

输配电线路综合雷电防护对策分析

李扬帆

(国网绵阳供电公司, 四川 绵阳 621000)

【摘要】雷电是自然界中常见的电气现象, 对输配电线路的安全运行构成严重威胁。由雷电引起的过电压会对输电线路及其相关设备造成损害, 甚至导致电网系统的大规模故障。因此, 深入了解雷电放电的机理, 分析雷电对输电线路的影响, 并制定有效的雷电防护措施, 对于确保电力系统的稳定运行至关重要。本文通过对雷电放电机理的分析, 建立输电线路雷电侵入波的数学模型, 评估并优化变电站和输配电线路的雷电防护策略, 提供一套综合性的雷电防护对策, 以提高输配电线路在雷电环境下的安全性和可靠性。

【关键词】雷电放电机理; 输电线路; 雷电侵入波; 电气设备模型; 避雷器布置

引言:

在电力系统中, 输配电线路是连接发电站和用户的关键环节, 其安全稳定运行对整个电力系统至关重要。然而, 雷电作为一种自然界中常见的强烈电气现象, 对输配电线路构成严重威胁, 雷电不仅能直接击中输电线路和设备, 引起物理损坏, 还能通过电磁感应产生过电压, 对电力系统的正常运行造成极大干扰。鉴于此, 深入理解雷电现象, 准确评估其对输配电线路的影响, 以及制定有效的防护措施, 成为确保电力系统稳定性和安全性的重要课题。

一、雷电放电机理与雷击类型分析

(一) 自然界中雷电放电的机理

自然界中雷电放电的机理是复杂且引人入胜的, 其基本原理涉及云层内部以及云层与地面之间电荷的积累与释放。在云层内部, 由于水滴和冰晶等粒子的上升运动和碰撞, 形成一个充满带电粒子的环境, 这些带电粒子在云层内形成强烈的电场, 当电场强度超过一定阈值时, 就会触发放电过程, 即雷电。这种放电可以在云内部发生, 形成云内雷电; 也可以在云层与地面之间发生, 形成云地雷电。在云地雷电中, 通常是云层中的负电荷通过闪电通道向地面放电, 产生巨大的电流, 伴随着强烈的光和声现象。雷电放电的过程极为短暂, 通常只有几十微秒到几毫秒, 但放电电流可以达到数万到数十万安培, 电压高达数百万伏特, 这种强大的能量释放不仅产生电磁效应, 还能导致空气急剧加热, 形成雷声。

(二) 雷击类型及其特点

雷电的类型主要分为云内雷电、云地雷电和云云雷电, 每种类型具有独特的特点和影响。云内雷电是最常见的类型, 发生在同一云层内部, 其主要特征是不直接影响地面设施, 但可以产生强烈的电磁场,

对附近飞行器等高空设备造成干扰。云地雷电则是从云层放电至地面, 这种类型的雷电对地面设施, 特别是高耸结构和电力系统造成直接威胁, 其电流强度通常在几万到几十万安培之间, 电压高达数百万伏特, 能量极为巨大。云雷电发生在不同云层之间, 可能在较大空间范围内传播, 产生的电磁效应对广播和通信系统有一定影响。了解不同类型雷电的特征对于制定针对性的防护措施尤为重要, 例如: 云地雷电对输电线路的影响最为直接和严重, 需要采取如避雷针和接地系统等措施来保护; 而云内雷电虽然不直接威胁地面设施, 但其产生的电磁场也需考虑在内, 特别是对于电子设备的防护; 云雷电则更多影响通信系统, 需要相应的电磁兼容措施^[1]。

(三) 雷电对输电线路的影响

雷电对输电线路的影响主要体现在直接雷击和感应雷击两个方面。直接雷击发生时, 雷电流直接通过输电线路, 可能导致电气设备的损坏, 包括绝缘子的穿孔、导线的断裂和设备的烧毁, 这种情况下, 雷电的巨大电流和高电压是主要的破坏因素。感应雷击则是由于雷电放电产生的电磁场, 引起输电线路上的感应电压和电流, 虽然其强度相对较低, 但仍可能对电气设备造成损害, 尤其是对电子设备的破坏更为严重。此外, 雷电还可能导致输电线路上的过电压, 这种过电压既可以是直接雷击造成的, 也可以是通过地面或者空气传播的感应雷电引起的, 过电压会严重威胁电气设备的绝缘强度, 长期的雷电影响甚至可能导致输电线路的早期老化和性能下降。雷电对输电线路的影响是多方面的, 不仅包括对物理设备的直接破坏, 还包括对系统稳定性和可靠性的潜在威胁, 这就要求在输电线路的设计和运维中, 必须采取有效的防雷措施, 如安装避雷器、加强线路绝缘、优化接地系

统和提高系统的电磁兼容性，以确保输电系统的安全稳定运行。

二、输电线路雷电侵入波计算与模型建立

(一) 输电线路雷电侵入波的数学模型

输电线路雷电侵入波的数学模型是分析和预测雷电对输电系统影响的关键工具。这个模型的基础是麦克斯韦方程组，通过它可以精确描述电磁场在空间中的分布和时间上的变化，在建立模型时，首先需要定义雷电波的基本参数，如波形、幅值和上升时间等，这些参数对模拟雷电侵入波的准确性至关重要。模型将考虑线路的物理结构和电气特性，如线路长度、导线直径、绝缘材料特性等，这些因素共同影响雷电波在输电线路上的传播和衰减^[2]。表 1 展示出雷电侵入波数学模型的主要参数及其影响，通过对这些参数的精确计算和模拟，可以预测在不同雷电条件下输电线路可能遭受的电磁影响，为制定有效的雷电防护策略提供科学依据。

(二) 电气设备模型的建立与参数计算

电气设备模型的建立与参数计算在输电线路雷电侵入波分析中起着至关重要的作用。这一阶段的重点是精确地表征各种电气设备的行为，特别是在雷电侵入波的作用下，对于输电线路系统中的每个组成部分，如变压器、断路器、电缆和绝缘子等，都需要构建一个详细的模型，这些模型不仅要反映出设备的电气特性，如电感、电容和电阻，还要包括其在不同操作条件下的响应特性。

在输电线路雷电侵入波的电气设备模型建立与参数计算中，核心是利用物理和电气方程来精确描述设备的行为。例如，对于一个简化的变压器模型，可以使用以下基本电气方程来描述其行为：

变压器感应方程： $V = L \frac{dI}{dt} + RI$

其中 V 是电压， L 是自感， I 是电流， R 是电阻， $\frac{dI}{dt}$ 是电流随时间的变化率。

电缆电容效应： $Q = CV$

其中， Q 是电荷量， C 是电容， V 是电压。

绝缘子的击穿电压： $V_{\text{击穿}} = K \cdot d$

其中， $V_{\text{击穿}}$ 是绝缘子的击穿电压， K 是材料常数， d 是绝缘子的厚度。

通过这些基本方程，结合设备的物理参数（如变压器的绕组数、电缆的长度和直径、绝缘子的材料特性等），可以计算出在特定条件下，如雷电侵入波作用时，设备的电气响应^[3]。这些响应包括变压器的内部电压和电流分布、电缆的电荷积累和绝缘子的电压承受能力，这些计算不仅有助于理解和预测雷电对各种电气设备的影响，还能指导工程师在设计和改进输电线路时，如何选择适当的材料和结构，以提高整个系统的稳定性和安全性。

(三) 基电流模型和回击模型的应用

基电流模型和回击模型的应用是分析输电线路雷电侵入波的关键环节，它们提供了对雷电波形和强度的准确估计。基电流模型主要用于模拟雷电产生的初始电流波形，这个模型通常包括快速上升的前沿和逐渐衰减的尾部，该模型的参数，如峰值电流、上升时间和衰减常数，直接影响着雷电波在输电线路上的传播特性，这些参数一般基于历史雷电数据或统计分析得出，以确保模型的准确性和实用性。

回击模型则用于描述雷电电流在多次雷击中的变化情况，这对于评估连续雷击对输电线路的影响非常重要，回击模型通常考虑雷电电流在连续雷击中的波形重复性和强度变化，这有助于预测和评估雷电在短时间内多次冲击对输电设施的潜在损害。在应用这些模型时，通常需要结合电磁波传播理论和电路理论，以模拟雷电波在输电线路系统中的传播过程，这包括雷电波在导线上的传输损耗、反射和折射现象，以及在不同类型电气设备上的耦合效应。

三、变电站雷电过电压分析与避雷器布置

(一) 变电站雷电过电压的计算方法

变电站雷电过电压的计算方法涉及复杂的电气工程原理，旨在预测和评估雷电事件中变电站设备可能遭受的过电压影响。在进行过电压计算时，还需考虑变电站内部的复杂电路连接和各种电气设备的特性，例如，变压器的感应效应、断路器的开关状态和电缆的传输特性都会对雷电波的传播产生显著影响^[4]。此外，变电站的接地系统设计也对防止过电压造成的设备损坏至关重要，因为良好的接地系统能有效

表 1 雷电侵入波数学模型的主要参数及其影响

参数	具体内容	影响
波形	雷电波的形状，如尖峰或梯形波	决定波在输电线上的传播速度和衰减
幅值	雷电波的最大电压或电流	影响雷电侵入波对设备的潜在破坏程度
上升时间	雷电波从开始到达峰值的时间	影响波的破坏力和穿透能力
线路长度	输电线的实际长度	较长的线路可能导致波的更大衰减
导线直径	输电线的直径	影响线路的电阻和传输效率
绝缘材料特性	绝缘强度和介电常数	决定线路对雷电波的抵抗能力

地引导雷电电流进入地面，减少内部设备的电压升高。变电站雷电过电压的计算涉及一系列电气工程公式，用于精确地评估雷电事件对变电站设备的影响。以下是一些关键的计算公式：

雷电冲击电流的模拟：通常使用传输线理论来模拟雷电冲击电流的传播，其基本公式可以表示为：

$$I(t) = \frac{V_0}{Z_0} (e^{-\alpha t} \sin(\beta t))$$

其中， $I(t)$ 是时变电流， V_0 是雷电电压的初始幅值， Z_0 是传输线的特性阻抗， α 和 β 是与传输线特性有关的参数， t 是时间。

变电站内部设备的电压响应：变电站内部设备的电压响应可以通过RLC电路模型计算得出，公式如下：

$$V(t) = L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{1}{C} \int I dt$$

其中， $V(t)$ 是设备上的电压响应， L 是电感， R 是电阻， C 是电容， I 是通过设备的电流。

接地系统的电压降：接地系统的电压降计算可以简化为： $V_{\text{接地}} = I_{\text{雷电}} \times R_{\text{接地}}$ 。

其中， $V_{\text{接地}}$ 是接地系统中的电压降， $I_{\text{雷电}}$ 是雷电电流， $R_{\text{接地}}$ 是接地系统的电阻。

这些公式结合雷电电流的特性、变电站内部设备的电气参数和接地系统的设计，以准确评估雷电过电压对变电站的影响。通过这些计算，工程师可以预测雷电事件对变电站的具体影响，从而设计出有效的防雷措施，确保变电站及其设备的安全可靠运行。

（二）避雷器布置方案的制定与校验

避雷器布置方案的制定与校验是确保变电站在雷电环境中安全运行的关键步骤。避雷器的主要作用是在雷电冲击时引导电流进入地面，从而保护变电站的电气设备不受高电压影响。在制定布置方案时，需要综合考虑变电站的地理位置、历史雷电数据、设备布局和电气参数，布置策略包括确定避雷器的类型、数量和具体位置，以实现最佳的保护效果。避雷器的选择是基于其电压电流特性，以及对特定类型雷电冲击的响应能力，例如，金属氧化物避雷器由于具有良好的非线性电压、电流特性，常被选用于防护设备免受雷电冲击。避雷器的数量和布置位置则需要根据变电站的具体布局和设备配置来确定，以确保雷电电流可以有效地被分流和引导。

校验避雷器布置方案的有效性是通过模拟雷电冲击场景并计算预期的电压和电流分布来完成的，这种模拟考虑到避雷器的保护特性和变电站的电气网络结构。校验过程旨在确认布置的避雷器能够在雷电冲击下将过电压控制在安全范围内，并保证所有关键设备不受损害，校验还包括评估避雷器自身的耐受能力，确保它们在雷电冲击下不会被损坏。

四、配电线路雷电防护策略

配电线路雷电防护策略的核心在于最大限度地减少雷电对电力系统的破坏性影响，保障供电的稳定性和安全性，这一策略综合考虑到配电线路的特点和所处环境的雷电活动特征，采用多种技术和方法来提高系统的防雷能力。首先，安装足够数量的避雷器和架空地线是基本的防护措施，避雷器能够在雷电冲击时快速响应，有效引导雷电电流至地面，从而保护线路免受高电压的直接冲击，架空地线则通过在导线上方设置接地的导线来吸引雷电，保护下方的输电线路。其次，改进接地系统也是关键，一个有效的接地系统可以确保雷电电流顺利流入地面，降低雷电冲击造成的电压升高，这包括优化接地体的设计和使用较低电阻率的材料来增强接地效果。此外，配电线路的设计和布局也需要考虑雷电的影响，例如，尽量避免线路经过雷电活动频繁的区域，或者在这些区域使用更强的绝缘材料和结构。配电线路的雷电防护策略是一个多层次、多方位的系统工程，它不仅包括物理防护措施，还涉及技术监测和管理策略的应用，通过这些综合措施，可以显著降低雷电对配电线路的威胁，确保电力系统的稳定和可靠运行。

结论：

通过深入探讨雷电放电的机理和不同类型的雷击，明确了雷电对输电线路的潜在影响，为防护措施的制定提供了理论基础。文中详细阐述输电线路雷电侵入波的数学模型、电气设备的参数计算以及基电流和回击模型的应用，从而可以确保模型的准确性和实用性。本文提供的综合雷电防护对策，为确保输配电线路在雷电多发环境下的稳定运行提供有力的支持，对电力系统的安全性和可靠性具有重要意义。

参考文献：

- [1] 肖庆华. 输电线路设计中线路防雷技术的运用[J]. 科技资讯, 2023, 21(22): 96-99.
- [2] 赵继锋. 基层气象台站综合业务信息系统雷电防护技术探究[J]. 中国设备工程, 2023(20): 243-245.
- [3] 康国耀, 刘刚, 丁振东等. 基于等离子体主动防御的雷电综合防护措施[J]. 机电工程技术, 2023, 52(10): 338-342.
- [4] 翟文鹏. 输配电线路综合雷电防护措施研究[D]. 沈阳工业大学, 2019.

作者简介：李扬帆（1991-），男，汉族，四川德阳人，学士、在职硕士研究生，电力工程工程师，研究方向：输配电及用电工程。