

# 高压输电线路雷击浪涌计算模拟研究

代小敏,赵康文

(国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西 南昌 330096)

**摘要:**在高压输电系统领域,电力基础设施抗雷击性能至关重要。雷击可能引起瞬态过电压,从而导致系统故障、设备损坏,甚至电力供应中断。文中建立的“两塔三线”模型模拟雷电流对高压输电线路的影响,通过检查雷击导致的三相导线上的感应电压,评估潜在的过电压,提出有效的保护措施;以携带20 kA电流的雷击中塔上的一根屏蔽线为例,通过严格的仿真技术计算三相导线上的感应电压。模型包括输电塔的几何形状、输电线路的复杂形状以及地面的不规则性,并易于定义雷击通道及雷电流。

**关键词:**输电线路;雷击;瞬态;过电压;模拟

**中图分类号:**TM 744 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-348X(2025)04-0025-04

## 0 引言

雷电的形成是大气不稳定和温度、湿度差异共同作用的结果。当地面受热,空气上升形成对流云,这些云中的水滴和冰晶在相互碰撞中分离出正负电荷,云的上部积累正电荷,下部积累负电荷。随着电荷的不断积累,云内部和云与地面之间形成了强大的电场。当电场强度达到一定程度时,空气分子被电离,形成导电通道,电子迅速移动,闪电便在这一瞬间诞生。这个过程可能在云内部、云与云之间,或是云与地面之间发生,形成不同类型的闪电。闪电产生的高温使周围空气迅速膨胀,产生声波,这就是随后听到的雷声。此外,雷电的形成还受到地形、季节、气候以及人类活动的影响。

高压输电线路在运行过程中,由于其暴露在自然环境中,容易受到雷电等恶劣气候的影响,导致线路跳闸事故。雷电放电时,产生的强烈电磁场会在输电线路中感应出很高的过电压,这种过电压通常称为雷击浪涌,它包含了丰富的频率成分,具有很高的电压水平和极短的持续时间。雷击浪涌可能对输电线路的电气设备造成损害,雷电引起的过电压还可能引起输电线路的二次系统故障,如自动化设备的误动作等<sup>[1-4]</sup>。

## 1 系统模型

### 1.1 雷电流波形

雷电流常用的数学波形主要有标准冲击波形(双指数函数模型)、Heilde函数模型、脉冲函数模型。根据文献[5-6]结果,Heilde函数模型更适合研究雷电流的实际规律,文中研究的雷电流波形采用Heilde函数模型:

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{(t_d/\tau_1)^n}{1 + (t_d/\tau_1)^n} \cdot e^{-\frac{t_d}{\tau_2}} \quad (1)$$

式中: $t_d = t - \frac{s}{v_c}$ ,  $s$ 为参数化路径; $v_c$ 为脉冲速度; $I_0$ 为

峰值电流; $\eta$ 为修正因子, $\eta = \exp\left[-\frac{\tau_1}{\tau_2} \left(n \times \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}\right]$ ,  $n$

为电流陡度因子; $\tau_1$ 为波头时间常数; $\tau_2$ 为波尾时间常数。

### 1.2 瞬态电磁波模型

高频电磁波可从麦克斯韦安培定律和法拉第电磁感应定律<sup>[7]</sup>表示为:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

对线性材料  $D = \epsilon E$ ,  $B = \mu H$ ,  $J = \sigma E$  的本构关系,上述方程变为:

收稿日期:2024-08-27

作者简介:代小敏(1991),女,硕士,工程师,研究方向为噪声及电磁环境监测。

$$\nabla \times H = \sigma E + \frac{\partial \varepsilon E}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5)$$

式中： $H$ 为磁场强度； $E$ 为电场强度； $D$ 为电位移； $J$ 为电流密度(体积)； $B$ 为磁感应强度； $\varepsilon$ 为介电常数； $\sigma$ 为导电率； $\mu$ 为磁导率。利用磁势的关系表达式 $\mu H = \nabla \times A$ 和 $E = -\partial A / \partial t$ ，麦克斯韦-安培定理变为：

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times A) + \mu_0 \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial A}{\partial t}) = 0 \quad (6)$$

此方程即为所求解的时域波动控制方程，其中： $\mu_0$ 为真空磁导率，取值 $6\pi \times 10^{-7}$  H/m； $\mu_r$ 为相对磁导率； $\varepsilon_0$ 为真空介电常数，取值为 $8.854187817 \times 10^{-12}$  F/m； $\varepsilon_r$ 为相对介电常数； $A$ 为磁势(矢量)。材料的本构关系包含 $B = \mu_0 \mu_r H$ 和 $D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$ 。

## 2 物理模型建立

### 2.1 两塔三线模型及网格划分

结合江西某500 kV高压输电线路的真实原型，取其中地面相对平缓段的两塔三线，建立两塔三线模型，如图1所示。

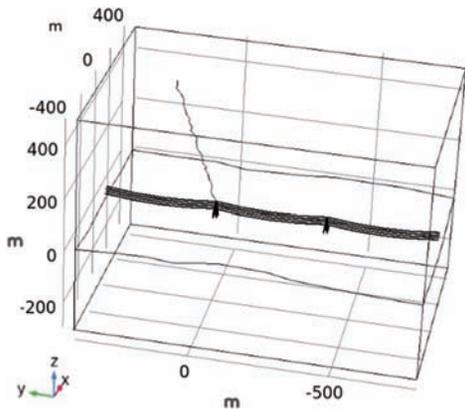


图1 两塔三线及土壤和空域模型

模型包含塔身结构、地线、导线、土壤、空气域、雷击通道，其中地线与塔身作为导通，导线与塔身绝缘未击穿；输电线路以悬链线方程建模，充分考虑了线路的真实形状，会影响到雷电流期间感应电压的分布；考虑地面表面其不规则性对浪涌传播的影响，为确保数值计算的稳定性和准确性，在关键区域如导线到空气界面和电场变化显著的区域进行细网格划分，确保可靠结果，网格划分如图2所示。为便于观察，隐藏了部分边界。

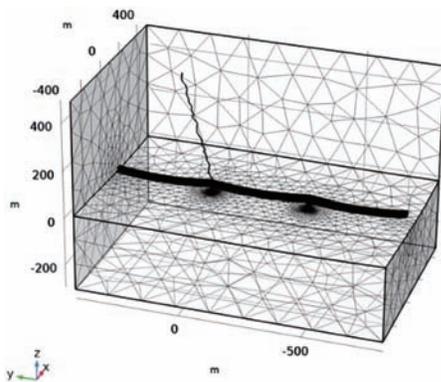


图2 模型网格划分

### 2.2 模型计算参数

仿真时参考文献[2-3,8]雷电流的取值，取 $I_0=20$  kA， $n=10$ ， $\tau_1=10$   $\mu$ s， $\tau_2=350$   $\mu$ s，为1/3真空中光速，雷电流的冲击波形如图3所示。土壤电导率取0.01 S/m，相对介电常数取1，相对磁导率取1，铁塔呼称高为40 m，导线对地最小距离23 m，档距400 m，整个计算域(含土壤)为1 200 m×800 m×800 m。边界条件包括导线、塔表面和雷击通道的数值表示；瞬态分析捕捉了雷电流随时间的变化过程，充分考虑了雷击引起的快速瞬态变化。这种电流分布遵循雷击物理的原理；塔体视为电导体，假设金属的有限电导率损失忽略不计。模型域的外边界采用散射边界。

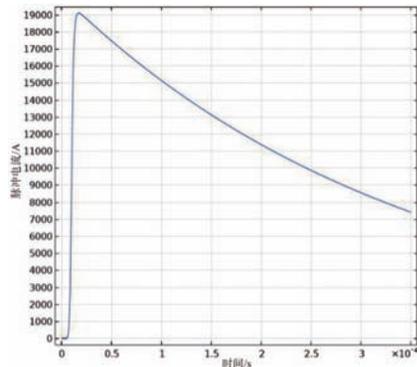


图3 雷电流脉冲波形

## 3 计算结果分析

### 3.1 计算域中的电场分布

计算雷电流波头时间10  $\mu$ s内整个计算域的电场分布情况，计算时间步长为0.05  $\mu$ s。截取雷击点空气域中两个相互垂直的截面，分析空气域中的电场分布，以导线中感应电压出现极值的时间点，分析不同时间的电场分布，图4为1.3  $\mu$ s时的电场分布，图5为

5.3  $\mu\text{s}$  时的电场分布,图6为6.6  $\mu\text{s}$  时的电场分布,图7为9.9  $\mu\text{s}$  时的电场分布。

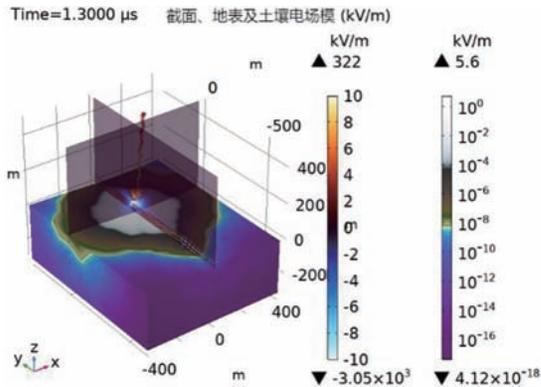


图4 1.3  $\mu\text{s}$  时的电场分布

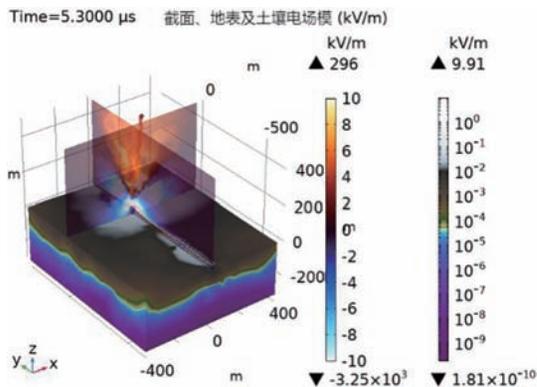


图5 5.3  $\mu\text{s}$  时的电场分布

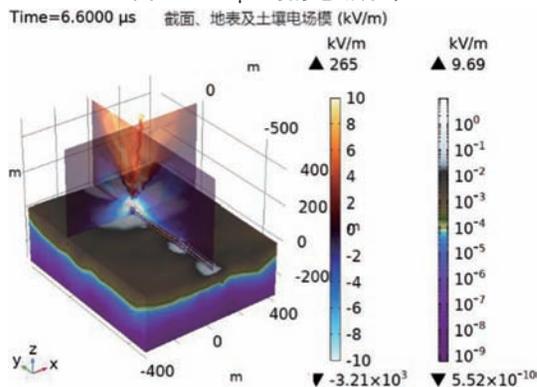


图6 6.6  $\mu\text{s}$  时的电场分布

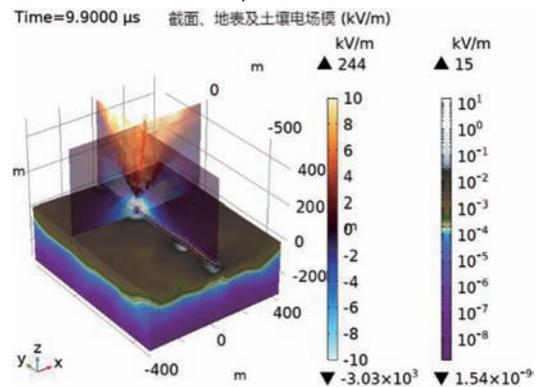


图7 9.9  $\mu\text{s}$  时的电场分布

从上述图中可以清晰看出,当波头时间10  $\mu\text{s}$  内时,在地表和土壤中的电场随着时间的增加,电场的影响范围迅速扩大,对土壤中电场影响的最大深度接近150 m,在计算时间内,地表土壤中的电场最大值达15 kV/m,位于铁塔的底部地面处;整个计算域内,雷击产生的电场超过322 kV/m,分布于雷击点附近。

### 3.2 空气域中截面的电场分布

选取雷击点空气域中垂直导线方向的截面,分析空气域中的电场方向,绘制电场流线图。图8为1.3  $\mu\text{s}$  时的电场方向流线,图9为2.6  $\mu\text{s}$  时的电场流线,图10为5.3  $\mu\text{s}$  时的电场流线。

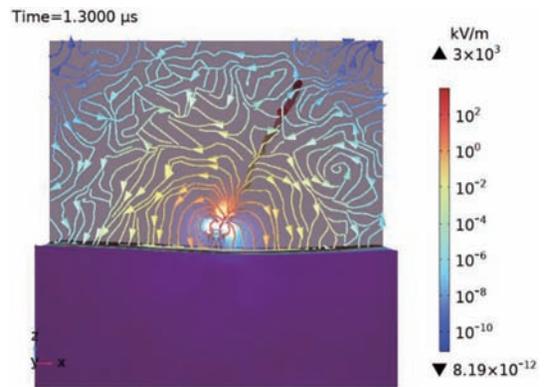


图8 1.3  $\mu\text{s}$  截面上的电场流线

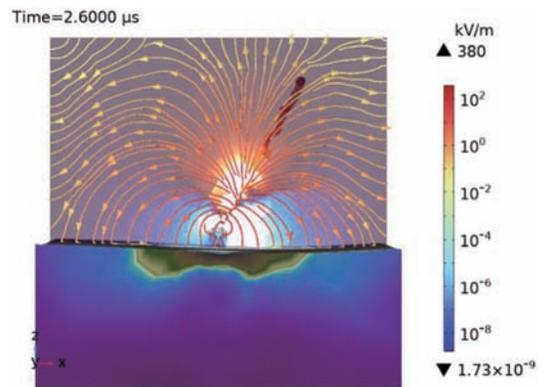


图9 2.6  $\mu\text{s}$  截面上的电场流线

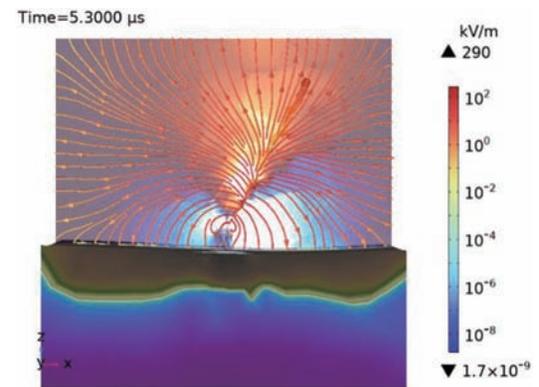


图10 5.3  $\mu\text{s}$  截面上的电场流线

在2.6 μs之前的时间段内,截面上的电场流线比较紊乱,随着时间的增加逐步变得一致,在2.6 μs之后的整个波头时间段内,电场完全按雷击通道形成稳定的流向分布。

### 3.3 导线上的感应电压

根据计算结果,求取了A相、B相、C相在雷电冲击相应时间段内的感应电压,如图11所示。在10 μs内,A相、B相、C相的感应电压变化趋势基本一致;在1.3 μs时导线上出现最大的感应电压,A相感应电压为191 kV,B相感应电压为199 kV,C相感应电压为228 kV;在5.3 μs导线上出现最大负向感应电压,A相感应电压为-113 kV,B相感应电压为-125 kV,C相感应电压为-157 kV,感应电压随时间的变化,总体呈现减弱趋势。

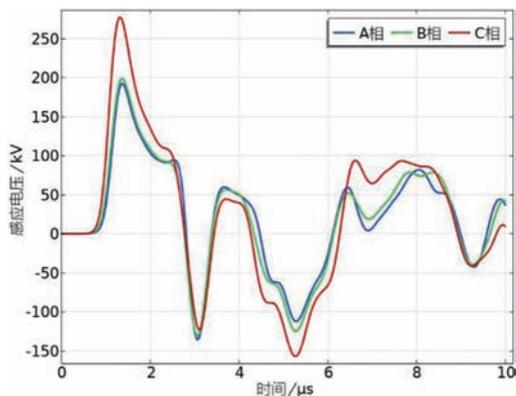


图11 A相、B相、C相在雷电冲击的感应电压波动

## 4 案例分析与防护指导

### 4.1 案例分析

江西某500 kV输电线路丘陵段在雷雨季节频发雷击跳闸,实测C相过电压峰值达215 kV(超绝缘耐受值180 kV)。结合仿真结果,当20 kA雷电流击中屏蔽线时,C相感应电压峰值达228 kV,与实测吻合;地形导致地表电场不均(最大值15 kV/m),加剧接地阻抗;负向电压峰值(-157 kV)可能引发二次放电,与重合闸失败现象一致。

### 4.2 防护指导

基于仿真结果与案例特征,建议运维单位采取以下针对性措施:

- 1) 进行在线监测部署:在高危杆塔安装雷击过电压监测装置,实时采集导线电压波形,结合仿真模型,预警过电压风险(设定阈值为150 kV,触发阈值时自动报警);
- 2) 制定差异化检修策略:雷雨季节前,重点检查

避雷器动作次数、绝缘子串憎水性(针对负向电压导致的沿面放电);

- 3) 应急响应优化:当监测到感应电压峰值>180 kV时,立即对该区段线路进行绝缘电阻测试,优先采用“带电水冲洗”清除绝缘子表面积污,降低闪络概率。

## 5 结语

当雷击中高压输电线路的铁塔时,会在导线上产生感应电压。这种感应电压的大小受多种因素影响,包括雷电流的幅值、雷击点与导线之间的距离、导线的几何尺寸和位置、以及杆塔的结构等。雷电现象是较为复杂的自然现象,文中研究提升对雷电现象的形象认识,加深对雷击现象的深入了解,对雷击过程中截面的电场方向未考虑输电线路自身的电场影响。雷击浪涌是影响高压输电线路安全运行的主要因素之一。通过采取有效的防雷措施和深入的技术研究,可以显著提高输电线路的抗雷性能和系统的整体稳定性。通过对高压输电线路雷击浪涌的深入了解和采取相应的防护措施,可以有效地降低雷电对输电线路造成的危害,保障电网的安全稳定运行。

## 参考文献:

- [1] 郭在华,胡如江.雷电灾害风险评估[M].北京:电子工业出版社,2019.
- [2] 张怡捷,陈云鹏,曹亮.架空线路雷击跳闸情况分析[J].电力与能源,2023,44(06):654-655,660.
- [3] 莫付江,陈允平,阮江军.基于数值电磁场仿真计算的电力杆塔雷击浪涌响应研究[J].高压电器,2006,42(06):413-416.
- [4] 张军强,王选社,盛飞,等.提高输电线路耐雷水平的关键因素影响分析[J].电瓷避雷器,2024(03):105-113.
- [5] 赵玉龙,刘光斌,余志勇.雷电流数学模型MATLAB仿真分析[J].安全与电磁兼容,2012(01):53-55.
- [6] 刘东东,范凯彬,张一博.基于MATLAB的三种雷电流数学模型仿真对比分析[J].科技风,2016(14):15-16.
- [7] 符果行.电磁场与电磁波基础教程[M].北京:电子工业出版社,2012.
- [8] Kaouche S, Nekhoul B. Modeling of lightning surges on a grounding system of a tower cascade[J]. Electr Eng, 2023, 105(02):1125-1139.