

输电线路防雷仿真技术在电力设计中的应用研究

张威威

河源旭耀能源有限公司, 广东 河源 517000

DOI:10.61369/EPTSM.2025090002

摘要 : 输电线路防雷仿真技术融合电磁暂态与蒙特卡洛模拟, 通过构建杆塔、绝缘子等模型, 提升特殊地形和差异化雷电参数区域的设计精度。智能算法用于优化接地装置与避雷器配置, 实现经济与可靠性平衡。该技术在沿海强风、高海拔及城市走廊等复杂场景中均有应用, 为线路设计提供科学依据。

关键词 : 输电线路; 防雷仿真; 智能算法

Research on the Application of Lightning Protection Simulation Technology for Transmission Lines in Electric Power Design

Zhang Weiwei

Heyuan Xuyao Energy Co., Ltd., Heyuan, Guangdong 517000

Abstract : This paper introduces lightning protection simulation technology for transmission lines. It covers the development of mathematical models based on multi-disciplinary principles, classifications and characteristics of methods including transient simulation and Monte Carlo methods, along with applications in special terrains and micro-meteorological zones. The modeling of towers, insulators, and related criterion systems is also addressed. Optimization techniques like neural networks are discussed, while current model limitations and the potential of digital twin technology are highlighted.

Keywords : transmission lines; lightning protection simulation; intelligent algorithm

引言

雷击对输电线路安全稳定运行构成严重威胁, 传统设计方法难以精确应对复杂地形及多变雷电参数。为提升电力系统韧性、确保电网安全, 国家能源局于2024年10月发布《电网安全风险管控办法》, 强调建立全过程风险管控机制。因此, 利用防雷仿真技术对输电线路进行精准设计与评估, 成为满足政策要求、保障电网可靠性的关键。该技术通过精细化建模与模拟, 显著提高了雷击防护措施的科学性与有效性, 是现代电力设计的重要支撑。

一、输电线路防雷仿真技术概述

(一) 防雷仿真技术的定义与原理

防雷仿真技术是一种通过计算机模拟等手段, 对输电线路防雷相关物理过程进行建模和分析的技术。它基于电磁学、电路理论等多学科原理^[1]。该技术通过构建精确的数学模型来描述输电线路在雷击情况下的电气特性。例如, 对于雷击过程, 会考虑雷电流的波形、幅值和陡度等参数, 以及它们与线路绝缘性能之间的复杂关联。通过模拟雷电流在输电线路中的传播路径和产生的电磁场分布, 能够分析线路上的过电压和过电流情况。同时, 电磁暂态仿真技术可用于模拟雷击瞬间线路中的暂态过程, 包括绝缘子闪络、避雷器动作等现象, 从而为输电线路防雷设计提供理论依据和参考。

(二) 主流防雷仿真技术分类

输电线路防雷仿真技术主要分为暂态仿真和蒙特卡洛法等。

暂态仿真侧重于分析雷电过电压在输电线路中的暂态过程, 通过精确模拟电路元件和线路参数, 研究雷电冲击下的电压、电流变化特性, 其结果对于理解防雷装置的动作原理和优化设计具有重要意义^[2]。蒙特卡洛法则是一种基于概率统计的方法, 它考虑了雷电参数的随机性, 通过大量的随机抽样模拟不同雷电场景下输电线路的防雷性能, 能够更全面地评估防雷措施的有效性和可靠性, 为输电线路防雷设计提供概率性的决策依据。同时, 像 ATP-EMTP、PSCAD 等主流仿真软件也各有其技术特点, 适用于不同的防雷仿真需求。

二、防雷仿真技术在输电线路设计中的应用场景

(一) 特殊地形区域的雷电防护设计

山区/高海拔地区等特殊地形因地形复杂, 雷电活动频繁且强烈, 对输电线路的安全运行构成严重威胁。针对这些区域, 需

依据差异化防雷设计原则开展防雷设计。通过建立杆塔接地装置优化模型，综合考虑土壤电阻率、地形地貌等因素，模拟接地装置在不同工况下的散流特性，以优化其结构和布局，降低接地电阻。同时，采用冲击接地电阻仿真计算方法，准确计算接地装置在雷电冲击下的电阻值，评估其防雷性能。这些措施有助于提高输电线路在特殊地形区域的防雷水平，保障电力系统的稳定运行^[3]。

（二）区域差异性雷电参数建模与仿真

输电线路穿越不同地理区域时，雷电活动特征（如雷电流幅值、波形、极性分布）存在显著差异，传统统一参数模型难以准确反映实际风险。针对此问题，需构建基于地理分区的雷电参数差异化仿真模型。通过统计分析历史雷击数据，结合区域地质构造（如土壤电阻率分布、矿藏影响）和气候背景（如雷暴日分布、大气电场特征），建立区域化的雷电流概率分布模型库^[4]。该模型库集成至防雷仿真平台，可为特定线路走廊选取最匹配的雷电参数集。仿真时，输入线路途经的具体地理位置信息，自动调用对应的参数模型进行雷击风险概率计算和过电压仿真分析。这种基于地理差异性的参数建模方法，显著提升了不同区域输电线路雷击风险评估的准确性，为差异化防雷策略（如绝缘水平选择、避雷器配置密度）的制定提供了更精细化的数据支撑，从而优化整体防雷资源配置效率与线路运行可靠性。

三、防雷仿真模型构建与算法优化

（一）多尺度雷电冲击仿真建模

1. 杆塔波阻抗特性建模

建立包含塔身结构、斜材分布的频变参数线路模型是杆塔波阻抗特性建模的关键。该模型需综合考虑塔身的几何形状、材料特性以及斜材的分布规律等因素。通过精确构建这些参数，可以更准确地模拟雷电波在杆塔上的传播过程。分析雷电波传播过程中的衰减特性对于理解防雷机制至关重要。在这个过程中，要考虑到波在传播过程中由于杆塔自身的电阻、电感以及电容等参数的影响而产生的能量损耗。这种衰减特性的研究有助于评估雷电对输电线路的影响程度，为防雷措施的制定提供理论依据^[5]。

2. 绝缘子闪络判据建模

构建动态电弧模型与改进先导发展模型相结合的绝缘子闪络判据体系。动态电弧模型能够更好地描述电弧的动态特性，考虑了电弧的温度、电流等因素对电弧电阻的影响，更符合实际情况^[6]。改进先导发展模型则侧重于对雷电先导发展过程的精确模拟，包括先导的起始、传播以及与绝缘子的相互作用等。将两者相结合，可以综合考虑电弧和先导发展对绝缘子闪络的影响，从而更准确地判断绝缘子是否会发生闪络。这种判据体系为输电线路防雷设计提供了更可靠的理论依据，有助于提高输电线路的防雷性能。

（二）智能算法在防雷设计中的应用

1. 神经网络参数优化技术

在防雷设计中，神经网络参数优化技术至关重要。通过合理

优化神经网络参数，可提高防雷模型的准确性和有效性。采用先进的智能算法，如遗传算法、粒子群算法等，对神经网络的权值和阈值进行优化调整^[7]。这些算法能够在复杂的参数空间中搜索到最优解，使神经网络更好地拟合防雷相关数据。同时，利用交叉验证等方法，评估模型的性能，进一步指导参数优化过程。通过不断迭代优化，神经网络能够更精准地预测防雷相关指标，为地网优化设计提供可靠依据，从而实现更科学合理的防雷设计。

2. 遗传算法驱动的防护方案迭代

遗传算法在防护方案迭代中具有重要作用。通过设定合适的适应度函数，以避雷器布置方案的经济性和可靠性为目标，对不同的布置方案进行评估。利用遗传算法的选择、交叉和变异操作，不断生成新的布置方案种群。在迭代过程中，适应度高的方案更有可能被保留和进一步优化，逐渐逼近最优的避雷器布置方案，实现经济性与可靠性的平衡。这种基于遗传算法的迭代方法能够有效处理复杂的多目标优化问题，为防雷设计提供科学合理的防护方案^[8]。

四、防雷仿真驱动下的线路设计实例分析

（一）沿海强风区输电线路设计

1. 防风偏设计联合仿真

在沿海强风区输电线路设计的防风偏设计联合仿真中，需开展导线摆动状态下的空气间隙动态校核。强风环境下导线会发生摆动，这会改变空气间隙的距离，影响线路的绝缘性能。通过精确的仿真模型，考虑风荷载、导线张力等多种因素，模拟导线的摆动轨迹，从而准确计算空气间隙的动态变化。在此基础上，提出防风偏绝缘子配置新方案。该方案应综合考虑空气间隙动态变化的结果，合理确定绝缘子的数量、位置和型号，以提高线路在强风环境下的防风偏能力，确保输电线路的安全稳定运行^[9]。

2. 台风气候雷电参数修正

在沿海强风区输电线路设计中，台风气候下的雷电参数修正至关重要。需建立台风移动路径影响下的雷电活动概率预测模型，考虑台风对雷电活动的影响机制。同时，改进传统雷击密度计算方法，综合考虑强风、湿度、地形等因素对雷击密度的影响。通过对雷电参数的准确修正，可以更精确地评估输电线路的雷击风险，为防雷设计提供科学依据，从而提高输电线路在台风气候下的防雷性能，保障电力系统的安全稳定运行^[10]。

（二）高海拔地区差异化设计

1. 空气密度修正的绝缘配合

在高海拔地区，空气密度较低，这对输电线路的绝缘配合有显著影响。由于空气密度的改变，操作冲击放电特性也发生变化。研究发现海拔梯度与操作冲击放电特性存在一定规律。基于此，提出绝缘配置海拔校正系数。该系数考虑了空气密度对绝缘性能的修正。通过对不同海拔地区的实际数据进行分析和模拟仿真，确定合适的校正系数值。在输电线路设计中，应用此校正系数来调整绝缘配置，确保线路在高海拔地区能够安全稳定运行，有效提高输电线路的防雷性能，降低雷击跳闸率，保障电力系统

的可靠供电。

2. 冻土地区接地网优化

在高海拔地区,由于其特殊的地理和气候条件,输电线路设计需差异化考虑。例如,空气稀薄等因素会影响线路的电气性能。而在冻土地区,接地网的优化至关重要。构建季节性冻融条件下的接地装置暂态响应模型,能够更好地了解接地装置在不同季节的性能变化。设计螺旋型立体地网结构,可增加接地面积,提高接地效果。这种结构在冻土地区能更好地适应土壤的冻融变化,减少因土壤冻融导致的接地电阻变化过大的问题,从而保障输电线路的安全稳定运行,提高输电系统的防雷性能。

(三) 城市走廊综合防雷设计

1. 建筑群屏蔽效应建模

输电线路附近的高层建筑会对其雷电屏蔽效能产生影响。在建筑群屏蔽效应建模中,需考虑建筑物的高度、间距、分布等几何特征。通过建立合适的几何模型,可模拟雷电先导与建筑物及输电线路的相互作用。例如,利用电磁仿真软件,设定建筑物的导电率、介电常数等参数,以准确反映其电学特性。同时,考虑不同天气条件下大气的电学参数变化,使模型更贴近实际情况。通过大量的仿真计算,分析不同建筑布局下输电线路的雷电屏蔽效能变化规律,为线路设计提供依据,从而优化线路走向和杆塔位置,提高输电线路的防雷性能。

2. 多回线路防雷协同设计

建立同塔多回线路电磁耦合模型是研究多回线路防雷协同设

计的关键。通过精确建模,考虑线路的各种参数,包括导线的半径、材质、间距以及杆塔的结构等。研究导线排列方式对雷电防护效果的影响时,分析不同排列方式下线路的电感、电容等电气参数的变化。例如,水平排列与垂直排列的线路在遭受雷击时,雷电波的传播特性不同。水平排列可能导致相邻导线间的电磁耦合更强,影响雷电过电压的分布。而垂直排列在某些情况下可能对雷电防护更为有利。通过仿真分析这些影响,为多回线路的合理设计提供依据,优化导线排列方式,提高线路的防雷性能,确保电力系统的安全稳定运行。

五、总结

输电线路防雷仿真技术在电力设计中具有重要应用。它能有效提升线路设计质量,通过模拟雷击过程等为设计提供科学依据。然而,现有防雷仿真模型存在一定局限性,特别是在动态气象参数表征方面,这可能影响对雷击情况的准确模拟和分析。它可实现对输电线路及其运行环境的精准映射和实时监测,为智慧电网防雷设计提供更全面、准确的数据支持和决策依据,有望进一步提高防雷设计的科学性和有效性,推动电力设计行业的发展。

参考文献

- [1] 麦晓明.粤西气候环境下输电线路防雷策略研究 [D]. 华南理工大学, 2022.
- [2] 李建桥.胶囊网络在输电线路故障检测中的应用研究 [D]. 安徽理工大学, 2021.
- [3] 郭红旭.同塔双回输电线路防雷技术研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2021.
- [4] 吴统帅.基于输电线路关键部件电磁暂态分析的防雷方法 [D]. 西南交通大学, 2022.
- [5] 高晓丽.河南220kV输电线路综合防雷措施研究及应用 [D]. 郑州大学, 2021.
- [6] 唐学用, 梁垚, 孙斌, 等.数字孪生技术在区域多能源系统中的应用展望 [J]. 南方电网技术, 2021, 15(5): 104-114.
- [7] 姚少荣.防雷技术在输电线路设计中的应用 [J]. 科学与信息化, 2021(31): 49-52.
- [8] 杨岗, 姚少荣.简述防雷技术在输电线路设计中的应用及理论依据 [J]. 商业故事, 2016, (9): 26-26.
- [9] 邱凤蓉.线路防雷技术在输电线路设计中的运用 [J]. 引文版: 工程技术, 2014, (18): 144-146.
- [10] 周文钧.输电线路设计中线路防雷技术的运用 [J]. 设备管理与维修, 2021, 000(016): 102-103.