荷承接和有序泄放为核心,通过科学布置接闪装置,改变雷击电荷的传导路径,弱化强电压冲击对设备主体的破坏作用。感应雷过电压由空间电磁场剧烈扰动产生,整体能量偏低但传播范围可达100m以上,极易通过输电线路渗透至箱体内部回路。内部过电压抑制改造依托高性能保护元件的快速响应特性,对高频低压脉冲进行吸收与截断,阻断过电压在配电、控制回路中的持续扩散。针对性的技术设计可以精准应对不同雷击工况,构建分层分类的雷电过电压防护体系。

3.2 箱变设备布局与改造技术的匹配逻辑

户外箱式变电站采用一体化集成设计,设备排布紧凑规整,整体安装布局会直接约束防雷改造的施工形式与装置选型。箱体外部无遮挡的开放环境,为接闪防护结构布设提供良好条件。合理规划接闪装置安装位置与防护角度,能够最大限度覆盖设备外露区域,阻隔雷击能量源头。箱体内部元器件排布密集,预留安装与绝缘空间有限。内部防护改造优先选用小型化、集成化的防护器件,缩减设备占用空间,满足狭小安装环境的使用要求,稳定内部过电压抑制能力。接地改造结合箱变落地式安装特点,利用箱体周边土层空间规划接地网结构,缩短雷电流泄放距离。电位均衡改造针对站内分散的金属构架、设备外壳开展一体化连接,消除结构布置零散带来的防护漏洞,让改造方案完全适配设备实际布局工况。

3.3 多类防护改造技术的协同应用机理

单一种类的防雷改造技术只能作用于单一防护环节,无法应对复杂多变的雷电干扰场景。多类防护技术相互配合、互补短板,形成完整的立体化防护运行机制。外部接闪结构完成首层防护作业,对高空直击雷能量进行拦截疏导,削减进入防护区域的雷击能量。内部抑制装置承担深层防护职能,处理穿透首层防护的残余过电压脉冲,守护精密电气设备的运行安全。接地系统作为核心泄放载体,承接各防护环节疏导的雷电能量,完成对地释放作业。电位均衡结构规整设备整体电位状态,规避雷电冲击引发的电位偏移与局部放电问题。各类技术按照层级递进的方式有序运作,从源头拦截、回路抑制、能量泄放到电位规整形成完整链路。多层防护体系相互支撑,提升箱变对复杂雷电环境的适应能力,

实现防护体系稳定长效运行。

4 户外箱式变电站防护改造关键技术实施要点

4.1 接闪装置改造安装技术要点

接闪装置是户外箱变抵御直击雷的核心设施,安装施工质量直接决定首层防雷结构的防护有效性。改造施工前需要结合箱体外形尺寸、设备高度与周边环境,测算合理的防护覆盖范围,确定接闪器的安装点位。安装作业需保证装置构架固定牢固,衔接部位做好防腐防锈处理,适配-40℃~85℃长期户外露天运行环境。装置架设角度与高度保持规范标准,规避遮挡、偏移等问题造成的防护盲区^[4]。安装完成后检查整体结构稳定性,保证雷击荷载作用下不会出现形变、松动等情况。严格把控安装施工精度,能够最大化发挥接闪结构的电荷承接能力,稳定外部防雷基础性能。

4.2 过电压保护装置选型与布设技术要点

过电压保护装置的适配性与布设合理性,影响内部电气回路的过电压抑制效果。装置选型需要对照箱变额定运行参数、回路电压等级与雷电脉冲耐受标准,筛选性能匹配、响应速度稳定的防护器件。优先选择适配狭小安装空间的集成化设备,适配箱变内部紧凑的布局结构。布设过程中保护装置与被保护设备的电气距离控制在1.5m以内,减少脉冲电压的传导时长。器件安装位置避开发热设备与密闭死角,预留不小于0.3m基础散热与检修空间。接线工序保持规整规范,杜绝虚接、错接问题。科学的选型与布设方式可以强化回路抗干扰能力,有效截断各类侵入式过电压脉冲。

4.3 接地网改造铺设与连接技术要点

接地网承担雷电能量泄放的核心功能,铺设与连接施工需要遵循标准化技术规范。改造施工依据现场土质条件、土层厚度规划接地网敷设路径,合理控制接地体埋深与延展范围。接地体敷设保持平直规整,土体回填逐层夯实,保障接地体与土壤充分接触。土质导电性能薄弱的区域,可通过改良土壤介质的方式稳定接地参数。接地干线与分支体的连接位置采用可靠焊接工艺,焊缝饱满密实,表面做防腐防护处理。全程把控施工细

节,维持接地系统电阻参数稳定,保障雷电高能电荷可以顺畅导入地下,筑牢整体防雷体系的泄放基础。

4.4 箱体及二次回路电位统一改造要点

电位统一改造用于消除雷电冲击下设备各结构点位的电位偏差,规避次生电气故障。改造施工需要梳理箱体外壳、金属支架、设备底座、二次回路屏蔽层等全部金属构件。对零散分布的金属部件实施等电位连接,补齐电位连接薄弱点位与空白区域。连接线缆选用规格匹配的专用导线,连接接点压实紧固,降低接触电阻。二次回路改造注重屏蔽层单点接地规范,杜绝杂乱接地引发的电位紊乱问题^[5]。改造完成后全面排查电位连接完整性,保证全站金属结构电位保持均衡,消除雷电冲击带来的局部放电、电弧击穿等安全隐患。

结束语

户外箱式变电站雷电过电压防护改造属于系统性的技术升级工作,单一防护手段无法适配复杂的户外雷击工况。通过梳理箱变结构防护短板与雷电过电压作用机制,整合多层级防雷改造技术,明确各类技术的适配场景与协同运行机理,规范现场改造施工的核心技术要求,可构建全方位、立体化的雷电防护体系。多维度防护技术的融合应用,能够有效弥补传统防雷结构的运行缺陷,夯实户外箱式变电站的防雷运行基础,保障配电设备长期安全可靠运行。

参考文献

- [1]郑慧丹.桥梁照明线路的雷电过电压防护措施研究[J].运输经理世界,2025(33):91-93.
- [2]杨先锋.面向智能建筑的配电系统雷电过电压防护关键技术应用[J].现代装饰,2026,629(6):241-243.
- [3]张进.高压架空输电线路雷电过电压及防护设计与应用[J].电气技术与经济,2026(3):110-112.
- [4]武一夫,李盟.浅析电力输电线路的雷电防护与过电压保护策略[J].中国设备工程,2025(24):74-76.
- [5]江松林.机房弱电线路雷电感应过电压防护策略与应用研究[J].低碳世界,2023,13(12):31-33.