

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.01.021

220 kV 输电线路跨江段防雷措施研究

江进波¹, 杨文¹, 马可², 温冉², 赵青², 杨林森¹, 刘畅¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 输电线路中的大跨越线路悬挂高度更高, 地面的屏蔽作用减弱, 线路更易遭受雷击, 为保证线路安全运行, 必须对大跨越档距防雷进行特殊设计。文中针对吉安井冈山水电站 220 kV 送出工程跨赣江部分进行了防雷的综合设计, 通过建立 EMG 三维电气几何模型, 分析计算了侧向避雷针长度与保护距离之间的关系以及架设避雷线短针后的绕击率; 通过建立雷击暂态模型, 仿真分析了接地电阻和耦合地线对雷击过电压的影响。研究表明: 塔头上的侧向避雷针长度为 3 m 时, 保护的距離为 21 m, 线路上加装 1.2 m 短侧针可将线路绕击率降低 93.2%; 降低接地电阻是减小反击过电压的最直接有效措施, 但在土壤电阻率较高地区, 通过架设耦合地线分流能更有效的减小反击过电压。

关键词: 雷击过电压; 侧向避雷针; 耦合地线; 防雷设计

Study on Lightning Protection Measures of 220 kV Transmission Line Section Across River

JIANG Jinbo¹, YANG Wen¹, MA Ke², WEN Ran², ZHAO Qing², YANG Linsen¹, LIU Chang¹

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. State Grid Yichang Power Supply Company, Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: Due to the higher suspension height of large cross section, the ground shielding effective is weaker than the common section, large cross transmission lines are easily hit by lightning. In order to ensure the safe operation of power transmission, the lightning protection of large cross section must be specially designed. In this paper, a comprehensive lightning protection design has provided for the 220 kV electrical power transmission line project of Jing Gangshan hydropower station across Gan river section. By establishing the EMG 3D electrical geometry model, the relationship between side lightning rod length and protection distance is analyzed and the transmission line shielding failure rate is calculated. By establishing lightning transient model, the influence of ground resistance and coupled ground line on lightning overvoltage is simulated and analyzed. It is shown that, when the length of side lightning rod on tower head is 3 m, the protection distance is 21 m; the shielding failure rate can be reduced 93.2% by installation of 1.2 m short side pins on the lines; reducing grounding resistance is the most direct and effective measure to reduce reverse overvoltage, but in high soil resistivity area reverse overvoltage can be reduced more effectively by setting up coupling ground wire.

Key words: lightning overvoltage; side lightning rod; coupling ground wire; lightning protection design

0 引言

220 kV 输电线路是电网的重要组成部分, 其运行情况直接影响到电网的安全稳定运行。根据近年来国内外电网运行经验, 雷击仍是导致架空输电

线路故障的主要原因^[1-3]。根据广东电网 2010—2015 统计数据, 110 kV、220 kV 同塔线路遭受雷击跳闸次数占雷击跳闸总数的 15%~30%, 220 kV 同塔线路雷击跳闸且重合闸失败现象多次发生^[4-5]。从四川电网 2006—2012 统计数据来看, 220 kV 及以

收稿日期: 2019-06-17; 修回日期: 2019-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51707105)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51707105).

上等级输电线路雷击跳闸次数占总跳闸次数的40%~70%,其中,220 kV输电线路绕击引起跳闸的次数占雷击跳闸总次数的89%,绕击引起的线路事故占雷电事故的大部分^[6-7]。根据广西电网对2013年5-8月110 kV及以上等级线路雷击跳闸故障的统计,雷雨季节总共有308次雷击跳闸,雷电导致线路故障问题仍然较为突出^[8]。

针对线路防雷问题,国内外学者进行了大量研究。文[3]、[5]对220 kV同塔线路差异化防雷措施进行了研究,在常规防雷的基础上采用回路间不平衡绝缘方法;线路防雷改造多采用加装线路避雷器、加装避雷线。文[6]采用仿真软件建立了220 kV线路雷击电磁暂态分析模型,研究了线路避雷器的有效保护范围与绕击高电位转移特性以及雷害治理与杆塔接地电阻的配合关系问题。文[9-12]采用加装侧向避雷针的方法防雷电绕击,根据建立的三维电气几何模型分析了杆塔横担上面安装侧向避雷针长度和位置的影响。文[13-14]采用降低接地电阻的方法防雷电反击,建立了雷电反击仿真模型,研究了不同大小接地电阻对耐雷水平的影响。文[15-16]采用架设耦合地线的方法防雷电反击,分析了耦合地线的架设方式对线路防雷效果的影响。

吉安井冈山水电站—澄江变220 kV跨越赣江段线路,因线路离江面距离较高,地面对雷电屏蔽的作用减弱,线路发生反击和绕击的概率更高^[17-18]。此外,当杆塔所处地层成分复杂、土壤的电阻率较高时,接地电阻相对较高,反击过电压难以降低,容易发生反击^[9]。文中根据工程背景结合输电线路防雷综合设计规范,在参考上述研究方法的基础上,建立了雷电绕击三维电气几何模型和ATP-EMTP的雷击仿真模型,通过理论分析和仿真验证了减小雷电绕击和反击方法的可行性,确定跨江段输电线路的综合防雷保护措施。

1 雷电绕击三维电气几何模型

雷电绕击通常需要根据电气几何模型(electro geometrical model, EGM)进行相关计算^[20],见图1。根据IEEE std 1997中所使用的击距公式^[9]

$$r_s = 10I^{0.65} \quad (1)$$

式(1)中: r_s 为导线的击距,m; I 为雷电流的峰值,kA。

在没有安装侧向避雷针时,导线在紧靠杆塔区域内被杆塔屏蔽保护,该区域称为安全区,导线很少会发生绕击;导线在离杆塔较远的区域内,杆塔导致电场发生畸变产生引雷作用,导线很容易发生绕击;导线在离杆塔很远的区域内,杆塔对电场作

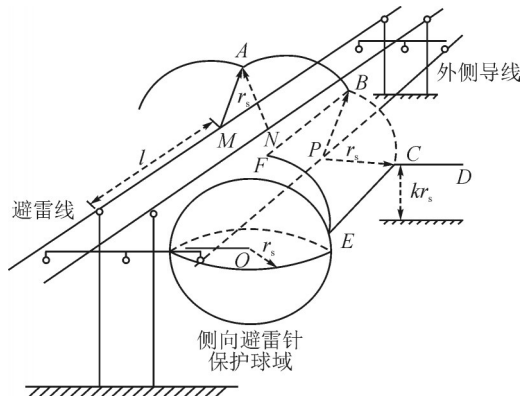


图1 EGM三维电气几何模型

用影响非常小,该区域称为正常区,导线一般不会发生绕击^[16]。此外,弧垂效应导致避雷线靠近杆塔处的保护角大于档距中央的保护角,因此杆塔附近发生绕击的概率更大。

2 侧向避雷针及侧向短针安装方案

针对220 kV线路绕击特点,可在直线杆塔横担上面安装侧向避雷针,在避雷线上安装侧向短针。根据三维EGM模型,确定避雷针的尺寸以及安装位置。

根据文[11]可知,220 kV线路易发生绕击的区域位于距离杆塔约7~20 m处。220 kV线路绝缘子串采用16片U120BP/146-2绝缘子组成,其50%的冲击闪络电压为1.92 MV。计算得到线路的绕击耐雷水平为19.2 kA,此时对应的击距约为68 m。当雷电流幅值变化时,对应的击距将会减小,雷电流为12 kA时,对应的击距为50 m。以侧向避雷针的尖端为圆心,击距为半径作圆,当离杆塔20 m处的BC弧面位于圆内,则危险区域能够完全屏蔽,经计算塔头横担上的侧向避雷针长度为3 m时,保护的距離为21 m,能够满足设计的要求。虽然侧向避雷针的长度越长,其所保护的距離越长,但考虑到抗风荷、施工难易程度、保护效果和成本效应,选用侧向避雷针的长度为3 m,为加强其抗风性能,在横担上采用横材加固,避雷针伸出横材的长度约为1.5 m,塔头横担上侧向避雷针的安装效果见图2。

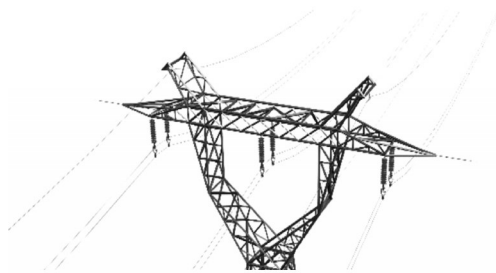


图2 横担上的侧向避雷针效果图

Fig. 2 Lateral lightning rod effect on the cross arm

3 m 侧向避雷针的保护范围有限, 稍远离塔头的区域仍有一定的绕击率, 为降低此区域的绕击率, 还需在避雷线上加装侧向短针, 避雷线与导线之间的位置关系见图 3。根据文中跨江段直线杆塔参数可知, 避雷线与导线之间的垂直距离为 5.5 m, 水平距离为 1.4 m。

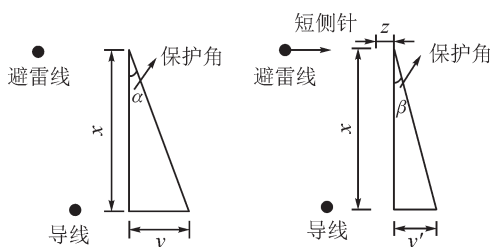


图 3 短侧针侧对保护角的影响

Fig. 3 Short side impact on the protection angle

由图 3 可知

$$\tan \alpha = \frac{y}{x} \quad (2)$$

$$\tan \beta = \frac{y'}{x} = \frac{y-z}{x} \quad (3)$$

式(2)、(3)中, α 为避雷线对边导线的保护角, 此时避雷线的保护角为 14.28° 。安装避雷线短侧针后, 可近似认为是将避雷线外移, 短侧针长度为 z , 此时线路保护角为 β 。

雷电发生绕击的概率与杆塔高度、地形地貌和保护角等有关。按照 DL/T 620—1997 标准, 绕击率 P_a 可用式(4)计算。

$$\lg P_a = \frac{\alpha \sqrt{h}}{86} - 3.9 \quad (4)$$

式(4)中: α 为避雷线保护角, $(^\circ)$; h 为杆塔的高度, m; P_a 为线路雷电绕击闪络率。

跨江段直线杆塔的高度为 68 m, 计算侧向短针长度从 1.10~1.35 m 时的保护角和绕击率见表 1。

表 1 不同长度侧向短针对应保护角和绕击率

Table 1 Different lengths of the lateral direction are short for the protection angle and the shielding rate

侧向短针长度/m	保护角 $\alpha/(^\circ)$	绕击率
0.00	14.280	0.002 95
1.10	3.122	0.000 25
1.15	2.603	0.000 22
1.20	2.083	0.000 20
1.25	1.562	0.000 18
1.30	1.042	0.000 16
1.35	0.521	0.000 14

未加装短侧针时, 保护角为 $\alpha=14.28^\circ$, 绕击率为 0.002 95。文中, 侧向短针架设在离杆塔 25 m 左右的位置, 短侧针的长度为 1.2 m, 加装短侧针后的保

护角 $\beta=2.083^\circ$, 绕击率为 0.000 20, 避雷线的保护角明显减小, 绕击率降低了 93.2%。由此可知, 安装避雷线短侧针能够很大程度降低线路的绕击率。

避雷线上的短侧针无法像塔头上侧向避雷针那样安装固定, 一般情况下, 避雷线加装短侧针时需在尾部增加 1 个重球来保证侧针平衡。侧针碰到较恶劣天气条件下容易脱落在导线上, 发生短路事故, 因此线路侧针的固定问题需要重点考虑。文中设计了一种新型的避雷线短侧针, 其安装的效果图见图 4。用两个预绞丝线夹把侧针挂在地线上, 结构稳定, 容易保持平衡, 在降低线路绕击率的同时, 又可起到防震锤的作用。

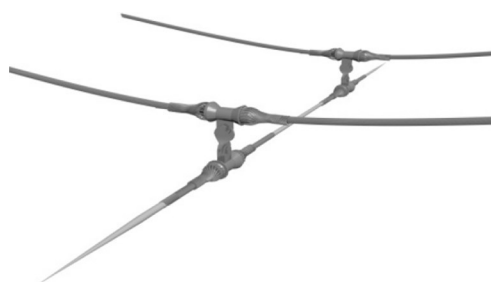


图 4 避雷线侧向短针效果图

Fig. 4 Side view of the lightning protection line

3 雷电反击仿真模型

利用电磁暂态分析软件 ATP-EMTP, 可构建跨江段线路反击模型, 通过计算反击过电压的大小, 对防反击措施的有效性进行验证。在防雷仿真计算模型中, 考虑到雷电流传递过程与特征阻抗、传播速度参数和频率大小有关, 架空输电线路仿真模型一般采用 J.Marti 模型。文中跨江段的线路模型也采用 J.Marti 模型, 在 ATPDraw 内选用架空线路 LCC 模型。

在发生雷电反击时, 雷电波会在杆塔中发生折返射, 文中反击模型中采用多层传输塔和接地电阻相结合的多波阻抗模型。多层传输塔各部分由阻尼电阻、电感并联支路, 分布参数的无线损构成。阻尼电阻 R_{ii} 和阻尼电感 L_{ii} 根据 Yamada 的推导公式见式(5)~(7)。

$$R_{ii} = \frac{-2Z_{ii} \ln \sqrt{\gamma}}{h_1 + h_2 + h_3} \quad (5)$$

$$L_{ii} = \varphi \frac{(h_1 + h_2 + h_3)}{v} \quad (6)$$

$$R_{i3} = -2Z_{i2} \ln \sqrt{\gamma} \quad (7)$$

式(5)~(7)中: Z_{ii} 为塔波阻抗, Ω ; h_1, h_2, h_3 塔的每一段高度, m; v 为光速; γ 为衰减系数; φ 为阻尼系数。多波阻抗模型见图 5。

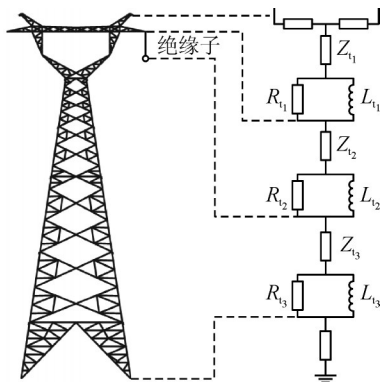


图5 跨江段直线塔多波阻抗模型

Fig. 5 Multi-wave impedance model of linear tower across river sections

仿真模型中,雷电流采用 $2.6/50 \mu\text{s}$ 双指数波形,计算公式见式(8)。

$$i(t) = 1.058 I_m (e^{-15000t} - e^{-1860000t}) \quad (8)$$

在雷电反击仿真计算中,通常用相交法作为绝缘子闪络的判断方法。当过电压的幅值大于伏秒特性曲线的幅值时,绝缘子会发生闪络现象,第一个交点的电压即为绝缘子闪络电压,绝缘子的闪络可作为跨江段输电线路耐雷性能指标。

文中在 220 kV 跨江段输电线路反击中,将绝缘子串负极性的 50% 放电电压作为耐雷性能的基本判据。ATP 中采用压控开关连接导线和杆塔的方法模拟绝缘子,当压控开关电压大于 50% 放电电压时,开关导通即绝缘子发生闪络。在仿真设计中,跨江段的绝缘子采用 U120BP/146-2,雷电冲击闪络电压为 120 kV,按照 220 kV 采用 13 片绝缘子计算,绝缘子串的雷电冲击闪络电压为 1.56 MV。当绝缘子上的电压水平超过 1.56 MV 时,绝缘子发生闪络。

线路工频电压模型需要考虑到瞬时电压的极性和幅值。对 220 kV 输电线路,系统最大运行电压取标称电压的 1.1 倍为 252 kV,则可根据式(9)计算得到架空输电线路单相对地电压峰值为 205.757 kV。

$$U_m = 1.1 \frac{u_p}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} \quad (9)$$

工频电压以 A 相位基准相, A 相初始电压相角设置为 0° , A、B、C 三相正序排列,则输电线路三相工频电压参数见式(10)。

$$\begin{cases} u_A = U_m \cos(100\pi t) \\ u_B = U_m \cos(100\pi t - 120^\circ) \\ u_C = U_m \cos(100\pi t + 120^\circ) \end{cases} \quad (10)$$

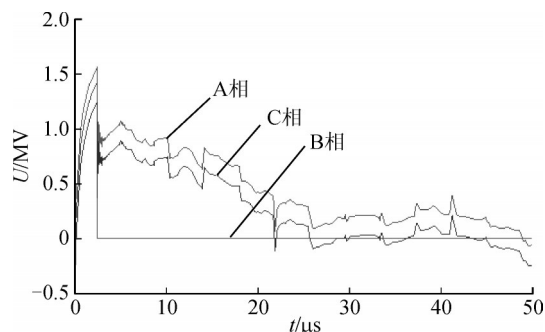
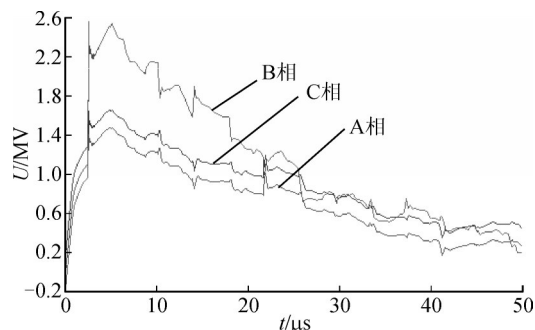
采用三相交流电压源作为线路工频电压模型,在 ATP 仿真模型中设置三相交流电压参数。

4 跨江段线路反击措施

反击包括雷击杆塔和雷击避雷线,防止雷电反击的方法主要有降低接地电阻和架设耦合地线,当电阻率较高导致接地电阻难以降低时,通常采用架设耦合地线的方法。通过改变接地电阻大小和架设耦合地线进行反击仿真计算,对比绝缘子和线路上的电压波形和电压峰值变化,能够清晰直观的反映出防反击的效果。

4.1 不同接地电阻大小仿真分析

根据 220 kV 线路基本参数,搭建基于 ATP-EMTP 的雷电反击线路仿真模型,雷电反击塔顶,当接地电阻为 20Ω 时,绝缘子和线路上的波形分别见图 6、7。

图6 接地电阻 20Ω 时绝缘子上的电压波形Fig. 6 Voltage waveform on the insulator when the grounding resistance is 20Ω 图7 接地电阻 20Ω 时线路上的电压波形Fig. 7 Voltage waveform on the line when the grounding resistance is 20Ω

雷电反击塔顶,当接地电阻为 15Ω 时,绝缘子和线路上的波形分别见图 8、9。

当接地电阻为 20Ω 时, B 相绝缘子上的峰值电压大于 1.56 MV, 发生闪络现象。接地电阻为 15Ω 时,绝缘子上未发生闪络现象。

接地电阻为 25、20、15、10、5 Ω 时,得到 A、B、C 三相绝缘子和线路上的电压峰值分别见图 10、11。

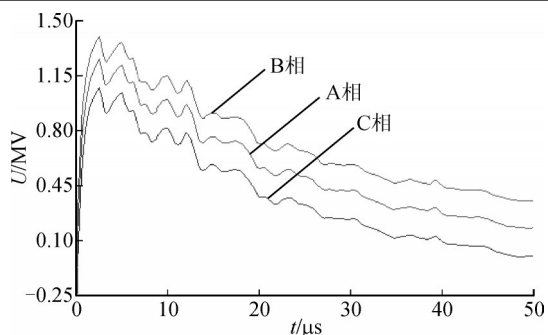


图8 地电阻15 Ω时绝缘子上的电压波形

Fig. 8 Voltage waveform on the insulator when the ground resistance is 15 Ω

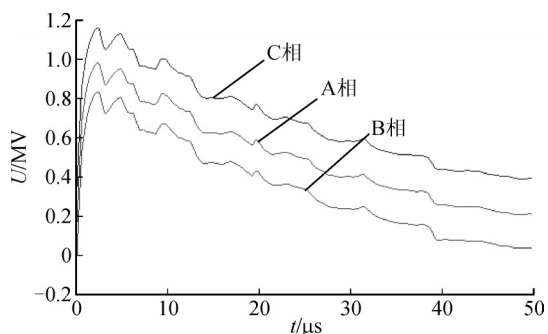


图9 地电阻15 Ω时线路上的电压波形

Fig. 9 Voltage waveform on the line when the ground resistance is 15 Ω

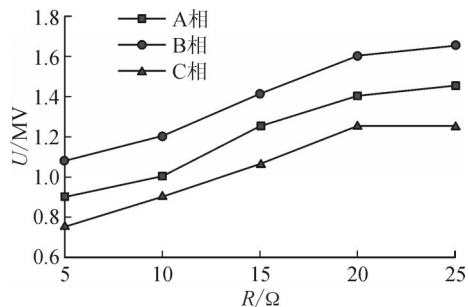


图10 不同接地电阻绝缘子上的峰值电压

Fig. 10 Peak voltage across different grounding resistor insulators

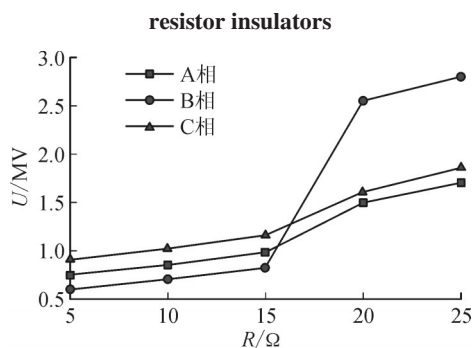


图11 不同接地电阻线路上的峰值电压

Fig. 11 Peak voltage on different grounding resistor lines

雷电反击避雷线, 接地电阻为25、20、15、10、5 Ω时, 得到A、B、C三相绝缘子上的电压波形见图12。线路上的电压波形见图13。

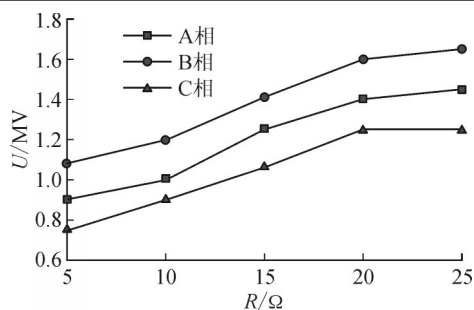


图12 不同接地电阻绝缘子上的峰值电压

Fig. 12 Peak voltage across different grounding resistor insulators

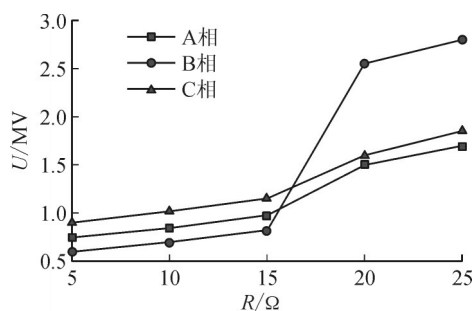


图13 不同接地电阻线路上的峰值电压

Fig. 13 Peak voltage across different grounding resistor lines

从雷电反击塔顶、避雷线仿真得到的峰值电压可知, 雷电反击塔顶和避雷线的电压峰值基本相同, 随着接地电阻的增加, 绝缘子和线路上的电压峰值依次增加, 当接地电阻大于15 Ω时, 绝缘子上的电压峰值大于1.56 MV, 很容易发生闪络, B相线路上的电压急剧上升。

4.2 跨江段架设耦合地线防反击仿真分析

文中跨江段线路地形地质复杂, 电阻率较高, 降低接地电阻较为困难, 因此考虑采用架设耦合地线的方法来降低反击过电压。

耦合地线架设于中间导线下方偏左的位置, 仿真中耦合地线位置见图14。接地电阻为20 Ω时, 进行反击仿真计算, 三相绝缘子和线路上的电压波形分别见图15、16。

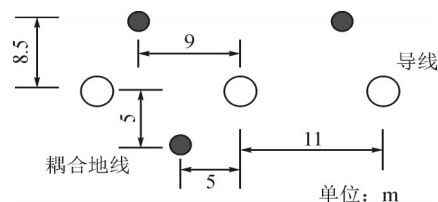


图14 耦合地线架设方式图

Fig. 14 Coupling grounding erection diagram

架设耦合地线后, 相同大小的接地电阻条件下, 绝缘子和线路上的电压峰值明显降低。接地电阻为20 Ω时, 绝缘子上面没有出现闪络现象, 能够起到很好的防反击作用。

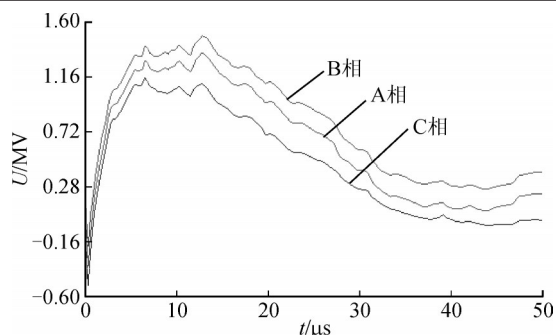


图15 架设耦合地线后绝缘子上的电压波形

Fig. 15 Voltage waveform on the insulator after erecting the grounding wire

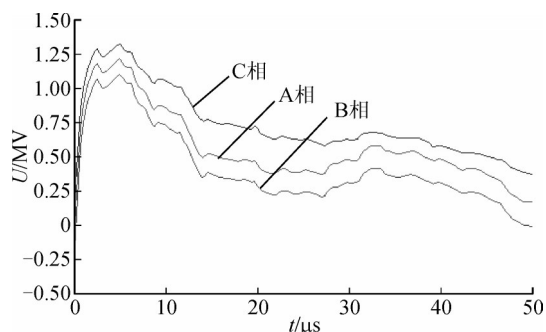


图16 架设耦合地线后线路上的电压波形

Fig. 16 Voltage waveform on the line after erecting the grounding wire

5 结论

文中结合跨江段线路特点,在采用常规防雷措施的基础上,通过在塔头横担上架设侧向避雷针,距塔头约25 m处加装了侧向短针,减小接地电阻,加装耦合地线等措施来减小雷击过电压,有以下结论:

1)塔头侧向避雷针和避雷线上的侧向短针可有效减小线路的绕击率。为加强侧向避雷针其抗风性能,在横担上需采用横材加固,侧向短针用两个预绞丝线夹将其悬挂在避雷线上既保证了结构的稳定性,又可起到防震的作用。

2)雷电反击塔顶和避雷线的电压波形和电压峰值基本相同,随着接地电阻的增加,绝缘子和线路上面的电压峰值依次增加,当接地电阻大于15 Ω时,绝缘子上的电压峰值大于1.56 MV发生闪络。

3)架设耦合地线后,当杆塔受到雷电反击时,其与导线产生耦合作用,提高导线的感应电压,从而减小绝缘子两端压差,有效保护绝缘子,同时耦合地线可以进一步向周围杆塔分流,降低雷击塔顶电压,能够起到很好的防反击作用。

参考文献:

[1] 万 帅,张 伟,陈家宏,等. 特高压±800 kV 直流输电线

路用避雷器的研制[J]. 高压电器, 2017, 53(05):48-55.

WAN Shuai, ZHANG Wei, CHEN Jiahong, et al. Development of lightning arrester for UHV ±800 kV DC transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(5):48-55.

[2] 郭锦波,谷山强,万 帅,等. ±400 kV 青藏直流线路防雷特性研究[J]. 高压电器, 2018, 54(2):84-90.

WU Jinbo, GU Shanqiang, WAN Shuai, et al. Research on lightning protection characteristics of ±400 kV Qingzang DC line[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(2):84-90.

[3] 彭向阳,余占清,李志峰,等. 同塔4回输电线路差异化防雷效果仿真分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(3):732-740.

PENG Xiangyang, YU Zhanqing, LI Zhifeng, et al. Simulation analysis of different lightning protection effect on 4 transmission lines in the same tower[J]. High Voltage Technology, 2014, 40(3):732-740.

[4] 彭向阳,詹清华,周华敏. 广东电网同塔多回线路雷击跳闸影响因素及故障分析[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 81-87.

PENG Xiangyang, ZHAN Qinghua, ZHOU Huamin. Influencing factors and fault analysis of lightning strike trip of guangdong power grid on the same tower[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 81-87.

[5] 彭向阳,金 亮,王 锐,等. 220 kV 同塔线路雷击同跳故障分析及防治措施[J]. 电瓷避雷器, 2018(4):65-71.

PENG Xiangyang, JIN Liang, WANG Rui, et al. Analysis and prevention measures of lightning strikes on 220 kV towers with the same tower[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(4): 65-71.

[6] 陈忠明,廖文龙,刘守豹,等. 220 kV 线路避雷器雷电绕击保护范围及优化应用研究[J]. 电瓷避雷器, 2018(3): 106-110.

CHEN Zhongming, LIAO Wenlong, LIU Shoubao, et al. Research on lightning protection range and optimization application of 220 kV line arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(3): 106-110.

[7] 赵 淳,阮江军,李晓岚,等. 输电线路综合防雷措施技术经济性评估[J]. 高电压技术, 2011, 37(2):290-297.

ZHAO Wei, YAN Jiangjun, LI Xiaolan, et al. Technical and economic evaluation of integrated lightning protection measures for transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 290-297.

[8] 余寿全. 广西电网架空输电线路雷击跳闸及影响因素分析[J]. 广西电力, 2013, 36(6):72-75.

YU Shouquan. Analysis of lightning strike tripping and its influencing factors on overhead transmission lines in guangxi power grid[J]. Guangxi Electric Power, 2013, 36(6): 72-75.

[9] 沈志恒,赵斌财,周 浩,等. 铁塔横担侧向避雷针的绕击保护效果分析[J]. 电网技术, 2011, 35(11):169-177.

SHEN Zhiheng, ZHAO Bincai, ZHOU Hao, et al. Analy-

- sis of the shielding protection effect of lateral lightning rods on the crossing of towers[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 169-177.
- [10] 杨振伟, 周江波, 代晓光, 等. JG 及 ZGUT 型铁塔防绕击避雷针的应用[J]. 电力建设, 2012, 33(5): 82-85.
YANG Zhenwei, ZHOU Jiangbo, DAI Xiaoguang, et al. Application of JG and ZGUT type tower anti-winding lightning rods[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(5): 82-85.
- [11] 沈志恒, 赵斌财, 周浩, 等. 输电线路地线上安装水平侧向短针的防绕击效果分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 905-913.
SHEN Zhiheng, ZHAO Bincai, ZHOU Hao, et al. Analysis of anti-winding effect of horizontal short needles installed on transmission line ground[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 905-913.
- [12] 于竞哲, 周浩. 铁塔横担侧向避雷针对特高压交流线路的绕击保护效果分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 47-52.
YU Jingzhe, ZHOU Hao. Analysis of the effect of lateral lightning protection on the UHV AC line in the cross-arrangement of the tower[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 47-52.
- [13] 曹晓斌, 高竹青, 马御棠, 等. 雷击下 500 kV 杆塔接地装置的散流有效性[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1596-1601.
CAO Xiaobin, GAO Zhuqing, MA Yutang, et al. Scattering effectiveness of 500 kV tower grounding device under lightning strike[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1596-1601.
- [14] 韩聪颖. 特高压交流输电线路防雷技术研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
HAN Congying. Research on lightning protection technology for UHV AC transmission lines[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [15] 张龙伟, 朱军, 吴广宁, 等. 耦合地线对交直流同塔输电线路电气特性的影响及规律分析[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1252-1257.
ZHANG Longwei, ZHU Jun, WU Guangning, et al. Influence and law analysis of coupling ground wire on electrical characteristics of AC and DC transmission lines[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1252-1257.
- [16] 张思寒. 耦合地线架设方式对 220 kV 同塔双回路输电线路反击防雷效果的研究[J]. 电瓷避雷器, 2016(1): 105-111.
ZHANG Sihan. Study on the lightning protection effect of 220 kV double-circuit transmission line on the same tower by coupling grounding erection method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(1): 105-111.
- [17] 王志勇, 余占清, 李雨, 等. 基于先导发展法的特高压直流输电线路绕击特性分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2178-2184.
WANG Zhiyong, YU Zhanqing, LI Yu, et al. Analysis of shielding characteristics of UHVDC transmission lines based on pilot development method[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2178-2184.
- [18] 赵立进, 袁明仁, 谭进, 等. 高原山地 500 kV 输电线路雷电屏蔽特性试验研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1663-1669.
ZHAO Lijin, YUAN Mingren, TAN Jin, et al. Experimental study on lightning shielding characteristics of 500 kV transmission lines in plateau mountains[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1663-1669.
- [19] 张家祥, 张桂林. 杆塔接地体冲击对输电线路雷电反击分析[J]. 电瓷避雷器, 2016(6): 171-175.
ZHANG Jiaxiang, ZHANG Guilin. Analysis of lightning counterattack on transmission lines caused by earthquake impact of tower tower[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(6): 171-175.
- [20] ARMSTRONG H R, WHITEHEAD E R. Field and analytical studies of transmission line shielding[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1968, PAS-87(1): 270-281.
- 江进波(1988—), 男, 博士, 讲师, 硕导, 主要从事高电压与绝缘技术、脉冲功率技术、输电线路防雷接地等方面的研究工作。
- 杨文(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高电压与绝缘技术。