

# 输电线路雷击风险评估及差异化防雷保护方案研究

李迎胜

内蒙古电力(集团)有限责任公司乌兰察布供电公司 内蒙古 乌兰察布 012000

**摘要:** 输电线路作为电力系统的重要组成部分,其安全稳定运行直接关系到电力供应的可靠性。雷击是导致输电线路故障的主要原因之一,会造成线路跳闸、设备损坏等严重问题。本文围绕输电线路雷击风险评估及差异化防雷保护方案展开研究,分析了输电线路雷击特性与风险评估基础,构建雷击风险评估指标体系,建立了风险评估模型并进行应用,进而制定差异化的防雷保护方案。研究旨在为提高输电线路的防雷水平提供理论依据和实践指导,保障电力系统的安全可靠运行。

**关键词:** 输电线路; 雷击风险评估; 差异化防雷; 保护方案

## 1 输电线路雷击特性与风险评估基础

### 1.1 输电线路雷击特性分析

雷击是一种自然放电现象,由带电荷的雷云与大地之间的电场强度达到击穿空气的临界值而引发。其形成机理涉及雷云的电荷积累、电场增强以及最终的放电过程。雷击类型主要分为直击雷和感应雷;(1)直击雷是雷云直接对输电线路的导线、杆塔或避雷线放电,其能量巨大,破坏性强。(2)感应雷则是由于雷云放电时产生的电磁感应,在输电线上产生感应过电压,虽能量相对较小,但也可能导致线路故障。

雷击对输电线路的作用方式多样,击中导线时,强大的雷电流会使导线产生高温,可能造成导线熔断,同时产生的过电压会使绝缘子闪络;击中杆塔时,雷电流通过杆塔入地,会在杆塔上产生高电压,可能导致杆塔与导线之间的绝缘子闪络,甚至损坏杆塔结构;击中避雷线时,部分雷电流会通过杆塔入地,部分可能通过耦合作用在导线上产生过电压。这些作用带来的危害不容忽视,绝缘子闪络会导致线路跳闸,影响电力供应;断线会造成线路中断,修复难度大、时间长;倒塔则会造成严重的设备损坏和线路瘫痪,给电力系统带来巨大的经济损失。

### 1.2 雷击风险评估的内涵与要素

输电线路雷击风险评估是指对输电线路遭受雷击的可能性以及雷击可能造成的后果进行全面、系统的分析和评价。其目的是识别线路的雷击风险点,为制定防雷保护措施提供依据。雷击活动强度是重要要素之一,它反映了某一地区雷击发生的频繁程度和强度,直接影响线路遭受雷击的概率。线路自身抗雷性能也至关重要,包括绝缘子的耐雷水平、杆塔接地电阻的大小等,决定了线路在遭受雷击时抵御损坏的能力。环境因素同样不

可忽视,地形地貌、土壤电阻率等会影响雷击的分布和雷电流的泄流路径,进而影响线路的雷击风险。此外,线路的运行维护状况也会对雷击风险产生影响,良好的运行维护能及时发现和处理潜在问题,降低风险<sup>[1]</sup>。

### 1.3 差异化防雷保护的理论依据

差异化防雷保护是根据输电线路不同区段的雷击风险等级、线路结构特点、运行环境等因素,制定针对性的防雷保护措施。其理论依据在于输电线路各区段的雷击风险存在显著差异,采用统一的防雷措施会导致部分区段防雷过度,造成资源浪费,而部分区段防雷不足,仍存在较高的故障风险;通过对线路进行雷击风险评估,划分不同的风险等级,针对不同等级的区段采取不同强度和类型的防雷措施,既能有效降低高风险区段的雷击故障概率,又能合理控制防雷成本,提高防雷工作的经济性和有效性。这种方法充分考虑了线路的个体差异,使防雷保护更加科学、合理。

## 2 输电线路雷击风险评估指标体系构建

### 2.1 指标选取原则

在构建输电线路雷击风险评估指标体系时,需遵循一定的原则。科学性原则要求选取的指标能够客观、准确地反映输电线路的雷击风险状况,基于相关的科学理论和实践经验。系统性原则强调指标体系应全面涵盖影响雷击风险的各个方面,形成一个有机的整体,避免遗漏重要因素;可操作性原则意味着选取的指标应易于获取和量化,能够通过实际测量、统计等方式得到具体的数据,便于进行分析和评估。针对性原则要求指标体系紧密围绕输电线路雷击风险这一核心,突出与雷击风险相关的关键因素,提高评估的准确性和有效性。

### 2.2 具体评估指标

#### 2.2.1 雷击活动强度指标

年平均雷暴日数是衡量一个地区雷击活动频繁程度的重要指标, 它是指一年中出现雷暴天气的天数, 雷暴日数越多, 说明该地区雷击活动越频繁; 地面落雷密度表示单位面积内每年遭受雷击的次数, 直接反映了雷击发生的概率, 落雷密度越大, 线路遭受雷击的可能性越高。雷击电流幅值概率分布则描述了不同幅值雷电流出现的概率, 雷电流幅值越大, 其破坏性越强, 对线路造成损坏的风险也就越高。

### 2.2.2 线路自身抗雷性能指标

绝缘子串的冲击闪络电压是衡量绝缘子耐雷水平的关键指标, 它是指绝缘子串在冲击电压作用下发生闪络的电压值, 该值越高, 绝缘子抵抗雷击过电压的能力越强。杆塔接地电阻是影响雷电流泄流的重要因素, 接地电阻越小, 雷电流越容易通过杆塔入地, 降低杆塔上的电压, 减少绝缘子闪络的风险; 避雷线保护角是指避雷线与导线之间的夹角, 保护角越小, 避雷线对导线的保护效果越好, 能有效减少直击雷击中导线的概率<sup>[2]</sup>。

### 2.2.3 环境影响指标

地形地貌对雷击活动有显著影响, 山地地区由于地形复杂, 气流运动强烈, 容易形成雷云, 雷击活动相对频繁; 平原地区地形平坦, 雷击活动相对较少; 丘陵地区则介于两者之间, 土壤电阻率影响杆塔接地电阻的大小, 土壤电阻率越高, 越难降低接地电阻, 不利于雷电流的泄流, 增加了线路的雷击风险; 周边植被情况也会产生影响, 高大的树木可能会吸引雷击, 使线路附近的雷击活动增加, 同时树木与线路之间的距离过近, 可能在雷击时产生放电现象, 影响线路安全。

### 2.2.4 运行维护指标

线路运行年限越长, 设备老化程度越高, 绝缘子的性能、杆塔的结构强度等都会下降, 抗雷能力减弱, 雷击风险增加。历史雷击故障记录反映了线路以往遭受雷击的情况, 记录越多, 说明线路在历史上更容易受到雷击影响, 存在较高的雷击风险隐患; 维护水平包括定期巡检、设备检修、防雷措施维护等方面, 维护水平越高, 能及时发现和处理线路存在的问题, 保持线路的良好状态, 降低雷击风险。

## 3 输电线路雷击风险评估模型建立与应用

### 3.1 评估指标权重确定

评估指标权重的确定是雷击风险评估的重要环节, 常用的方法有层次分析法、熵权法和组合赋权法等。层次分析法是一种将复杂问题分解为多个层次, 通过两两比较确定各指标相对重要性的方法。它首先建立层次结构模型, 然后构造判断矩阵, 计算判断矩阵的最大特

征值和特征向量, 进而得到各指标的权重。该方法主观性较强, 但能充分体现专家的经验和判断; 熵权法是根据指标数据的离散程度来确定权重的方法。指标的离散程度越大, 其包含的信息越多, 权重也就越大。该方法客观性强, 不受人为因素的影响, 但忽略了指标之间的内在联系和专家的知识经验; 组合赋权法结合了层次分析法和熵权法的优点, 既考虑了专家的主观判断, 又充分利用了指标的客观数据, 使确定的权重更加合理、可靠。在实际应用中, 可根据具体情况选择合适的权重确定方法, 或采用组合赋权法以提高权重的准确性。

### 3.2 风险评估模型构建

结合模糊综合评价法、灰色关联分析法或神经网络法等可构建输电线路雷击风险评估模型。模糊综合评价法是利用模糊数学的理论, 对具有模糊性的评估对象进行综合评价的方法。它首先确定评价因素集和评价等级集, 然后建立模糊评价矩阵, 通过权重向量与评价矩阵的合成得到综合评价结果。该方法能较好地处理评估中的模糊信息, 适用于雷击风险这种具有不确定性的评估问题; 灰色关联分析法是通过计算参考序列与比较序列之间的关联度来评价各比较序列与参考序列的接近程度的方法<sup>[3]</sup>。在雷击风险评估中, 可将理想的低风险状态作为参考序列, 各线路区段的实际指标作为比较序列, 通过计算关联度来确定风险等级。该方法对数据的要求不高, 适用于数据不完整或信息不充分的情况; 神经网络法是模拟人脑神经网络的结构和功能, 通过训练样本学习输入与输出之间的关系, 进而对未知样本进行预测和评价的方法。将输电线路的雷击风险评估指标作为输入, 风险等级作为输出, 通过大量的样本训练神经网络, 可建立准确的评估模型。该方法具有较强的非线性映射能力和自适应学习能力, 但需要大量的训练样本。

### 3.3 模型验证与应用

选取典型输电线路区段进行实例分析, 以验证评估模型的合理性和准确性。首先收集该线路区段的各项评估指标数据, 按照确定的权重和评估模型进行计算, 得到该区段的雷击风险评估结果。将评估结果与该线路区段的实际雷击故障情况进行对比分析, 如果评估结果与实际情况相符, 说明模型具有较高的合理性和准确性; 如果存在偏差, 则需要对模型进行调整和优化。根据评估结果, 将线路划分为高风险、中风险和低风险三个等级。高风险区段是雷击故障高发区域, 需要采取强化的防雷保护措施; 中风险区段存在一定的雷击风险, 需采取适当的防雷措施; 低风险区段雷击风险较低, 可采取基础的防雷措施。通过模型的应用, 能为输电线路的防

雷工作提供明确的目标和方向。

#### 4 输电线路差异化防雷保护方案制定

##### 4.1 高风险区段防雷保护方案

对于高风险区段，需要采取加强型的防雷措施。增加绝缘子片数可以提高绝缘子串的冲击闪络电压，增强线路的耐雷水平；采用耐雷性能更好的绝缘子，如合成绝缘子，其具有良好的耐污和耐雷性能，能有效减少闪络故障；降低杆塔接地电阻是关键措施之一，可采用换土、加降阻剂、深井接地等方法，使雷电流能够快速泄入大地，降低杆塔电位。安装线路避雷器能限制雷击过电压的幅值，保护绝缘子和设备，减少线路跳闸；优化避雷线保护角，减小保护角可以提高避雷线对导线的屏蔽效果，减少直击雷击中导线的概率。同时，可考虑增加避雷线的根数，进一步增强保护效果。

##### 4.2 中风险区段防雷保护方案

中风险区段可采用常规强化防雷措施。定期测量杆塔接地电阻，对不符合要求的接地装置进行处理，如清理接地体周围的杂物、增加接地极等，确保接地电阻在合理范围内。及时更换老化绝缘子，老化的绝缘子其绝缘性能下降，容易在雷击时发生闪络，定期检查并更换老化绝缘子能有效提高线路的抗雷能力。加强线路巡检工作，及时发现线路存在的缺陷，如导线损伤、杆塔倾斜等，并进行修复，保持线路的良好运行状态。另外，可在适当位置安装避雷器，重点保护线路的薄弱环节，如转角杆塔、终端杆塔等。

##### 4.3 低风险区段防雷保护方案

对于低风险区段的输电线路，尽管雷击风险相对较低，但仍需采取基础防雷措施以确保其安全运行。首先，保持正常的运行维护是关键，这包括按照规定的周期对线路进行全面巡检和维护，确保线路设备处于良好状态。在巡检过程中，应仔细检查避雷线和接地装置，及时发现并处理避雷线断股、腐蚀等问题，以及接地装置松动、锈蚀等隐患，确保其正常发挥作用。关注天气变化也是必不可少的，特别是在雷雨季节，应加强监测

力度，做好应急准备工作。一旦发生雷击故障，能够迅速响应并采取措施，将故障影响降到最低。通过这些基础防雷措施的实施，可以进一步巩固低风险区段输电线路的安全防线<sup>[4]</sup>。

##### 4.4 特殊区段防雷保护方案

针对跨越山谷、河流等特殊地形的输电线路区段，由于雷击活动频繁且地形复杂，因此需要采取更为有效的防雷保护方案。可控放电避雷针是一种先进的选择，它能提前引导雷电放电，将雷电流安全地引向自身，从而减少对线路的雷击损害。同时，架设耦合地线也是一种有效的措施，它可以增强导线与地线之间的耦合作用，进而降低雷击时的感应过电压，并起到一定的屏蔽作用。对于雷电活动异常强烈的区段，除了上述措施外，还可考虑采用线路避雷器密集布置、加强接地装置等综合性措施，以全面提升线路的防雷能力。此外，根据实际情况调整线路路径，尽量避开雷电高发区域，也是降低雷击风险的有效手段。

#### 结束语

本文通过对输电线路雷击风险评估及差异化防雷保护方案的研究，为输电线路的防雷工作提供了有益的参考。通过科学的评估方法和针对性的防雷措施，可以有效降低线路的雷击故障率，提高供电可靠性和系统的稳定性。未来，随着新技术和新方法的不断涌现，输电线路的防雷工作将更加智能化和精细化，为电力系统的安全运行提供更加坚实的保障。

#### 参考文献

- [1]李笑怡.防雷技术在输电线路设计的应用[J].集成电路应用,2021,37(01):70-71.
- [2]官侯.多雷区输电线路及变电站防雷保护[J].科技风,2020(16):186-187.
- [3]朱柏林.输电线路差异化防雷技术与策略[J].技术与市场,2022,27(03):89-90.
- [4]黄富勇.输电线路防雷技术的研究及应用[J].中国新技术新产品,2020(15):147-148.