

# 500 kV同塔双回交流输电线路绕击耐雷性能及防雷措施研究

王 祥

国网重庆市电力公司检修分公司, 重庆  
Email: 236778326@qq.com

收稿日期: 2021年2月6日; 录用日期: 2021年2月26日; 发布日期: 2021年3月4日

## 摘 要

500 kV架空输电线路分布较广, 常常穿越海拔较高、气象环境恶劣或地理环境复杂的山区, 因其特殊的走势分布, 所以容易遭受雷击。架空输电线路的雷击相对于其他自然灾害引起的线路故障来说, 比重较大。尤其在多雷区、土壤电阻率高、地形复杂的地段, 雷电的危害更是突出。因此, 保证500 kV架空输电线路安全稳定的运行, 减少雷电对线路的危害就成了线路安全运行的关键条件, 这也突出了输电线路防雷的重要性。在讨论输电线路的防雷方式时, 要根据线路的具体情况来实行分析。在本篇论文中, 我从两个方面来对线路防雷进行分析, 第一个是对线路防雷起着重要作用的各种因素的讨论, 包括杆塔高度对绕击耐雷性能的影响、地面倾角对绕击耐雷性能的影响、保护角对绕击耐雷性能的影响、导线排列方式对绕击耐雷性能的影响; 第二方面是阐述输电线路对降低雷击采取的综合措施, 包括架设旁路架空地线、减小保护角、可控放电避雷针、架设耦合地线等措施。最后, 综合以上分析以及措施对各种防雷方式的效果及成本分析对本文进行总结, 得出能有效防雷的小结。

## 关键词

500 kV架空输电线路, 雷击, 保护角, 并联保护间隙

## Research on Shielding Lightning Performance and Lightning Protection Measures for 500 kV Double Circuit AC Transmission Lines on the Same Tower

Xiang Wang

Maintenance Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing  
Email: 236778326@qq.com

Received: Feb. 6<sup>th</sup>, 2021; accepted: Feb. 26<sup>th</sup>, 2021; published: Mar. 4<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

500 kV overhead transmission lines are widely distributed and often pass through mountainous areas with high altitudes, harsh weather conditions or complex geographic environments. Because of their special trend distribution, they are prone to lightning strikes. Lightning strikes on overhead transmission lines have a larger proportion than line failures caused by other natural disasters. Especially in areas with many mines, high soil resistivity, and complex terrain, the hazards of lightning are even more prominent. Therefore, ensuring the safe and stable operation of 500 kV overhead transmission lines and reducing the hazards of lightning to the line has become a key condition for safe line operation, which also highlights the importance of lightning protection for transmission lines. When discussing lightning protection methods for transmission lines, analysis should be carried out according to the specific conditions of the line. In this paper, I analyze the lightning protection of the line from two aspects. The first is the discussion of various factors that play an important role in the lightning protection of the line, including the influence of the height of the tower on the lightning protection performance of the shielding strike, the influence of the ground inclination angle on the lightning resistance of shielding strikes, the influence of the protection angle on the lightning resistance of shielding strikes, and the influence of wire arrangement on the lightning resistance of shielding strikes. The second aspect is to describe the comprehensive measures taken by transmission lines to reduce lightning strikes, including erecting overhead bypasses. Measures include grounding, reducing the protection angle, controllable discharge lightning rods, and setting up coupled grounding wires. Finally, this paper summarizes the above analysis and the effect and cost analysis of various lightning protection methods, and obtains a summary of effective lightning protection.

## Keywords

500 kV Overhead Transmission Line, Lightning Strike, Protection Angle, Parallel Protection Gap

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

架空线路是我国电力系统的重要组成部分，其运行状态决定了电力系统能否安全、可靠、稳定地运行。据我国高压输电线路运行事故统计表明，由雷击引起线路跳闸事故约占线路总跳闸事故的 40%~70% [1] [2] [3]。雷击引起的事故已经成为了输电线路的主要故障之一。在一些雷电活动较为频繁、土壤电阻率较高、地形较为复杂的地区，线路遭受雷击而发生事故的更大。随着经济的发展，电力线路的电压等级逐渐升高，由雷击引发的线路跳闸事故也日益增多。因此，准确评估线路的防雷性能对提高电力系统运行的稳定性具有重要意义。

由于 500 kV 输电线路已经成为了我国输电网的主干网，因此保证 500 kV 电网的安全稳定运行是摆在电力工作者面前的难题。据统计近年 500 kV 高压输电线路雷击跳闸次数，呈逐年递增的态势。同时江西省的地形又多为复杂的山区地形且处于雷电频发、雷电流幅值较大的地区。

目前 500 kV 输电线路多为同塔双回，引雷面积大，极易遭受到雷击，特别是对于山谷间大跨度的杆塔常发生绕击跳闸事故[4] [5]。统计表明，绕击是引起线路跳闸的主要原因。因此，对输电线路雷电绕击进行分析，对于影响同塔双回输电线路防雷性能的敏感因素：地面倾角、接地电阻、保护角、导线的排

列方式等进行研究分析是十分必要的。

## 2. 500 kV 同塔双回输电线路绕击耐雷性能研究分析

### 2.1. 杆塔高度对绕击耐雷性能的影响

杆塔越高，其引雷宽度越大，遭受雷击的概率越大。在 EGM 理论中，随着杆塔高度的不断升高，地面对导线的屏蔽作用逐渐降低，绕击跳闸率升高。本文在分析塔高对绕击防雷性能影响的时候，选用地面倾角为  $0^\circ$ ，雷电日 40 天的情况。在塔型塔头尺寸不变的情况下，通过改变塔身高度，分析不同杆塔高度对绕击耐雷性能的影响。本文设定研究对象的杆塔为伞型塔，给定的塔头尺寸的地线保护角均为负角，最小的保护角达  $-20^\circ$ ，地线基本可以实现对上相导线实现完全屏蔽。因此上相导线基本很少发生绕击事故，而中相和下相导线则更容易遭受绕击。

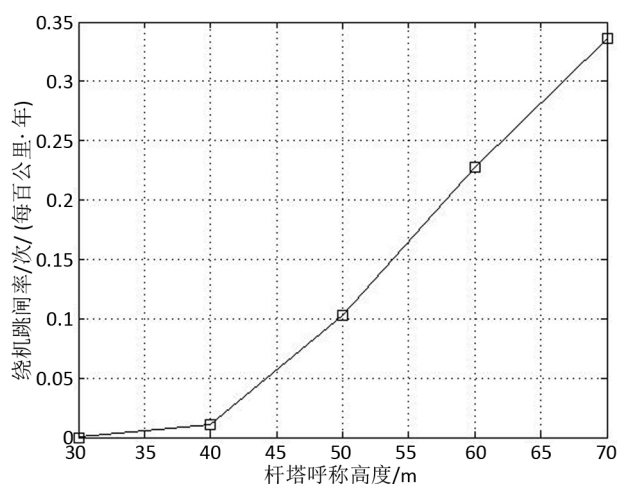
通过 EMTP 软件对 500 kV 输电线路进行建模仿真，分析其绕击耐雷性能。即建立 500 kV 输电线路的绕击模型，该模型采用基于电气几何模型法(电气几何模型法提出绕击率与雷电流幅值有关的观点，考虑导线高度、地面倾角等因素的影响)，通过各因素得变化导致雷电绕击跳闸次数来反映出各因素对于绕击耐雷性能的影响，该模型先通过计算对应的最最小与最大击距，进而分析击距范围内的落雷概率，从而得出绕击跳闸率。对于选取导线排列方式为同相序。从表 1 可看出，计算得出在绝缘子干弧距离为 3.98 m 时，该输电电路上相的绕击耐雷水平为 12.6 kA，中相 11.5 kA，下相 11.5 kA。

**Table 1.** Effect of tower height on lightning resistance

**表 1.** 杆塔高度对绕击耐雷性能的影响

塔身高度/m	30	40	50	60	70					
跳闸率/次/(百公里·年)	上相	0	上相	0	上相	0	上相	0	上相	0
	中相	0	中相	0	中相	0	中相	0	中相	0
	下相	0	下相	0.0063	下相	0.0526	下相	0.1151	下相	0.169
	总计	0	总计	0.0125	总计	0.1053	总计	0.2303	总计	0.338

计算条件：平原，雷电日 40 天，给定塔头。



**Figure 1.** Break trip rate at different tower heights

**图 1.** 不同塔高下的绕击跳闸率

由图 1 不同塔高下的绕击跳闸率中可以看出 500 kV 输电线路的跳闸率随杆塔高度增加而升高，即绕

击防雷性能是随着杆塔高度的增加而降低，在地面倾角为  $0^\circ$  的情况下，给定塔头的地线保护角可以很好地实现对上相和中相导线的完全屏蔽。由于杆塔是伞型结构，下相横担的长度较长，地线保护角也较大。因此，地线对下相导线的屏蔽作用较弱，下相导线发生绕击的概率最大。

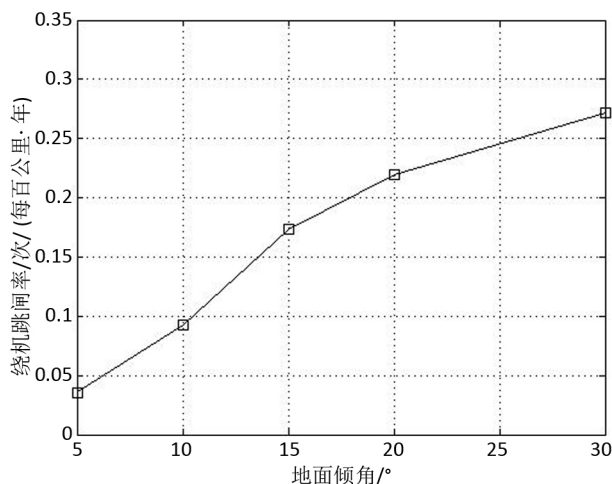
## 2.2. 地面倾角对绕击耐雷性能的影响

地面倾角是影响绕击耐雷性能的一个重要因素，地面倾角的变化将使对地击距发生变化，导致暴露弧发生变化，从而影响绕击跳闸率。因此本文建立与 1.1 相同的绕击模型，其中条件变为以地面倾角为自变量；本文以给定塔头在塔身高度为 40 m 的条件下，改变地面倾角的角度，分析研究各种地面倾角下的绕击耐雷性能，结果如表 2 所示。

**Table 2.** Effect of ground dip on lightning resistance  
**表 2.** 地面倾角对绕击耐雷性能的影响

地面倾角		5°		10°		15°		20°		30°
沿坡外侧 跳闸率/次/ (百公里·年)	上相	0	上相	0	上相	0	上相	0	上相	0
	中相	0	中相	0	中相	0	中相	0	中相	0
	下相	0.0344	下相	0.0925	下相	0.1738	下相	0.2196	下相	0.2717
沿坡内侧 跳闸率/次/ (百公里·年)	上相	0	上相	0	上相	0	上相	0	上相	0
	中相	0	中相	0	中相	0	中相	0	中相	0
	下相	0.0011	下相	0	下相	0	下相	0	下相	0
	总计	0.0355	总计	0.0925	总计	0.1738	总计	0.2196	总计	0.2717

计算条件：雷电日 40 天，给定塔头，塔身高度 40 m。



**Figure 2.** Break trip rate at different ground dip angles  
**图 2.** 不同地面倾角下的绕击跳闸率

从图 2 中可以看出，通过对不同倾角条件下的绕击防雷性能分析，得出随着地面倾角的增大沿坡外侧的绕击跳闸率是增加的，而沿坡内侧的绕击跳闸率为逐渐减小，当地面倾角大于  $10^\circ$  时，沿坡内侧的绕击跳闸率降为零。由于给定的 500 kV 杆塔的地线对各相保护角均为负值，因此当地面倾角大于  $20^\circ$  时，绕击跳闸率增长速度趋缓，随着地面倾角的继续增大，暴露距离将达到最大值。因此地面倾角沿坡外侧对于绕击防雷性能影响较大，而沿坡内侧对于绕击防雷性能影响较小，但是沿坡内侧地面倾角大于  $20^\circ$  时则对绕击防雷性能影响也较大。

### 2.3. 保护角对绕击耐雷性能的影响

保护角的不同也会对绕击耐雷性能产生影响,当保护角较小时,地线对导线的屏蔽作用增大,避免导线遭受雷击。因此,目前在工程设计上降低绕击跳闸率的方法主要是通过减小保护角来实现。

本文通过计算不同保护角  $10^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $-5^\circ$ 、 $-10^\circ$  的绕击跳闸率分析保护角对绕击耐雷性能的影响。

其中计算模型如下:雷绕击线路时的耐雷水平  $I$  为:  $I_1 = \frac{4U_{50\%}}{Z}$ , 式中,  $Z$  为输电线路的波阻抗。绕击引起的跳闸率为:  $n_1 = 0.6h_b p_a p_{I_1} \eta$ ; 式中,  $p_a$  为绕击率;  $p_{I_1}$  为雷电流超过耐雷水平  $I_1$  的概率。

对于平原地区有:  $\lg P_0 = \partial \sqrt{h_d} / 86 - 3.9$

对于山区有:  $\lg P_0 = \partial \sqrt{h_d} / 86 - 3.35$

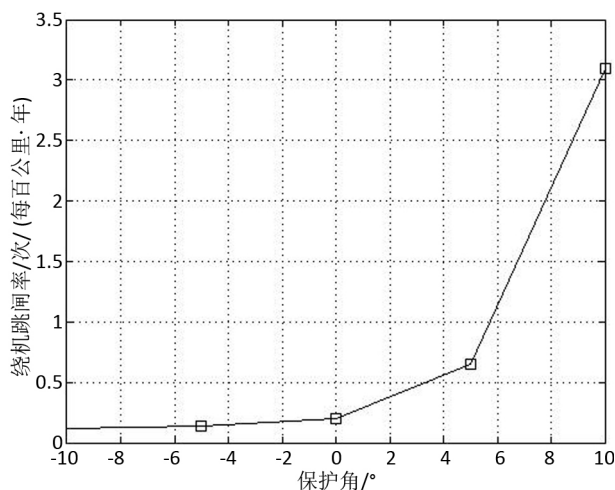
式中,  $\alpha$  为保护角度。其中边相是以下相导线为例。统计结果见表 3:

**Table 3.** Effect of ground protection angle on lightning resistance

**表 3.** 地线保护角对绕击耐雷性能的影响

保护角		$10^\circ$	$5^\circ$	$0^\circ$	$-5^\circ$	$-10^\circ$			
沿坡外侧 跳闸率/次/ (百公里·年)	上相	0.4659	上相	0.0993	上相	0			
	中相	0.1126	中相	0.1126	中相	0.0108			
	下相	0.1722	下相	0.1722	下相	0.1325			
沿坡内侧 跳闸率/次/ (百公里·年)	上相	2.3197	上相	0.2441	上相	0			
	中相	0.0191	中相	0.0191	中相	0.0108			
	下相	0.0035	下相	0.0035	下相	0.0035			
总计	3.0913	总计	0.6509	总计	0.1973	总计	0.1393	总计	0.1166

计算条件: 雷电日 40 天, 塔身高度 50 m, 地面倾角  $10^\circ$ 。



**Figure 3.** Break trip rate at different protection angles

**图 3.** 不同保护角下的绕击跳闸率

从图 3 中可以看出,随着保护角的增大绕击跳闸率也随之增大,特别是当保护角大于  $0^\circ$  的时候,跳闸率增大的速率快,但当保护角小于  $0^\circ$  时,绕击跳闸率随保护角的增大变化缓慢,基本趋于平稳。其主要原因为当保护角为负值时,避雷线对导线的屏蔽较好,在相同幅值雷电流下导线的暴露距离变化小。对于斜坡外侧,当保护角为  $10^\circ$  时,上相导线遭受绕击的概率最大,其次为下相导线,最后是中相导线。

随着保护角的减小到小于  $0^\circ$ ，上相导线绕击跳闸率降低为零，中相导线和下相导线逐渐降低。其中，上相导线跳闸率降低的幅度最大，其次是中相导线，最后是下相导线。因此对于绕击耐雷性能的大小以此为上相导线、中相导线、下相导线。

### 2.4. 导线排列方式对绕击耐雷性能的影响

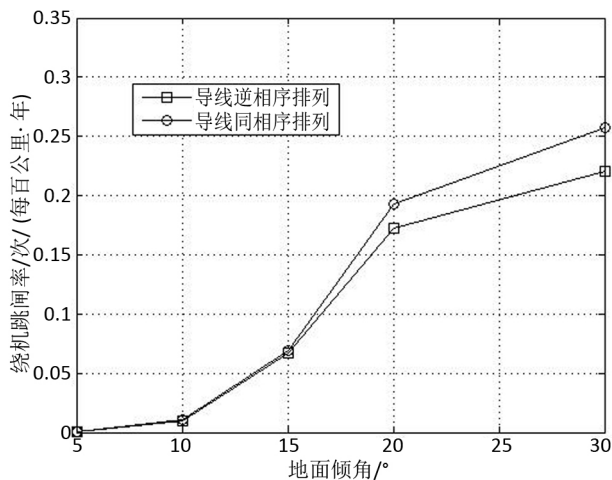
本文通过分析 500 kV 输电线路导线逆相序排列方式对绕击耐雷性能影响，与导线同相序排列方式进行比较。采用以上模型对其导线排序方式进行变换对比，在计算绕击跳闸率时，假设导线逆相序排列的一侧置于沿坡的外侧。统计结果见表 4。

**Table 4.** Effects of wire arrangement on lightning resistance

**表 4.** 导线排列方式对绕击耐雷性能的影响

地面倾角		5°		10°		15°		20°		30°	
同相序	沿坡外侧跳闸率	上相	0	上相	0	上相	0	上相	0	上相	0
		中相	0	中相	0	中相	0	中相	0	中相	0
		下相	0.0006	下相	0.011	下相	0.069	下相	0.193	下相	0.257
	沿坡内侧跳闸率	上相	0	上相	0	上相	0	上相	0	上相	0
		中相	0	中相	0	中相	0	中相	0	中相	0
		下相	0	下相	0	下相	0	下相	0	下相	0
总计		0.0006	总计	0.011	总计	0.069	总计	0.193	总计	0.257	
逆相序	沿坡外侧跳闸率	上相	0	上相	0	上相	0	上相	0	上相	0
		中相	0	中相	0	中相	0	中相	0	中相	0
		下相	0.0002	下相	0.010	下相	0.067	下相	0.172	下相	0.221
	沿坡内侧跳闸率	上相	0	上相	0	上相	0	上相	0	上相	0
		中相	0	中相	0	中相	0	中相	0	中相	0
		下相	0	下相	0	下相	0	下相	0	下相	0
总计		0.0002	总计	0.010	总计	0.067	总计	0.172	总计	0.221	

计算条件：雷电日 40 天，给定塔头，塔身高度 30 m。



**Figure 4.** Winding trip rate with different conductor phase sequence

**图 4.** 导线相序不同下的绕击跳闸率

通过表 4 和图 4 发现导线逆相序排列比同相序排列具有更好的绕击防雷性能。当地面倾角小于  $15^\circ$  时, 导线逆相序排列与同相序排列的绕击跳闸率基本一致, 但当地面倾角大于  $15^\circ$  后, 同相序排列方式的绕击跳闸率比逆相序排列方式的增长幅度大。因此导线同相序方式当地面倾角大于  $15^\circ$  时其对绕击防雷性能由于逆相序排列方式, 然而当地面倾角小于  $15^\circ$  时, 同相序排列方式与逆相序排列方式对于绕击防雷性能基本相同。

### 3. 结论

通过分析可知, 由于 500 kV 输电线路的绝缘强度较高, 反击耐雷水平较高, 一般能达到 200 kA 左右。而绕击耐雷水平仅为 13 kA 左右, 因此对于 500 kV 输电线路而言, 绕击引起的雷击跳闸事故是 500 kV 输电线路发生故障的主要原因, 特别是在高海拔及山区地区, 500 kV 输电线路的跳闸事故 90% 以上是由绕击造成的。因此, 提高绕击耐雷性能是 500 kV 输电线防雷工作的重点。基于对几种绕击防雷措施方案的分析, 提出防止绕击的综合改造措施, 即通过安装避雷器并配合加装负角保护针来实现。第一, 安装避雷器既可以提高绕击的防雷性能又可以提高防反击的性能且效果比较显著。第二, 安装避雷器比架设旁路地线具有更高的防雷效果, 而现有的大部分输电线路都采用安装线路避雷器的改造措施来提高防雷性能, 且安装避雷器具有良好的运行经验。第三, 加装负角保护针可以增强地线的屏蔽保护范围, 有效降低线路保护角。

### 参考文献

- [1] 杜庆中, 逯迈. 1000 kV/500 kV 同塔混压四回交流输电线路电磁暴露安全评估[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2020, 38(2): 43-52.
- [2] 郭天伟, 罗日成, 潘茜雯, 杨雅倩, 邹明, 潘俊文. 750 kV 同塔双回交流输电线路电磁环境分析[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 46-53.
- [3] 温作铭, 吴建生, 董鹏. 500 kV 同塔三回交流输电线路电磁环境研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2017, 39(4): 65-70+112.
- [4] 韦保荣.  $\pm 500$  kV 同塔双回直流输电线路综合防雷性能探讨[J]. 科技展望, 2016, 26(22): 115.
- [5] 曹卓. 刍议 500 kV 同塔双回交流输电线路综合防雷性能[J]. 通讯世界, 2016(7): 143-144.