

# 高压直流单回输电线路耐雷性能研究

王恒康<sup>1</sup>, 王佳灿<sup>1</sup>, 高洛宜<sup>2</sup>, 何发玺<sup>2</sup>

(1. 云南电网有限责任公司丽江供电局, 云南 丽江 674100;

2. 云南宇恬防雷材料有限公司, 云南 昆明 650000)

**摘要:** 近年来, 中国高压直流输电线路比例显著增加, 线路的雷击事故也随着增加。建立了以杆塔多波阻抗为基础的反击闪络模型以及考虑地面倾角和接地电阻作用的绕击模型; 依据具体运行杆塔模型, 研究了雷暴日、地闪密度和接地电阻对反击跳闸率的影响规律, 同时也分析了雷暴日、地闪密度和倾角对绕击跳闸率的影响规律; 最后, 采取有效的措施降低跳闸率, 安装避雷器后线路的反击和绕击耐雷水平各增加了 32.5% 和 162.3%, 线路总跳闸率明显降低。

**关键词:** 单回输电线路; 绕击耐雷性能; 反击耐雷性能; 跳闸率; 避雷器

中图分类号: TM863 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)03-0034-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.03.009

## Research on Lightning Protection Performance of HVDC Single-circuit Transmission Line

Wang Hengkang<sup>1</sup>, Wang Jiachan<sup>1</sup>, Gao Luoyi<sup>2</sup>, He Faxi<sup>2</sup>

(1. Lijiang Electric Power Supply Company, Yunnan Power Grid Co., Ltd. Lijiang 674100, Yunnan, China;

2. Yunnan Yutian Lightning Protection Material Co., Ltd., Kunming 650000, Yunnan, China)

**Abstract:** In recent years, with the scale expansion of EHV/UHV transmission lines, the accidents caused by lightning stroke are increasing. Lightning stroke performance analysis model based on multi-wave impedance of the tower is established, at the same time, lightning performance of winding analysis model is established which takes the action of ground inclination and grounding resistance into account. Aiming at the tower model in a running line, the influence rules of thunderstorm day, ground lightning density and grounding resistance on the tripping rate of counterattack are analyzed, and the influence rules of thunderstorm day, ground lightning density and ground inclination on shielding failure tripping rate are also analyzed. At last, after the surge arresters are installed, the back-flashover resistance level and the lightning shielding failure proof level of the circuit increase by 32.5% and 162.3% respectively, and the total tripping rate of the circuit decreases obviously.

**Key words:** single-circuit transmission line; lightning shielding performance; lightning back-flashover performance; tripping rate; surge arrester

## 0 引言

近年来, 中国大力发展直流输电线路, 其中高压直流输电线路比例显著增加, 线路的雷击事故也随着增加<sup>[1-2]</sup>。雷击线路不仅会影响电网的稳定运行, 也会给人民的财产和生命带来危害, 因此对高压直流输电线路的耐雷性能进行分析, 并提出合理的耐雷措施具有重要的研究价值<sup>[3]</sup>。

输电线路耐雷性能的研究方法经历了几个重要

阶段, 从最开始的以考虑感应雷为主<sup>[4]</sup>, 到运用行波理论来计算绝缘子串电压分布<sup>[5]</sup>, 再到采用模拟实验、理论分析和现场测试等技术开展线路初步耐雷性能分析<sup>[6-7]</sup>, 以及到现在的利用模拟试验、现场实测、概率统计、计算机模拟计算等方法综合分析计算线路耐雷性能等多个阶段<sup>[8-9]</sup>。通过线路运行多年的总结经验以及相关学者的理论分析结果可以得出: 500 kV 及以上的输电线路由于自身绝缘强度设计裕度比较大, 跳闸率中绕击占比较大; 而针对占比较大的 110 kV 和 220 kV 高压输电线路, 由于绝缘

强度裕度相对比较小,雷击跳闸以反击为主<sup>[1-2,7,9]</sup>。

针对线路反击和绕击有多种分析方法,但每种方法都有其对应的适用条件,因此对线路耐雷水平进行研究时需要考虑具体的现场运行环境,建立合适的反击和绕击模型<sup>[12-13]</sup>。针对跳闸率高的线路,需在耐雷性能水平理论研究的基础上提出了多种措施,但此类方法的效果也是参差不齐<sup>[14,16]</sup>。

下面建立了较为精确的杆塔反击和绕击闪络模型,并依据此模型分析了两种杆塔线路的雷击跳闸率,最后定量研究了避雷器对线路跳闸率的影响。

## 1 线路的耐雷性能分析模型

### 1.1 线路反击闪络模型

利用 EMTP 软件建立基于行波法的反击闪络模型,并采用 2.5/50 μs 的标准雷电波。为了模拟的准确性,将高压直流输电线路塔身分多段,并在程序中设置随频率变化的线路阻抗,如图 1 所示。闪络判断依据以绝缘子的  $U_{50\%}$  值来判定,并考虑杆塔接地装置的冲击阻抗和雷电感应电压的计算。

采用基于行波法的 EMTP 程序来计算输电线路反击耐雷水平  $I_{FOC}$ ,结合对线路走廊雷电参数的统计结果,根据规程推荐的方法计算反击跳闸率  $n_{SF}$  为

$$n_{SF} = N_L \eta g [P(I > I_{FOC})] \quad (1)$$

式中:  $N_L$  为百公里长度的落雷总次数;  $\eta$  为建弧率;  $g$  为击杆率,按照规程规定取值;  $P(I > I_{FOC})$  为大于  $I_{FOC}$  的雷电流概率密度函数。

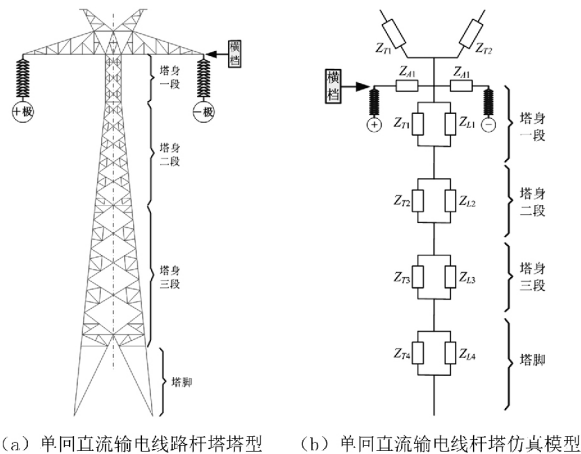


图 1 线路杆塔及其等效模型

### 1.2 线路绕击闪络模型

在之前研究模型中,很少有考虑先导入射角度和杆塔在地面的倾角等因素对绕击的影响,这里同

时考虑这两种情况的共同作用,示意如图 2 所示。

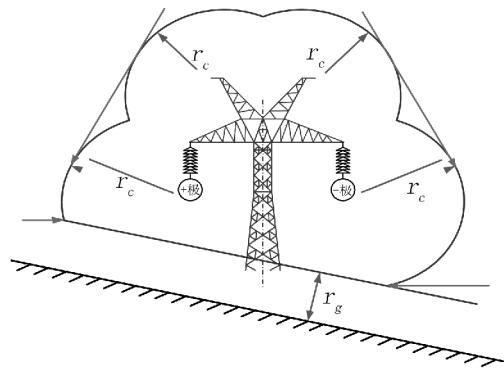


图 2 高压直流线路绕击耐雷性能分析模型

在文献 [17] 和文献 [18] 对绕击闪络分析的基础上,考虑先导入射角  $\psi$  和地面倾角等因素的影响,得出发生绕击闪络的概率。

导线 C1 的绕击闪络概率为

$$S_{FFORC1} = \frac{N_g}{10} \int_{I_c}^{I_{C1max}} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} LP(\psi) P(I) d\psi dI \quad (2)$$

导线 C2 的绕击闪络概率为

$$S_{FFORC2} = \frac{N_g}{10} \int_{I_c}^{I_{C2max}} \int_{\varphi_3}^{\varphi_4} LP(\psi) P(I) d\psi dI \quad (3)$$

线路的总绕击闪络概率为

$$S_{FFORC} = S_{FFORC1} + S_{FFORC2} \quad (4)$$

式中:  $N_g$  为地闪密度;  $I_{min}$  为最小的绕击发生电流;  $I_c$  为绕击的临界雷电流;  $I$  为绕击闪络时的最大电流;  $L$  为垂直于雷电入射方向的导线的暴露投影距离;  $p(\psi)$  为先导入射角  $\psi$  的概率密度分布函数;  $P(I)$  为  $I$  的概率密度函数;  $I_{C1max}$  和  $I_{C2max}$  为两导线绕击的最大雷电流;  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  为导线 C1 的先导入射方向的最小和最大角度;  $\varphi_3$  和  $\varphi_4$  为导线 C2 的先导入射方向的最小和最大角度。

根据规程法可以计算出线路的绕击跳闸率为

$$n_{FFOR} = N_L \eta S_{FFORC} \quad (5)$$

故总的线路跳闸率为

$$n = n_{SF} + n_{FFOR} \quad (6)$$

## 2 线路雷击跳闸率分析

### 2.1 高压直流单回输电线路参数

搭建  $\pm 500$  kV 单回线路模型,相关参数见表 1。

### 2.2 杆塔线路的雷击跳闸率

#### 1) 杆塔线路的反击跳闸率

针对负极性的雷电,正极导线更容易发生反击。

表1 ±500 kV 单回线路相关参数

参数	参数值
绝缘子型号	FXBW-500/160
绝缘子长度/m	5.44
50%冲击闪络电压/kV	3087
导线波阻抗/ $\Omega$	448
地线波阻抗/ $\Omega$	433
杆塔呼高/m	39
地线保护角/ $^\circ$	12

因此这里主要计算雷击正极性线路的情况,计算结果如表2所示。雷暴日和地闪密度对跳闸率有直接的影响,反击跳闸率与雷暴日和地闪密度的乘积成

正比;反击跳闸率与杆塔接地电阻正相关。

2) 杆塔线路的绕击跳闸率

依据第1.2节相关理论,计算线路的绕击跳闸率,由表3可知,杆塔的倾斜角与绕击跳闸率正相关,倾斜角越大意味着暴露弧的面积越大,绕击负极性线路时的跳闸率为0。

3) 杆塔线路的雷击总跳闸率

由表2至表5的计算结果可知,反击跳闸率随接地电阻的增大而增大,绕击跳闸率随地面倾角的增大非线性增大。线路跳闸率随地闪密度增加线性增大。500kV线路工作电压的极性对跳闸率也有

表2 杆塔反击跳闸率(正极性线路)

雷暴日/ $(d \cdot a^{-1})$	地闪密度/ $(次 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1})$	杆塔反击跳闸率/ $(次 \cdot (100 km)^{-1} \cdot a^{-1})$		跳闸率变化量/ $\%$
		接地电阻 3.9 $\Omega$	接地电阻 0.75 $\Omega$	
31	0.127 5	0.003 3	0.002 7	18.18
24.5	0.103 7	0.001 7	0.001 6	5.88
20.833	0.068 4	0.000 1	0.000 1	0

表3 杆塔绕击跳闸率(正极性线路)

雷暴日/ $(d \cdot a^{-1})$	地闪密度/ $(次 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1})$	杆塔绕击跳闸率/ $(次 \cdot (100 km)^{-1} \cdot a^{-1})$			
		地面倾角 10 $^\circ$	地面倾角 5 $^\circ$	地面倾角 3 $^\circ$	地面倾角 0 $^\circ$
31	0.127 5	0.363 9	0.103 8	0.050 8	0.008 0
24.5	0.103 7	0.296 0	0.084 4	0.041 3	0.006 5
20.833	0.068 4	0.195 2	0.055 7	0.027 2	0.004 3

表4 杆塔绕击跳闸率(负极性线路)

雷暴日/ $(d \cdot a^{-1})$	地闪密度/ $(次 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1})$	杆塔绕击跳闸率/ $(次 \cdot (100 km)^{-1} \cdot a^{-1})$			
		地面倾角 10 $^\circ$	地面倾角 5 $^\circ$	地面倾角 3 $^\circ$	地面倾角 0 $^\circ$
31	0.127 5	0.046 8	0	0	0
24.5	0.103 7	0.038 1	0	0	0
20.833	0.068 4	0.025 1	0	0	0

表5 杆塔总跳闸率(正极性线路)

雷暴日/ $(d \cdot a^{-1})$	地闪密度/ $(次 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1})$	接地电阻/ $\Omega$	杆塔总跳闸率/ $(次 \cdot (100 km)^{-1} \cdot a^{-1})$			
			地面倾角 10 $^\circ$	地面倾角 5 $^\circ$	地面倾角 3 $^\circ$	地面倾角 0 $^\circ$
31	0.127 5	3.90	0.367 2	0.107 1	0.054 1	0.011 3
		0.75	0.366 6	0.106 5	0.053 5	0.010 7
24.5	0.103 7	3.90	0.297 7	0.086 1	0.043 0	0.008 2
		0.75	0.297 6	0.086 0	0.042 9	0.008 1
20.8	0.068 4	3.90	0.195 3	0.055 8	0.027 3	0.004 4
		0.75	0.195 3	0.055 8	0.027 3	0.004 4

明显影响, 负极性雷电反击正极性线路时线路反击耐雷水平更低, 跳闸率更高; 负极性雷电绕击正极性线路时线路绕击耐雷水平高于负极性, 但正极性导线对雷电先导的击距明显大于负极性导线; 因此正极性导线绕击跳闸率更高, 负极性较小。

### 3 避雷器对线路耐雷性能影响分析

加装线路型避雷器是防止雷击线路跳闸的最有效措施之一。但一般而言加装避雷器只能对所加装相有较好的保护作用, 对其他相邻杆塔和本杆塔其他未加装相影响很小。线路型避雷器一般只装设在某些雷击跳闸率严重偏高的杆塔上, 例如山区地面倾角过大处、杆塔接地电阻过高处、转角塔、保护角过大或特高杆塔等处。依据前述计算结果, 正极性导线跳闸率更高, 因此分析中主要针对正极性线路加装避雷器的情况。依据上述分析, 将单回输电杆塔的正极导线加装避雷器, 参数见表6。

表6 单回线路加装线路避雷器

参数	参数值
接地电阻/ $\Omega$	3.9
地面倾角/ $^\circ$	6
绝缘子串长/m	5.44
雷暴日/ $(d \cdot a^{-1})$	31
地闪密度/ $(次 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1})$	0.127 5
安装位置	正极性

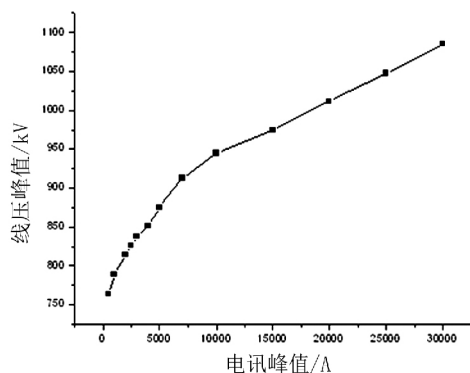


图3 避雷器伏安特性曲线

#### 3.1 单回线路反击耐雷水平

表7为避雷器对反击跳闸效果的影响(正极性线路)。

由表7的计算结果可知, 加装避雷器后, 反击耐雷水平增加了32.5%。雷电反击的耐雷水平均大于400 kA, 高于400 kA的雷电概率几乎为0。

#### 3.2 单回线路绕击耐雷水平

表8为加装避雷器前后线路绕击耐雷水平的比

表7 避雷器对反击跳闸效果的影响(正极性线路)

对比参量	相关数值		
$U_{50\%}$ 闪络电压/kV	3087		
接地电阻/ $\Omega$	3.9	0.75	3.9
加装避雷器前耐雷水平/kA	302	308	302
加装避雷器后耐雷水平/kA	>400	>400	>400
耐雷水平提高量/%	>32.5		

较(绕击正极性线路)。

由表8的计算结果可知, 加装避雷器后, 该杆塔的绕击耐雷水平大幅度提高, 绕击耐雷水平提高了162.3%。

表8 加装避雷器前后线路绕击耐雷水平的比较  
(绕击正极性线路)

对比参量	相关数值
$U_{50\%}$ 闪络电压/kV	3974
最大绕击电流/kA	45.4
加装前耐雷水平/kA	30.5
加装后耐雷水平/kA	80.0
耐雷水平提高/%	162.3

## 4 结 语

1) 搭建了以杆塔波阻抗为基础的反击闪络模型以及考虑地面倾角和接地电阻作用的绕击闪络模型, 提高了模型计算的准确性。

2) 依据具体运行杆塔模型, 研究了雷暴日、地闪密度和接地电阻对反击跳闸率的影响规律, 同时也分析了雷暴日、地闪密度和倾角对绕击跳闸率的影响规律。

3) 线路设置避雷器后, 线路的反击和绕击耐雷程度各增加了32.5%和162.3%, 线路总跳闸率明显下降。

### 参考文献

[1] 国家电网公司. 国家电网公司2005—2010年架空输电线路运行分析报告[R]. 北京: 国家电网公司生产技术部, 2011.

[2] 郭小筱. 东莞电网220 kV同塔多回架空线路防雷技术应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.

[3] 岳灵平, 陆利平, 章旭泳, 等.  $\pm 500$  kV宜华直流输电线路雷电性能评估研究[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 161-165.

[4] 李汉明, 陈维江, 詹铭, 等. 220/110 kV同杆四回线路耐

雷性能的研究[J]. 电网技术 2005 29(21):27-30.

[5] 周浩 赵斌财 王东举 等. 500/220 kV 同塔四回线路的耐雷性能研究[J]. 高电压技术 2008 34(10):2075-2080.

[6] 莫付江 陈允平 阮江军. 输电线路杆塔模型与防雷性能计算研究[J]. 电网技术 2004 28(21):81-84.

[7] 孙义豪 司马文霞 杨庆 等. 1000 kV/500 kV 同塔混压4回输电线路的防雷性能[J]. 高电压技术 2011 37(9):2102-2110.

[8] 范冕 万磊 戴敏 等. 1000 kV/500 kV 特、超高压同塔4回交流输电线路雷电性能仿真分析[J]. 高电压技术, 2013 39(3):584-591.

[9] 苏杰 曹炯 姜文东 等. 220 kV/110 kV 同塔四回输电线路双回同时闪络耐雷性能及防治[J]. 电瓷避雷器, 2013(5):90-96.

[10] 彭向阳 李振 李志峰 等. 杆塔接地电阻对同塔多回线路防雷性能的影响[J]. 高电压技术 2011 37(12):3113-3119.

[11] 张永记 司马文霞 张志劲. 防雷分析中杆塔模型的研究现状[J]. 高电压技术 2006 32(7):93-98.

[12] 王东举 周浩 陈稼苗 等. 特高杆塔的多波阻抗模型设计及雷击暂态特性分析[J]. 电网技术 2007 31(23):12-16.

[13] 梁义明 葛栋. 同塔多回线路防雷计算中的杆塔模型[J]. 高电压技术 2006 32(1):76-78.

[14] 李振 余占清 何金良 等. 线路避雷器改善同塔多回线路防雷性能的分析[J]. 高电压技术 2011 37(12):3120-3128.

[15] 彭晓亮,陈坤,刘新 等. ±500 kV 直流线路避雷器在江城线的应用[J]. 电瓷避雷器, 2014(4):111-115.

[16] 郑江 林苗. 线路避雷器在防雷中的作用研究[J]. 电瓷避雷器 2006(6):38-41.

[17] 钱冠军. 下行雷闪屏蔽问题的研究及其在输电线路中的应用[D]. 武汉:华中科技大学,1998.

[18] 李晓岚 尹小根 余仁山 等. 基于改进电气几何模型的绕击跳闸率的计算[J]. 高电压技术 2006 32(3):42-44.

作者简介:

王恒康(1989),工程师,从事输电线路运行检修工作;  
王佳灿(1988),助理工程师,从事输电线路运行检修管理工作;  
高洛宣(1995),助理工程师,从事防雷研究及相关工作;  
何发玺(1993),助理工程师,从事防雷研究及相关工作。  
(收稿日期:2019-01-18)

(上接第21页)

## 6 结 语

先是分析了风力发电的混合储能系统硬件结构,以 PLC 作为控制器,利用 PLC 成熟的技术应用在混合储能系统对风力发电输出功率波动性的平抑上;再是设计了系统的主流程图以及子流程图,在 PLC 的编程软件中设计了梯形图。通过对整个控制系统软硬件的设计,较好地解决了风力发电在并网中的波动性问题。

### 参考文献

[1] 蒋平 熊华川. 混合储能系统平抑风力发电输出功率波动控制方法设计[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):122-127.

[2] 周念成 闫立伟 王强钢. 光伏发电在微电网中接入及动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(14):119-127.

[3] 薛文 任宝森 王凯. 超级电容器与蓄电池的混合储能技术在风力发电中的应用[J]. 电源世界,2016(11):38-42.

[4] 王振浩 刘金龙 李国庆 等. 基于超级电容器储能的并网风电场功率与电压调节技术[J]. 电力自动化设

备 2011 31(3):113-116.

[5] 刘青 樊世通 付超 等. 考虑不同蓄电池 SOC 状态的风/储/海水淡化孤立微电网能量管理系统设计. 高电压技术 2015 41(7):2173-2179.

[6] 廖常初. PLC 编程及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

[7] Qu L, Qiao W. Constant Power Control of DFIG Wind Turbines with Super Capacitor Energy Storage[J]. IEEE Transactions on Industry Application 2011 47(1):359-367.

[8] Li Jianlin, Liang Liang, Yang Shuili et al. Study on Energy Storage System Smoothing Wind Power Fluctuations [C]// International Conference on Power System Technology, IEEE Xplore, 2010:1-4.

[9] Siemens AG. Step 7 V5.5 硬件配置与通信连接[Z]. 2010.

[10] 王阿根. 电气可编程控制原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2013.

[11] 王永华. 现代电气控制及 PLC 应用技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2008.

[12] 石淮. 西门子 S7-200 PLC 模拟量输入处理方法的应用研究[J]. 中国高新技术企业,2012(8):66-68.

作者简介:

王战栋(1992),硕士研究生,从事风力发电与储能技术研究;  
陈 洁(1976),博士研究生,教授,从事储能技术方面的研究。  
(收稿日期:2019-01-16)