

# Research on risk assessment and control of cable line operation in distribution network

Zhigang Huang

State Grid Zhejiang Jiaying Power Supply Company, Jiaying, Zhejiang, 314000, China

## Abstract

with the development of urban power grid in the direction of high load density, deep electrification and intensive underground space, the application proportion of cable lines in distribution network continues to increase. However, the cable line is affected by multiple factors such as geological environment, construction quality, operation load and external force damage, showing the characteristics of diverse fault types, strong concealment, complex transmission chain and so on, which brings significant challenges to the safe operation of distribution network. By establishing a cable line operation risk management and control framework of “risk identification - risk assessment - risk early warning - Risk Governance - risk closed loop”, the research institute proposes a multi-source perceptual monitoring system, a whole process quality traceability mechanism, a digital twin operation simulation platform and proactive preventive maintenance strategy for the future smart distribution network. It is expected that this paper can provide theoretical support and practical path for the construction of the resilient operation system of urban distribution network, and has important value for improving the security, intelligent level and operation and maintenance efficiency of distribution network.

## Keywords

distribution network; Cable route; Risk assessment; Fuzzy comprehensive evaluation

# 配电网电缆线路运行风险评估与管控研究

黄志刚

国网浙江嘉兴供电公司, 中国 · 浙江 嘉兴 314000

## 摘 要

随着城市电网向高负载密度、深度电气化与地下空间集约化方向发展, 电缆线路在配电网中的应用比例不断提高。但电缆线路受地质环境、施工质量、运行负荷及外力破坏等多因素叠加影响, 呈现故障类型多样、隐蔽性强、传播链复杂等特征, 给配电网安全运行带来显著挑战。本研究通过建立“风险识别—风险评估—风险预警—风险治理—风险闭环”的电缆线路运行风险管控框架, 提出面向未来智能配电网的多源感知监测体系、全过程质量追溯机制、数字孪生运行仿真平台及主动预防性检修策略。期望文章能为构建城市配电网的韧性化运行体系提供理论支撑与实践路径, 对提升配电网安全性、智能化水平和运维效率具有重要价值。

## 关键词

配电网; 电缆线路; 风险评估; 模糊综合评价

## 1 引言

现代城市配电网呈现出用电负荷持续增长、地下空间资源紧张、网络结构复杂化等趋势。电力电缆因具有占地小、供电可靠性高、抗环境干扰素力强等优点, 在城市配电系统中占比不断提升, 尤其在 20kV 及以下电压等级中, 电缆化率快速提高。传统的电缆运维模式多依赖人工巡检、经验判断和事后抢修, 在面对电缆系统多源耦合风险时存在明显不足。特别是在地质变形、施工扰动、环境温度异常上升、潮气侵入、负荷突变等场景下, 隐蔽风险常难以及时暴露。

因此, 构建系统化、科学化的运行风险评估方法, 制定全过程风险管控机制, 是提升配电网运行韧性与主动防御能力的关键。

## 2 配电网电缆线路运行风险的系统特征

配电网电缆线路在长期运行中面临多重耦合应力, 其风险表现为复杂性、隐蔽性与突发性并存的典型系统性特征<sup>[1-2]</sup>。首先, 从构成上看, 电缆线路由电缆本体、接头、终端、金属护层、沟道与夹层等多子系统集成, 各组件既独立承载运行功能, 又在力学、电磁、热效应上形成强耦合关系。一旦其中任一薄弱点出现失效, 故障往往沿绝缘界面或金属屏蔽层迅速扩展, 具有明显的链式传播特征。其次, 电缆线路深埋于地下或敷设于密闭隧道中, 加之城市地下空间的高密

【作者简介】黄志刚(1978-), 男, 中国浙江嘉兴人, 本科, 工程师, 从事配电网电缆线路运行研究。

度分布,使得绝大部分隐患难以通过常规巡检直接暴露,风险潜伏周期较长。再加之运行环境温度变化、潮气渗入、负荷波动以及地质活动等多因素交替作用,使电缆风险呈现动态演化特征,其状态难以用静态指标刻画。

### 3 配电网电缆线路运行风险评估体系构建

#### 3.1 电缆线路运行风险评估指标体系的构建原则与内容设计

配电网电缆线路运行风险的复杂性决定了风险评估指标体系必须具备系统性、科学性、可量化性与可操作性。首先,系统性要求指标体系能够全面涵盖电缆运行的内外部风险因素,包括设备本体状态、环境条件、施工质量、负荷特征以及外力扰动等,使评估结果能够反映风险链条的整体情况。其次,科学性要求指标之间具有明确的逻辑关联,既能反映风险成因,又能支持后续数学模型的量化处理,从而避免因指标模糊或重复造成评估偏差。

基于上述原则,本研究将电缆运行风险指标体系划分为五类共性指标层级。第一类为设备状态类指标,包括绝缘电阻、介质损耗角、局部放电量、金属护层完整性及运行年限等,用于反映电缆本体的健康水平<sup>[3]</sup>。第二类为运行负荷与温度类指标,包括载流率、长期温升、热点温度与温度变化速率等,通过描述电缆在热应力环境下的稳定性,判断潜在击穿风险。第三类为环境影响类指标,包括土壤含水率、地质沉降趋势、周边地下水位、通道温湿度等,体现电缆所处环境的稳定性与侵蚀风险。第四类为施工质量类指标,包括接头施工合格率、线路敷设直线性、保护层恢复状况与竣工资料完整度等,此类指标反映电缆初建阶段的内在缺陷。第五类为外力破坏类指标,包括周边施工频次、道路交通荷载、开挖活动密度、管线交叉数量等,用于评估外力风险暴露度。五类指标共同构成了结构完整、可用于不同场景的风险评价体系,为下一步建模分析奠定了基础。

#### 3.2 风险评估模型的构建方法与综合分析机制

在指标体系建立的基础上,为实现风险的量化评估,需要构建具有数学严谨性与工程适应性的综合评价模型。本研究采用层次分析法(AHP)确定各指标权重,并引入模糊综合评价(FCE)方法实现多指标信息的融合,以应对电缆运行风险中“定量与定性共存”以及“指标间模糊边界显著”的问题。层次分析法通过构建判断矩阵,对不同指标的重要性进行成对比较,使权重的获取过程既具有数学逻辑约束,也体现专家经验的价值。在完成一致性检验后,可以得到可靠的指标权重分配,实现对不同类型风险影响程度的量化刻画,例如在早期运行阶段施工质量权重较高,而在长期运行阶段设备老化和环境侵蚀权重逐步上升。

在权重确定的基础上,模糊综合评价方法用于处理指标值的不确定性与模糊性。电缆运行状态受到环境、负荷和材料属性的共同影响,其中许多指标难以简化的“正常—

异常”二元方式进行判断,而更适合用隶属度表示其在不同风险等级中的可能性。通过构建各指标的隶属度函数、建立模糊矩阵,并结合AHP权重进行综合运算,可得到电缆线路的总体风险得分与风险等级划分<sup>[4]</sup>。最终形成的风险等级体系通常划分为五级,从可控风险、低风险、中等风险、中高风险到高风险,对应不同的运维策略与治理措施。

综合来看,AHP-FCE模型不仅能有效融合多类不同维度的数据,也能体现风险的模糊性与渐变性,评估结果能够同时兼具定量化和稳健性,有助于提升电缆线路风险评估的精准性与可靠性。在实践中,该模型可与在线监测系统、地理信息系统及历史故障数据库结合,实现动态风险更新与分区域差异化管理,为后续预警机制与治理策略制定提供科学依据。

### 4 配电网电缆线路运行风险评估分析

#### 4.1 数据采集体系构建与样本线路特征分析

为验证所构建AHP-FCE综合评估模型的适用性与有效性,本研究选取某典型城市配电网的10 kV电缆线路作为分析对象,对多个代表性线路段进行数据采集、状态检测与历史资料梳理。样本线路包含老旧线路、接头密集线路、地下水位较高区域线路及交通荷载显著区域线路,具有典型性与差异性,能够充分反映城市电缆运行状态的复杂场景。采集的数据类型涵盖电气、热力、机械与环境多维度信息,包括绝缘电阻、介损、局部放电量等电气状态参数;光纤测温系统(DTS)获取的沿线温度分布与热点变化数据;隧道与排管内的温湿度变化;沿线土壤含水率、热阻率、腐蚀性等级;地质沉降监测数据;外力施工记录以及电缆安装档案等。所有数据在使用前均进行去噪处理、归一化转换与缺失值补全,以保证模型输入的准确性与可比性。

数据分析显示,样本线路呈现明显的风险差异性。如运行超过20年的电缆段普遍存在介损偏高、绝缘电阻下降等老化迹象;接头密集区域的局放量分布波动较大,部分接头周边出现轻微电场畸变;地下水位较高区域的金属护套腐蚀速率明显高于其他区域,且容易出现外护层受潮情况;交通繁忙道路段的电缆受振动传导影响,局部机械应力较高,部分支撑构件出现松动。综合来看,这些数据特征体现了电缆风险形成的情境差异性,为后续风险模型的输入提供了充分依据<sup>[5]</sup>。

#### 4.2 综合风险评估结果分析与典型线路对比研究

依据前述指标体系与模型方法,对采集样本线路进行风险评估,得到多条线路的综合风险得分与风险等级划分结果。评估结果表明,高风险线路主要集中在运行年限较长、绝缘指标异常突出、环境湿度偏高以及周边存在高频施工扰动的线路段,其风险得分普遍超过0.75,表现出强烈的故障发展倾向。进一步的检测记录显示,这些线路在过往的运行中确实曾出现多次局放告警或外护层渗水问题,说明模型具

备较强的现实一致性。中高风险线路多位于交通主干道下方或土壤热阻率偏高区域，其风险得分集中于 0.60–0.75 之间，虽然尚未出现突出缺陷，但长期高负荷运行所引起的热点温度偏移已成为潜在隐患。中等风险线路的风险得分在 0.45–0.60 区间，多为新建或改造后的线路，其风险特征呈现波动性但整体可控。

从典型线路对比结果来看，模型的风险输出与实际运行场景高度契合。在接头密集区域，综合风险得分明显高于线路本体段，显示接头作为薄弱环节对整体风险贡献显著；

在地下水丰富地区，环境侵蚀类指标的权重显著提升，使得风险得分相应增大；在通风条件较差的排管段落，温度风险成为主要影响因素，评估结果能够有效反映高温隐患的演化趋势。为了进一步验证模型稳定性，本研究还对不同时间节点的监测数据进行了滚动评估，结果显示风险等级具有良好的连续性与可解释性，即随着温度升高、局放量增加或外界干扰加剧，风险得分呈现合理的递增趋势。为便于对风险评估结果实施分级治理，本研究根据综合得分构建了电缆线路风险等级与治理策略对照表，如表 1 所示。

表 1 电缆线路风险等级划分与治理策略

| 风险等级     | 得分范围      | 典型表现                | 建议措施                 |
|----------|-----------|---------------------|----------------------|
| I 高风险    | ≥0.75     | 局放异常、热点显著、水侵或施工扰动频繁 | 接头更换、排水治理、路径迁移、加固或停运 |
| II 中高风险  | 0.60–0.75 | 温升偏高、局放上升、环境恶化      | 加密监测、局部修复、绝缘增强       |
| III 中等风险 | 0.45–0.60 | 老化轻微、负荷偏高           | 定期检测、趋势分析            |
| IV 低风险   | 0.30–0.45 | 指标稳定、轻微波动           | 常规巡检                 |
| V 可控风险   | <0.30     | 状态良好                | 台账管理                 |

4.3 风险治理策略体系与智能化运维手段的实施路径

在风险等级综合评估结果基础上，治理策略应遵循“精准化、分级化与场景化”的原则，为不同电缆段量身定制干预措施。对于评估为高风险或中高风险的线路段，治理策略应以消除关键隐患为主要目标，优先实施带电检测、局放定位、路径迁移、接头更换、电缆截面热升级处理、通道排水治理、防腐加固与关键节点冗余建设等措施。这些措施能够有效削减风险链条中的薄弱环节，特别是在绝缘性能显著下降或外部施工扰动频繁的区域，提前修复能够显著降低故障概率。对于中等风险线路，可采用“检测强化—趋势监测—隐患修复”的策略，通过完善定期局放检测、热点温度监控、绝缘增强处理等手段，防止潜在隐患演化为高等级风险。而低风险线路则主要采取常规巡检与周期性检测方式，并在风险指标出现波动趋势时及时调整策略，以保持线路长期稳定状态。

在治理策略执行过程中，智能化运维手段的引入显得尤为关键。首先，多源状态监测系统能够实现对温度、潮气及局放信号的连续捕捉，尤其是基于分布式光纤测温技术 (DTS) 和超高频局放监测技术，可精准发现热点和绝缘弱点。其次，外力破坏智能识别系统通过振动光纤、施工轨迹监测、视频识别等手段实现外部扰动的实时感知与分类识别，使运维部门能够在外力事件发生前介入预防。智能化工具不仅提升了风险识别精度，还为资源配置优化提供依据，实现从“以

经验为主”向“以数据为主”的治理模式转变。如今风险治理策略的实施路径正在从传统线性治理模式向智能化、自适应与闭环优化模式进化，为构建韧性化、可持续的配电网电力运行体系奠定坚实基础。

5 结论

配电网电缆线路运行风险呈现系统性、隐蔽性与耦合性特征，传统经验式管理已难以满足现代城市配电网的安全运行要求。本文构建了涵盖设备状态、环境因素、负荷特性、施工质量与外力破坏等多个维度的综合风险指标体系，提出了以 AHP-FCE 为核心的综合评估方法，并通过案例分析验证了模型的准确性与适用性。

参考文献

[1] 孙一鸣. 配电网中的电缆线路运行维护策略分析[J]. 集成电路应用,2023,40(11):390-391.

[2] 王志强. 运行电缆线路中故障检测方法研究[D]. 内蒙古:内蒙古大学,2020.

[3] 陈伯东. 架空配电线路和电缆线路运行中的常见故障 及防范措施[J]. 科技资讯,2020,18(21):46-48.

[4] 王建,姚江宁,刘泽青,等. 恶劣天气下配电网故障统计分析及其概率分布拟合[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(17):143-153.

[5] 县城配电网安全风险评估与控制课题组. 县城配电网的安全风险控制[J]. 中国电力企业管理,2010(28):31-35.