

电力电缆电气施工安全风险识别与防控体系构建

李成万

山东中茂实业集团有限公司禹城分公司

DOI:10.32629/etd.v7i6.21023

[摘要] 城市电网规模持续扩张,地下电缆化率逐步提升,电力电缆电气施工场景愈发复杂,施工工况具备高电压等级、多隐蔽工程的特征,现场触电、电弧灼伤、电缆接头爆炸等安全问题频发。本文梳理电力电缆电气施工中的各类典型安全风险,主要包含电缆识别错误、残余电荷放电、交叉作业干扰、绝缘损伤、防火防爆失效等类型。依托风险矩阵与故障树分析方式搭建风险识别模型,从技术、管理、应急三个维度划分施工防控层级,涵盖电缆路径探测、接地线管控、绝缘耐压试验、人员资质管控、现场实时监测预警等施工实操内容。

[关键词] 电力电缆; 电气施工; 安全风险识别; 防控体系; 接地保护; 电弧防护

中图分类号: TM247 文献标识码: A

Safety Risk Identification and Prevention & Control System Construction for Power Cable Electrical Construction

Chengwan Li

Shandong Zhongmao Industrial Group Co., Ltd.

[Abstract] With the continuous expansion of urban power grids and the gradual increase in the underground cabling rate, power cable electrical construction scenarios are becoming increasingly complex. Construction conditions are characterized by high voltage levels and numerous concealed works. Safety issues such as on-site electric shocks, arc burns, and cable joint explosions occur frequently. This paper categorizes various typical safety risks in power cable electrical construction, mainly including cable misidentification, residual charge discharge, cross-operation interference, insulation damage, and failure of fire and explosion prevention. A risk identification model is established using risk matrix and fault tree analysis methods. A three-dimensional construction prevention and control hierarchy is developed from technical, management, and emergency perspectives, covering practical construction contents such as cable path detection, grounding wire management, insulation withstand voltage testing, personnel qualification control, and on-site real-time monitoring and early warning.

[Key words] power cable; electrical construction; safety risk identification; prevention and control system; grounding protection; arc protection

引言

电力电缆应用于输配电网,施工、安装及检修作业环节存在电气安全风险。电缆多数设于电缆沟、隧道或直埋土层内部,作业空间存在明显限制,作业区域内普遍存在多回路电缆同步运行的现象^[1]。现场施工出现误操作、设备发生绝缘失效问题时,会直接引发触电、火灾事故。现阶段电缆施工现场管理主要依靠人员经验开展,现场缺少系统化风险识别工具,也未形成闭环管控流程。

1 电力电缆电气施工典型风险识别

1.1 电缆识别错误与误动风险

地下电缆沟道内集中敷设多电压等级、多回路电缆,部分电

缆标识牌脱落、字迹模糊,电缆路径图纸标注与现场实际走向存在偏差,运行电缆与停运电缆难以区分。施工中易误切割、误剥切带电电缆,引发三相短路故障,产生电弧与高温金属熔滴,出现人员灼伤、现场火灾。电缆识别失误还会造成接地线错挂、电缆终端头错装。采用脉冲信号注入法作业时,未区分电缆金属护套接地形式与交叉互联接地箱感应电压方向,邻近电缆通过电磁耦合产生同幅度反馈信号,识别设备判定出现偏差^[2]。现场同步使用音频信号法、电磁感应法、脉冲反射法开展识别,电缆两端人员核信号,断开远端接地跨接线,多芯电缆逐相核对芯线并记录相位颜色。

1.2 残余电荷与感应电压风险

交联聚乙烯电缆具有电容特性, 切断运行电压后, 绝缘层与金属屏蔽层之间会留存残余电荷, 残余电压峰值可接近运行电压的峰值。未完成彻底放电时, 人员触碰电缆芯线、金属护套会遭受电击。同沟多回电缆并行时, 停运电缆金属护套会产生悬浮电压, 当单芯电缆金属护套单端接地、相间距离较大时, 运行电缆负荷电流800A、并行长度超500m, 护套感应电压可突破200V。作业使用专用放电棒逐相对地放电, 单次时长不低于15s, 长距离电缆在多处位置重复放电, 次数不少于3次。金属护套采用全线强制接地, 接地铜绞线截面积不小于25mm², 接地电阻控制在4 Ω 以内, 现场布设等电位连接网, 作业人员在绝缘垫上开展操作。

1. 3施工机械与交叉作业风险

电缆沟道、隧道、排管作业空间狭窄, 现场照明、通风条件较差, 施工机械设备会叠加安全风险。输送机、牵引机等设备金属结构与运行电缆安全距离不足时, 易引发人员间接触电。交联聚乙烯电缆最大牵引力不超过自重5倍, 且不大于70N/mm², 瞬时牵引力超标会造成绝缘层撕裂、拉伸变形, 绝缘电阻出现下降。多单位交叉作业时, 易误碰停电电缆头、刺破运行电缆绝缘层^[3]。进场机械进行绝缘性能检测, 滚筒包覆半导体橡胶, 牵引设备设置超限报警阈值。现场划分作业区段, 布设厚度不小于5mm的绝缘环氧板, 挡板高度超出运行电缆支架顶层200mm以上。

2 基于故障树的风险量化分析方法

2. 1风险事件顶事件建立与逻辑门构建

开展电缆识别作业时, 同步搭配音频、脉冲、电磁类多种识别方式交叉校验, 作业前逐块清点核查沟道内标识牌, 结合电缆实际走向逐段修正路径图纸, 修正后的图纸张贴在沟道、隧道各出入口。接地作业中逐点检查接地线连接状态, 使用便携仪表现场实测接地电阻, 按工况匹配对应截面接地线缆, 在接地装置周边设置硬质围挡阻挡外力触碰拆除^[4]。施工前用专用设备逐段检测电缆绝缘性能, 接头作业严格执行分层剥切、压接流程, 敷设转运时在电缆接触位置加装弹性护垫, 现场布设电压采集终端实时记录电压变化。组织人员开展现场实景实操演练, 逐项比对工作票内容与现场作业内容, 划分独立值守区域安排人员定点看护, 各类应急器具统一摆放至作业区域5m范围内, 缩短取用时长。

2. 2底事件概率评估与最小割集计算

针对电缆识别0. 8次/千次作业的故障及同沟多芯电缆信号串扰问题, 在沟道多回路区段加装信号隔离组件, 作业时分段断开远端接地跨接线, 电缆两端人员同步开展信号比对, 每千次作业增设多轮交叉核验步骤。临时接地线故障概率2次/百次作业, 故障多源于拆除后未复位, 可在接地线上加装编码电子卡扣, 拆除动作实时登记, 复位环节安排双人现场核对卡扣状态, 每百次作业开展全点位接地装置巡查。投运15年以上交联聚乙烯电缆水树老化击穿概率0. 05次/km • 年, 按公里划定检测单元, 每月使用专用仪器逐段检测绝缘状态, 标注老化异常点位。

2021年全国电缆线路故障率达到3. 96次/100 km • a (如表1),

到2025年全国10kV及以上电压等级电缆年故障总量突破12. 7万次。施工及附件质量问题是电缆故障的核心诱因——2025年10kV配电网电缆故障中, 绝缘老化占38%, 附件缺陷占27%, 外力破坏占22%, 合计占配电网电缆故障的87%。配电网电缆故障中82%的故障点集中在中间接头和终端头位置, 进一步印证了电缆接头制作、绝缘处理等施工环节是现场安全管控的重点对象。

表1 2021年全国电缆线路故障率及原因构成

指标	数值
电缆线路故障率	3. 96 次/(100 km • a)
其中：外力因素占比	19. 54%
自然因素占比	37. 65%
城市用户平均故障停电时长	3. 43 小时/次

3 防控体系架构与分层管控内容

3. 1技术防控层内容

沿电缆沟道每50m布设一处镀锌铜接地汇流排, 汇流排截面积不小于50mm², 板面加装M8不锈钢接地螺栓, 作业人员直接使用就近点位完成接地操作。开展10kV及以上电缆作业时, 按现场工况配发0级、1级绝缘手套, 所有绝缘手套取用前逐一完成充气检漏测试。作业全程佩戴透光率≥90%、带有防紫外涂层的电弧防护面罩, 面罩卡扣全部扣合。定期清理汇流排表面杂物, 在接地螺栓螺纹位置涂抹防锈油脂, 延缓金属部件锈蚀。

现场启用双信号智能电缆识别设备, 设备同步发射高频脉冲、低频音频信号, 接收端解析信号强度比值与相位差, 区分目标电缆与周边线路。在电缆接头井、隧道口安装剩余电流监测设备, 设备动作整定值设为30mA, 动作时长小于0. 1s。临时施工线路全部接入监测回路, 泄漏电流出现异常时设备自动切断回路电源。每班次安排人员逐台巡检设备, 记录信号传输数据, 现场模拟电流超限场景, 核验设备跳闸动作状态^[5]。

3. 2管理防控层内容

电缆电气施工作业统一使用第二种工作票或带电作业工作票, 票据固定增设电缆识别确认、接地线装拆记录、感应电压检测登记栏目。工作票签发前, 运维人员与施工负责人前往作业区域逐根核对电缆双重名称, 借助专业识别设备完成多轮信号核验, 双方现场签字留存记录后再启动作业。每日作业正式开始前召开班前会, 安全员调取实时监测数据, 公示作业区域带电回路编号、负荷电流、感应电压数值, 全体作业人员依次复述相关内容, 专人对核对情况进行登记。

电缆接头制作人员须持特种作业操作证上岗, 每2年参与专项技能复训与考核, 考核环节分别检验剥切精度、压接质量以及局部放电波形判读能力。现场安全监督每2小时开展一次全域巡查, 逐项核查接地线连接状态、临时用电线路完整性、防护装备佩戴情况。作业人员通过移动终端上传现场隐患, 平台自动分配整改任务并跟进处置进度。出现电缆识别误操作、未放电触碰带电导体等违章行为的施工小组, 扣除当月安全绩效, 停止现场作业3天。

3.3 应急防控层内容

各电缆施工作业小组统一配置标准化专用急救包,包内配齐30kV级1.5m环氧玻璃钢绝缘钩、高压接地棒、心肺复苏隔离膜、止血带等专业应急器材,作业前逐一核对器材完好性。沿电缆施工全线每200m设置一处固定应急集合点,各集合点布设防爆对讲机、固定通讯设备,醒目位置张贴属地就近医疗救援机构联系方式、救援路线及应急联络人信息,保障现场通讯与救援联络畅通。

施工项目部每年组织不少于2次专项应急演练,演练科目固定涵盖触电急救、电缆火灾疏散、有限空间救援,严格参照断电施救时长 $\leq 3\text{min}$ 、隧道火灾全员撤离时长 $\leq 90\text{s}$ 的标准开展实操考核。便携式除颤仪存放于专用保温箱体,安全员每月核查设备电量、耗材有效期并做好台账记录。施工现场对接属地电力医院搭建专属应急救援通道,事故发生后24h内完成初步事故调查报告,采用鱼骨图逐条梳理事故诱因,同步更新施工现场管控细则。

4 关键防控技术与现场应用

4.1 电缆路径与相位识别技术

开展电缆路径探测启用8kHz-33kHz断续音频电流模式,发射机直接对接目标电缆,红色夹体夹紧电缆芯线或金属护套,黑色夹体接至远端接地极,实测两极接地电阻差值控制在 10Ω 以内,接收机逐点采集磁场信号,依托磁场强度峰值判定电缆走向与埋深,发射0.2 μs 电压脉冲完成脉冲相位识别,比对反射波极性判断电缆末端连接形态,高压感应式验电器贴合电缆金属护套,通过声光信号区分电缆带电状态,三芯电缆终端施工时,依次用万用表电阻档、电池通灯法逐相排查芯线通断、核对相序,现场逐根标记芯线相位编号。

4.2 个人防护装备与接地保护技术

10kV-35kV电缆施工全程穿戴二级电弧防护服,选用面料电弧热防护性能值 $\geq 8\text{cal}/\text{cm}^2$ 的防护装备。绝缘手套依照IEC60903标准分级选配,0级对应500V及以下系统,1级对应3kV系统,2级对应10kV系统,每副手套投入使用前逐一开展充气检漏。绝缘鞋选用防滑、抗穿刺款式,干燥环境下实测鞋底绝缘电阻 $>10^7\Omega$ 。作业点位两端布设三相短路接地线,10kV采用25mm²线缆,35kV采用35mm²线缆,搭配螺旋式、双舌式线夹,实测线夹与端子接触电阻 $\leq 0.05\Omega$,严格按流程完成接地线装拆,接头作业区铺设厚度 $\geq 6\text{mm}$ 、宽度1m绝缘垫,完整覆盖全部操作区域。

4.3 施工过程实时监测与预警系统

布设由前端传感器、无线传输模块、中央监控平台组成的施工实时监测系统,现场加装非接触式电压探测器、电流钳表、温湿度传感器与150kHz谐振频率局部放电超声探头。电压探测器贴合电缆金属护套布设,对地电压超36V即刻发出声光报警与无线预警。电流钳表持续监测临时接地线电流,中低压电缆正常电流 $<50\text{mA}$,电流升至100mA且持续上升,判定绝缘劣化、残余电荷释放不彻底。温湿度传感器采集接头区域数据,相对湿度 $>75\%$ 触发预警并联动除湿设备运转。超声探头捕捉放电信号,幅值超20mV、脉冲相位稳定在工频电压峰值即判定绝缘缺陷,数据经蓝牙、4G上传平台,依托阈值模型生成红、黄、绿三级风险预警。

5 结语

电力电缆电气施工安全管控覆盖全施工流程,施工核心风险源集中于电缆识别失误、残余电荷与感应电压、机械施工损伤、接头绝缘缺陷四类问题。故障树模型可明确施工风险逻辑关系与关键控制点,技术、管理、应急三层防控模式可阻断风险演化链条。现阶段施工管控依托精准识别设备、标准化接地流程、智能监测终端、常态化应急演练开展现场管控,行业逐步推进物联网、人工智能技术与施工风险管控的融合应用,优化现场风险动态评估与自适应防护模式。

【参考文献】

- [1] 别念,杨振斌.基于层次分析法和作业条件危险性评价法的电力有限空间作业安全风险评估[J].科技和产业,2025,25(1): 90-97.
- [2] 赵鹏宇.FHS输变电工程项目施工安全风险研究[D].北京交通大学,2021.
- [3] 王瀚锋,王冲,郭松.电网企业城市电缆工程建设与运维管理探索实践[J].中外企业文化,2023,(3):82-84.
- [4] 郝小峰,孔繁跃,孙凌涛.变电站人身伤害风险对策探讨[J].电力安全技术,2022,24(11):38-41.
- [5] 崔文浩.基于概率对偶犹豫模糊集的综合管廊运维安全风险评估模型研究[D].重庆交通大学,2023.

作者简介:

李成万(1990--),男,汉族,山东省德州市禹城市人,大学本科,职称:工程师,研究方向:电力电缆专业。