

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.02.014

±400 kV 青藏直流线路防雷特性研究

邬锦波¹, 谷山强², 万 帅^{2,3}, 王 剑⁴, 曹 伟², 何金良¹

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限公司, 武汉 430074;
3. 襄阳国网合成绝缘子有限责任公司, 湖北 襄阳 441000; 4. 国家电网公司, 北京 100031)

摘要: 随着特高压直流输电项目的大量建设, 直流输电线路的安全稳定运行越来越受到人们的重视, 而雷电防护是直流线路安全稳定运行的重要环节。青藏直流线路全线海拔高度在3 000 m以上, 恶劣的气候和地形条件都为防雷工作带来了巨大的挑战。文中对±400 kV 青藏直流线路的雷电参数、防雷措施等进行了调研, 对该线路上典型杆塔的反击和绕击特性进行了计算分析, 在目前的绝缘配置情况下, 全线的雷击闪络率为0.170 7次/(100 km·a)。文中根据计算的结果, 从减小保护角、加强绝缘、降低接地电阻等方面对高海拔地区直流线路防雷提出了针对性的建议, 以期为线路的防雷建设提供参考。

关键词: 高海拔; 直流输电; 雷电防护

Study on Lightning Protection Characteristics of ±400 kV Qinghai-Tibet DC Transmission Lines

WU Jinbo¹, GU Shanqiang², WAN Shuai^{2,3}, WANG Jian⁴, CAO Wei², HE Jinliang¹

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Wuhan NARI Limited Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 3. Xiangyang Guowang Composite Insulators Co., Ltd., Hubei Xiangyang 441000, China; 4. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: Along with the construction of UHV DC transmission project, the safety and stable operation of DC transmission line has got more attention. The lightning protection is an important part of the stable operation of the DC transmission lines. The Qinghai-Tibet DC transmission line is located on the plateau whose altitude is over 3 000 m. Terrible weather and geography conditions have brought great challenges to the lightning protection of the transmission line. The paper has carried on the investigation to 400 kV Qinghai-Tibet DC lines, such as lightning parameters and lightning protection. On the basis of this, the characteristics of some typical towers are analyzed. The lightning flashover rate is about 0.170 7 for 100 km per year. Some corresponding suggestions are put forward to give a reference for the construction of lightning protection like reducing the protecting horn, increasing insulation and decreasing the grounding resistor.

Key words: high attitude; DC transmission; lightning protection

0 引言

随着高压直流输电线路的建设, 直流输电项目运行的安全性也越来越引起了人们的重视。雷电是影响输电线路可靠性的最主要因素。国际大电网会议公布了美国等12个国家在电压等级为275~500 kV、总长为32 700 km的输电线路连续3年

的运行资料, 该资料显示雷害事故占电力系统总事故的60%^[1-3]; 据统计, 在中国跳闸率比较高的地区, 高压架空线路由雷电引起的跳闸次数占总次数的40%~70%^[4-5]。随着直流输电系统容量逐年增大, 由雷击引起的输电线路闪络故障也日益增多。据国家电网公司2005—2010年运行数据统计, 雷击引起的闪络次数占国家电网公司±500 kV 直流输电线路总闪络次数的31.64%^[6-7]。

收稿日期: 2017-09-07; 修回日期: 2017-11-22

基金项目: 国家电网公司科技指南项目。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC.

对于高压直流线路来说,雷电过电压产生的机理与防雷性能的分析计算基本上与交流架空线路相同,但直流线路有其自身的特点:定电流调节器使故障电流的增大倍数小于交流线路;雷击闪络故障时,直流线路两侧控制系统能快速降压,从故障发生至故障最大电流的时间很短,仅 20~100 ms,再经 30~60 ms 可降至零值;故障点没有由电磁耦合形成的电流,可从零压重新启动,因而故障点去游离时间短,只需 100~200 ms,重新启动后,经约 200~300 ms 恢复至额定工作电流。此外,直流线路雷电闪络对两侧交流网的扰动是不容忽视的,所以高压直流线路的雷电性能要给予特别的关注^[8-13]。

另一方面,由于高海拔地区大气条件与低海拔地区不同,高海拔地区外绝缘特性与其位于低海拔地区也将不同^[14-17]。针对高海拔地区,需要进行外绝缘 50% 放电电压校正,修正的方法包括 IEC 71-2—1996、DL 620—2016 以及 GB 311.1—2012 推荐的海拔修正方法等。IEC 标准给出的方法是基于间隙耐受电压进行海拔修正,DL 620—2016 标准则是根据间隙距离直接计算不同高度下的间隙耐受电压,GB 311.1—2012 中则完全忽略不同的电压类型,对于长空气间隙而言存在着比较大的误差。因此,结合线路实际的运行和测量结果,开展高海拔地区的直流线路防雷特性的研究尤为重要。

1 ± 400 kV 青藏直流输电线路调研

1.1 雷电参数调研

雷电参数是反映雷电活动规律的重要技术指标,同时也是雷电灾害评估和防雷工程的重要参考依据^[18]。文中选取了 2007—2014 年青藏直流青海段 LLS 闪电定位系统的观测结果,作为雷电参数统计的调研依据。

雷暴日和落雷密度是描述雷电特征的重要参量。根据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》,雷暴日和落雷密度之间呈如下所示的指数关系

$$N_g = \alpha T_d^\gamma \quad (1)$$

关于 α 和 γ 的取值,IEEE 的推荐值中对 α 的取值为 0.04,对 γ 的取值为 1.25;而中国行业标准中根据 35~220 kV 的统计结果,两者的取值分别为 0.023 和 1.3,略有差异。采用上述两种推荐值,得到的落雷密度与雷暴日的关系见图 1。

从图 1 中可以看到,当雷暴日在 4 天以下时,2 种推荐值得到的关系曲线跟实测值的结果比较接近,但随着雷暴日天数的增加,理论值跟实测值的

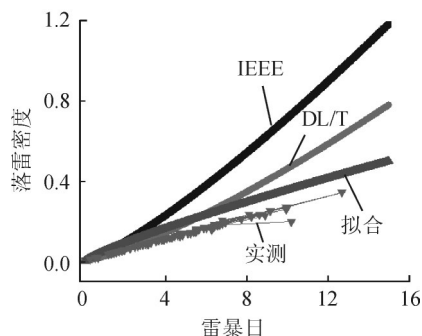


图 1 落雷密度与雷暴日间的关系

Fig. 1 The relationship between flash density and thunderstorm days

差距开始逐渐增大。这是由于在高海拔地区,雷电活动并不活跃,雷暴日与落雷密度均较小,两者之间的关系呈现近似线性;而当雷暴日增加时,由于 γ 参数大于 1,拟合值与实测值之间的差异会越来越大。因此在高海拔雷电活动较弱、落雷密度较低的地区,使用推荐的标准可能会使防雷计算的结果有误差。

为了使落雷密度与雷暴日之间的关系接近观测值,文中使用非线性拟合的方式,得到了观测条件下的落雷密度与雷暴日的拟合关系为

$$N_g = 0.0509 T_d^{0.8425} \quad (2)$$

除此之外,雷电流的极性也是雷电参数的重要组成部分。从 2007—2014 年的统计情况来看,负极性雷占总雷击数的 97.84%,与中国大部分地区的情况相符。而正极性雷电的比例虽然较低,但其雷电流的幅值却均较高。

文中将 2007—2014 年沿线正负极性雷电流的幅值概率分布进行了初步的统计分析,得到图 2 所示的结果。此概率分布也将用于后面直流输电线路的雷击闪络率计算中。

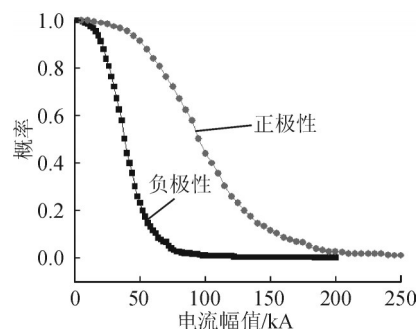


图 2 正负雷电流的幅值累积概率分布曲线

Fig. 2 The cumulative probability distribution curve for the amplitude of the positive and negative lightning

1.2 线路绝缘配置

线路杆塔方面,青藏直流段输电线路地处中国西北,线路全长 1 031.5 km,其中青海段全长 608.6 km。共有直流杆塔 2 361 级,其中青海段包含 1 395 级,

西藏段966级。直线塔中以J41和ZV41为主,占总数的77.8%以上。沿线杆塔的呼高分布在24~66 m之间,随塔型有较大差异,但半数以上的杆塔呼高分布在30~40 m区间范围之内。杆塔的接地电阻在0.1~9.3 Ω 之间。

绝缘配置方面,青藏直流沿线使用的绝缘子包括瓷质绝缘子与合成绝缘子两种,其中瓷质绝缘子的型号包括XZWP-300、LG105/1750、CA-882EZ,占比为21.14%,其余为合成绝缘子。合成绝缘子型号为FXBZ- $\pm$ 400/160、FXBZ- $\pm$ 400/210、FXBZ- $\pm$ 400/300、FXBZ- $\pm$ 400/400 4种,其中FXBZ- $\pm$ 400/160占总数的66.29%以上。从串形上看,合成绝缘子为V型串,而瓷质绝缘子均为双串。悬垂绝缘子的干弧距离均为8 000 mm,满足高海拔地区绝缘配置的基本要求。

而地形地貌方面,青藏直流输电线路沿线的地形地貌以山地和丘陵为主,约占70%以上,且地势起伏较大,这对防雷工作提出了严峻的挑战。

目前,青藏直流输电线路所采用的防雷措施是在直流线路上方加装了2条避雷线进行防雷保护,避雷线高度依据塔型不同有所不同。ZV型杆塔避雷线距离呼高的平均高度为4.5 m,J型杆塔约为11.5 m;避雷线中距平均为10.75 m,此外并没有其余的防雷保护措施。

2 高海拔直流线路雷击闪络率评估

2.1 雷击闪络率的计算

线路的雷击闪络率与线路的塔型、绝缘强度、接地电阻以及线路沿线地形、雷电活动等诸多因素有关,它们分别影响着线路的反击闪络率和绕击闪络率,进而决定线路的防雷性能。由于实际线路中每一基杆塔的塔型、尺寸、绝缘强度以及地形和接地状况都各不相同,其防雷性能也千差万别。因此要分析线路整体的防雷性能,比较可行的方法是根据影响线路防雷性能的各个参数的统计规律,将线路分为若干类型,并对每种类型线路的雷击跳闸率进行计算。在此基础上,再根据每种线路所占的比例,通过加权求和的方法求得线路整体的防雷性能。

对线路进行合理的分类是进行防雷分析的基本前提。根据上文所述的调研结果,根据线路类型及导地线相对位置的因素,对于影响线路防雷性能的杆塔高度、塔头尺寸、绝缘强度等因素,计算中分别以每种塔型下相应参数的平均值为依据同时考虑最严峻的情况进行分析。即对杆塔高度和塔头

尺寸按略高于平均值选取,绝缘强度则略低于平均值。

在上述分类条件下对线路的绕击特性和反击特性进行分析。绕击特性的分析主要考虑了线路局部地形的影响,并计算了3种山区基本地形下不同线路的绕击闪络率。反击特性主要分析了杆塔接地电阻对反击跳闸率的影响。这两部分的计算结果将作为对线路整体雷击闪络率分析的基本数据。

2.2 典型杆塔的反击特性

线路的反击跳闸率与杆塔的高度、接地电阻以及绝缘强度等因素有关,文中以 $\pm$ 400 kV青藏直流输电线路最常见的ZV41型杆塔为例,计算了不同塔高和接地电阻下杆塔的反击耐雷水平,见表1。对于直流线路,正极线路对负极性雷的耐雷水平远低于负极线路,因而表1中所列均为正极线路的耐雷水平。

表1 直流直线塔反击耐雷水平

Table 1 The performance against lighting strike kA

呼称高度/m	接地电阻			
	5 Ω	10 Ω	15 Ω	20 Ω
39	305	228	181	151
45	273	211	171	145
51	256	203	167	143

从表1中可以看出,杆塔的耐雷水平随杆塔高度的增高而降低,随接地电阻的增大而降低,并且接地电阻的影响尤为明显。当接地电阻值很高时,杆塔高度对耐雷水平的影响较弱,耐雷水平几乎只与线路的绝缘水平有关。

2.3 典型杆塔的绕击特性

为分析ZV41塔型的防雷性能,雷电日取为80天/年,雷电流幅值的雷击概率按照上面的拟合公式计算。由于相同条件下,线路绕击跳闸率随着杆塔高度的增加而增加,因而计算时考虑最严峻情况,每种塔型都高于线路平均高度。直流线路由于两极工作电压不同,因而其绕击耐雷水平也有很大不同。当遭雷击的线路与雷电流极性相同时,线路的耐雷水平较低,二者极性相反时绕击耐雷水平较高。对于自然界主要发生的负极性雷击,正极线路的遭绕击的可能性远大于负极线路,因而计算时选取正极线路位于山坡下坡方向的最严峻条件进行计算。计算结果见表2、3(跨越山谷)。

由表2可以得出,对于跨谷地形,在相同的地线保护角和雷电活动条件下,随着跨谷深度的增大,绕击闪络率增大,特别在地线屏蔽较差的情况下(如地线保护角绝对值很小),绕击闪络率随跨谷深度增

表2 跨谷地形绕击率
Table 2 Shielding failure flashover rate in valley

绕击率	山谷深度				
	0 m	20 m	40 m	60 m	80 m
同极性绕击率	0.283 3	0.558 2	1.642 4	2.873 0	4.184 9
异极性绕击率	0.003 4	0.013 4	0.042 8	0.350 4	0.732 7
总绕击率	0.286 7	0.571 6	1.685 2	3.223 4	4.917 6

表3 斜坡地形绕击率
Table 3 Shielding failure flashover rate on hill

绕击率	山坡倾角				
	0°	10°	20°	30°	40°
同极性绕击率	0.283 3	0.476 3	1.359 1	3.087 5	4.286 6
异极性绕击率	0.003 4	0.025 4	0.100 2	0.290 8	0.634 2
总绕击率	0.286 7	0.501 7	1.459 3	3.378 3	4.920 8

加越大。这是因为当线路跨谷时,导线距离地面高度增加,地面屏蔽作用减小,因此更容易受到绕击;特别是当地线屏蔽不利时,绕击闪络率增加更快。

同样的在表3中,对于斜坡地形,随着地面倾角的增大,处于山坡外侧的线路距离地面的高度增加,使得地面的屏蔽作用变弱,让外侧导线更容易受到绕击。从先导发展的角度来讲,位于山坡外侧

的导线的引雷能力增加,下行先导头部会明显向导线方向偏移,加强了下行先导头部与上行先导头部之间的电场,更容易完成最后的击穿。

2.4 线路闪络率

利用前文所述的加权法计算之后,线路闪络率计算结果见表4。

从表4可以看出,虽然青藏直流线路沿线地形条件十分恶劣,几乎全线为山区和丘陵地带,但由于雷电活动强度较低,且线路的整体绝缘水平较高,因而线路的雷击跳闸率较低。绕击仍然是造成线路雷击跳闸的主要原因,约占总雷击跳闸率的90%左右,其中70%以上发生在山区。可见对于该直流线路,降低山区线路绕击率是降低线路雷击跳闸率的关键所在。

3 高海拔直流线路防雷措施

输电线路防雷设计是依据雷击线路故障的原因和特点,采用多种手段来降低线路发生雷击闪络的概率,减小雷击危害的一种防雷技术。目前,±400 kV 直流线路现有防雷技术及措施有以下几种,如减小保护角、加强绝缘水平、降低接地电阻、架设耦合地线、加装线路避雷器等^[19-21]。而对于高海拔地区,由于一些特殊的气象及地质条件,可能会对上述措施产生一定的限制。如±400 kV 青藏直流输电线路,地处青藏高原的冻土地带,土壤冰冻时间从11月份持续到第2年2月份,有些地区甚至是永久冻土,在

表4 线路闪络率
Table 4 The flashover rate of the whole line

地形			平均绕击率		总绕击率	
绕击闪络率	丘陵	斜坡	0.006 840	0.055 120	0.009 370	
		山顶	0.006 840			
		跨谷	0.041 440			
	一般山地	斜坡	0.033 240	0.155 480	0.070 000	0.170 700
		山顶	0.033 240			
		跨谷	0.089 000			
	高山大岭	斜坡	0.079 950	0.326 100	0.091 310	
		山顶	0.079 950			
跨谷		0.166 200				
接地			平均反击率		总反击率	
反击闪络率	丘陵	5 Ω	0.000 038	0.000 070	0.000 012	
		20 Ω	0.000 032			
	一般山地	5 Ω	0.000 036	0.000 099	0.000 045	0.000 097
		20 Ω	0.000 063			
	高山大岭	5 Ω	0.000 034	0.000 129	0.000 036	
		20 Ω	0.000 095			

采用降低杆塔接地电阻这类措施时,改造接地极形状等可能施工难度较大,可以考虑采用降阻剂进行改进;采用加强绝缘的方式时,除需要考虑增重等因素外,还需考虑风速太快造成绝缘子串飘动,使得导线与塔窗之间的间隙减小,在下文有详细介绍。下面将从减小地线保护角、加强绝缘、降低接地电阻3个方面进行详细介绍。

3.1 减小地线保护角的综合分析

如上文所述,山区线路的绕击都是造成输电线路雷击跳闸的主要原因。因此降低线路绕击跳闸率是提高运行可靠性的有效手段。在诸多线路防雷措施中,减小地线保护角可以提高对导线的屏蔽性能,是降低绕击跳闸率最直接有效的措施,是对于ZV41杆塔较小保护角之后,不同地形下雷击绕击闪络率的变化情况见表5。

表5 较小保护角后的雷击闪络率

Table 5 The effect of declining protection angle

参数	数值		
地线侧向宽度/m	7.8(当前塔型)	7.8+1	7.8+3
保护角/(°)	11	6	-6
丘陵闪络率	0.448 5	0.217 5	0.000 0
山地闪络率	2.405 0	1.086 1	0.011 5

由表5可见,由于高海拔地区直流线路绕击闪络率较高,位于山坡外侧时至少需要将地线宽度增加1 m或者采用负保护角才能将绕击率限制在较低水平。在极端恶劣的地形条件下采用-6°保护角,线路绕击率可以降低到0.011 5次/(100 km·a)的水平。由于直流线路两极位于山坡外侧的概率相等,因而线路平均绕击率约为该值的一半,证明此举可极大降低青藏直流线路的雷击闪络率。

然而相比于降低接地电阻、增加绝缘等措施,减小地线保护角所需的代价较高。一方面减小保护角需要对线路的塔型进行重新设计,而随着地线支架外移,杆件应力增大,杆塔的重量和基础应力都随之增加,线路的本体投资也要相应增大;另一方面对运行线路减小地线保护角的施工难度远大于其他几种改造措施,带电改造的可行性还有待进一步探索。因此对于减小保护角的适用性与经济性需要进行进一步的分析,在对杆塔重量、基础应力、改造杆件量等因素进行考虑后,对改造前后的工程量进行了比较,结果见表6(杆塔改造前后增量比例为1.9%;上拔基础应力改造前后增量比例为0.1%;下压基础应力改造前后增量比例为0.2%;改造杆件量改造前后增量比例为16.6%)。

表6 较小保护角的参数

Table 6 The parameters after declining the protection angle

技术参数	改造前	改造后	增量
杆塔重量/t	9.101	9.270	0.169
基础应力/上拔	619.800	620.200	0.400
kN下压	721.700	723.200	1.500
改造杆件量/件	—	—	86

从表6可以看出,塔型改造保护角后塔重增量的绝对值差别较大,这与原塔的塔型、塔高,地线宽度增加量,改造方案选择以及原塔设计裕度等多方面因素有关。但从塔重增量的比例来看,减小保护角后重量增加在2%以下。由于改造后需要调整更换的杆件主要集中的塔头部分,保护角减小越多,所需的费用也越大。因此在选择改造保护角的方案时要综合考虑减小保护角的防雷效果、运行规范要求 and 改造的费用等因素,确定最优的改造方案。

3.2 加强绝缘

增加线路的绝缘强度是提高线路耐雷水平,降低雷击闪络率最直接的手段。改善绝缘对限制线路的反击闪络率和绕击闪络率都有一定作用。在各种接地条件下,加强绝缘后ZV41型杆塔的反击耐雷水平见表7。

表7 加强绝缘后的反击耐雷水平

Table 7 The performance against lighting strike after increasing insulation length kA

接地电阻/ Ω	绝缘子片数				
	32	34	36	38	40
5	273	295	318	340	362
10	211	228	245	262	279
15	171	185	199	212	226
20	145	156	167	179	190
25	125	135	145	155	165
30	111	119	128	136	145

从表7可以看出,增加绝缘子片数可以有效提高线路的耐雷水平,并且接地电阻越低,改善效果越明显。即使在接地条件较为恶劣时(接地电阻大于20 Ω),平均每片绝缘子也可以使线路耐雷水平提高5 kA左右。

通过增加绝缘子片数提高线路的防雷性能,除考虑改善的效果外,改造的可行性、工程造价也需要进行特别考虑。如果只在现有塔型的基础上增加绝缘子片数,则增加绝缘强度的主要费用源于绝缘子的造价。但是随着绝缘子串长的增加,在一定风偏条件下导线与杆塔间的距离可能小于线路的

雷电过电压间隙。因此在现有塔型条件下,增加绝缘子片数存在一定上限。

确定现有塔型条件下绝缘子串允许增加的最大长度,需要考虑线路的风偏、舞动、覆冰跳跃以及杆塔受力等多方面因素,与气象条件、导线的型号、塔头尺寸、绝缘子串种类型式等参数有关,需要经过详细的论证。此处以直线塔为例,仅从风偏的角度对该塔的最大绝缘子片数做简要分析。

在多数情况下,导线与杆塔的空气距离取决于雷电过电压。因此绝缘子串长增加时,必须保证线路在一定的风速条件下导线与塔身的距离大于雷电过电压间隙。计算雷电过电压时风速通常取 15 m/s,风偏角 φ 可按式(3)计算

$$\varphi = \arctan \frac{F_d + F_j/2}{L_s g_d + G_j/2} \quad (3)$$

式(2)中: F_d 为导线的风荷载,kg; F_j 为绝缘子串风荷载,kg; G_j 为绝缘子重量,kg; g_d 为导线重量,kg/m; L_s 为杆塔水平和垂直档距,m;导线风荷载 F_d 和绝缘子串风荷载 F_j 可表示为

$$F_j = A v^2 / 16 \quad (4)$$

$$F_d = a C D L_s W_0 \sin^2 \theta / g \quad (5)$$

式(4)、(5)中: A 为绝缘子串受风面积,单、双裙绝缘子分别取 0.02、0.03 m²/片,金具零件按加一片绝缘子计; a 为风压不均匀系数; C 为风载体型系数; L_s 为水平档距,m; v 为风速,m/s; D 为导线计算外径; θ 为风向与线路方向夹角; $W_0 = k v^2 / 2$ 为基准风压,kN/m²,其中 k 为空气密度,经过高海拔地区海拔参数校正后,3 000 m 海拔处取值 1.023 5 kg/m³; g 为重力系数,值为 9.8 N/kg。

对于风压不均匀系数,根据中国电力行业标准《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》规定,悬垂绝缘子串风偏角计算用风压不均匀系数 α 按式(6)计算

$$\alpha = 5.543(v \sin \theta)^{-0.737} \quad (6)$$

式(6)中: v 采用 10 min 平均风速; θ 为风向与线路方向夹角。风载体型系数 C ,考虑高海拔地区的覆冰状况,按规程规定,对于导线覆冰不论线径大小,均取 1.2。

按照上文公式和参数,计算得到 ZV41 塔在 15 m/s 风速时的最大风偏角为 13.48°。计算中取单联 I 串 28 片绝缘子,单重 9.7 kg。线路雷电过电压间隙取 3.3 m 并考虑 1.3 倍裕度,则最小空气间隙为 4.93 m。在这种风偏条件下,边相导线由于与塔身距离较远,增加绝缘子片数的空间较大;而对于中相导线由于塔窗尺寸的限制,在 15 m/s 风速时,最多只能增加 4

片绝缘子(结构高度 155 mm)。安全起见,增加绝缘子片数不宜超过 6 片。

3.3 降低接地电阻

虽然高海拔地区直流线路雷击闪络主要是由雷电绕击造成的,但同时反击也是造成输电线路雷击闪络的重要原因,特别是在比较严重的情况下,雷电反击可能造成线路闭锁,这是在线路运行中需要特别避免的,因而反击防护也是超高压线路防雷工作的主要内容。输电线路杆塔的接地电阻直接决定着线路的耐雷水平和反击闪络率。

在相同土壤条件下各种接地体的接地性能差别不太大。就工频接地电阻而言,在接地体总长度一定条件下,接地围框的边长越短,放射接地线长度越长、根数越少,接地装置的工频接地电阻越低。这主要是由于在上述情况下,接地体间的屏蔽作用减小,可以最有效地发挥每根接地体的散流作用。但对冲击接地电阻而言,当放射线增大到一定长度时,在延长放射线对冲击电阻的改善作用并不明显;而且减少放射线根数会在一定程度上阻碍冲击电流的散流,使冲击电阻增大。因此在考虑改造接地装置时,可以考虑在放射线数量不变情况下,增大放射线长度,减小围框边长,对杆塔的接地性能起到一定改善作用。但同时需要注意放射线长度不能过长,以免影响改造的经济性。

4 结论

文中对高海拔地区 ± 400 kV 青藏直流线路的防雷特性进行了研究,分析了典型杆塔的雷击特性,并对全线的防雷特性和改造方案进行了测算,得到如下结论:

1) ± 400 kV 青藏直流线路海拔高度在 3 000 m 以上,雷电活动不太强烈,雷暴日和落雷密度之间并没有像 IEEE 推荐或国家标准推荐值中那样明显的非线性关系,在进行防雷计算时需要结合实测数据进行拟合。

2)文中考察了 ± 400 kV 青藏直流线路的绕击和反击特性,除高海拔地区间隙冲击电压下降之外,地形复杂、陡坡、跨谷地形多也是该直流线路闪络率高的主要原因,在目前的绝缘配置情况下,全线的雷击闪络率为 0.170 7 次/(100 km·a)。

3)绕击是造成高海拔地区直流线路雷击闪络的主要原因,采用降低接地电阻、减小保护角、增加绝缘子串长等方式均能降低线路的雷击闪络率,但采用加强绝缘的方式更简单经济,但在高海拔地区常见的 15 m/s 风速下,最多只能增加 4 片绝缘子。

参考文献:

- [1] 高小刚. 直流输电线路防雷保护特性研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2012.
GAO Xiaogang. DC transmission line protection feature research[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2012.
- [2] 刘振亚. 特高压直流输电理论[M]. 北京:中国电力出版社, 2009.
LIU Zhenya. High voltage DC transmission theory[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [3] 吴焯军. 直流输电线路雷害现状与分析[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 134-137.
WU Chaojun. Current situation and analysis of lightning damage in DC transmission lines[J]. High Voltage Electrical Appliances, 2014, 50(5): 134-137.
- [4] 武汉高压研究所. 线路雷击跳闸率计算方法和500 kV超高压线路防雷设计中的几个问题[R]. 武汉:武汉高压研究所, 1982.
Wuhan High Pressure Institute. Several problems in the design of lightning tripping rate and 500 kV ultra high voltage circuit[R]. Wuhan: Wuhan High Pressure Institute, 1982.
- [5] 维列夏金, 吴维韩. 俄罗斯超高压和特高压输电线路防雷运行经验分析[J]. 高电压技术, 1998, 24(2): 76-79.
WEI Liexiajin, WU Wei-han. The experience lightning protection of ultra-high voltage and ultra-high voltage transmission line in Russia[J]. High Voltage Technology, 1998, 24(2): 76-79.
- [6] 胡毅. 输电线路运行故障分析与防治[M]. 北京:中国电力出版社, 2007.
HU Yi. Fault analysis and prevention of transmission lines[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [7] 中国电力科学研究院. 国家电网公司±500 kV跨区直流输电工程外绝缘故障分析(2004—2007年)[R]. 北京:中国电力科学研究院, 2008.
China Electric Power Research Institute. The state grid corporation ±500 kV inter-district HVDC project external insulation fault analysis(2004—2007)[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2008.
- [8] SHELEMY S J, SWATEK D R. Monte Carlo simulation of lightning strikes to the nelson river HVDC transmission lines[C]//International Conference on Power Systems Transients. Rio de Janeiro, Brazil: [s.n.], 2001: 247-257.
- [9] 张纬钺, 高玉明. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京:清华大学出版社, 2002: 193-195.
ZHANG Weibo, GAO Yuming. Overvoltage protection and insulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 193-195.
- [10] ZAKARIA Z, BASHI S M, MAILAH N F, et al. Simulation of lightning surges on tower transmission using PSCAD/EMTDC: A comparative study[C]//Student Conference on SCORE D.[S.L.]: IEEE, 2002: 426-429.
- [11] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合: DL/T 620—2016[S]. 2016.
The voltage protection and insulation coordination of ac electrical equipmen: DL/T 620—2016[S]. 2016.
- [12] RIZK F A M. Switching impulse strength of air insulation: leader inception criterion[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, PWRD-4(4): 2187-2195.
- [13] DELLERA L, GARBAGNATI E. Lightning strokes simulation by means of the lead erprogression model part I: Description of the model and evaluation of exposure of free-standing structure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, PWRD-5(4): 2009-2022.
- [14] YOUNG E S, CLAYTON J M, HILEMAN A R. Shielding of transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1963, 82(s): 132-154.
- [15] BROW N W, WHIT EHEAD E R. Field and analytical studies of transmissi on line shielding: Part II [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and System, 1969, 88(5): 617-626.
- [16] 李雨. 南方电网交直流超高压线路防雷策略研究[D]. 北京:清华大学电机系, 2007.
LI Yu. Research on the anti-lightning strategy in the southern electric power grid[D]. Beijing: Tsinghua University Electrical Engineering Department, 2007.
- [17] 黄炳纲. 高压直流架空输电线路的防雷性能研究[R]. 北京:清华大学电机系技术报告, 1989.
HUANG Weigang. Research on thunder performance in high-voltage DC overhead transmission lines[R]. Beijing: Electrical Engineering Report of Tsinghua University, 1989.
- [18] 周瑜, 杨小库, 张仲秋, 等. 青海省雷电参数统计分析[J]. 青海电力, 2013, 32(4): 4-7.
ZHOU Yu, YANG Xiaoku, ZHANG Zhongqiu, et al. Analysis lightning-parametric statistics of Qinghai province[J]. Qinghai Electric Power, 2013, 32(4): 4-7.
- [19] IEEE guide for improving the lighting performance of transmission lines: IEEE Std 1234—1997[S]. 1997.
- [20] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合: DL/T 620—1997[S]. 北京:中国电力出版社, 1997.
AC electrical devices over voltage protection and insulation coordination: DL/T 620—1997[S]. Beijing: China power press, 1997.
- [21] 社澎春. 关于输电线路防雷计算中若干参数及方法的修改建议[J]. 电网技术, 1996, 20(12): 53-56.
SHE Pengchun. Modification of several parameters and methods in the lightning protection calculation of transmission lines[J]. Power System Technology, 1996, 20(12): 53-56.

邬锦波(1993—),男,博士研究生,主要从事输电线路防雷、非线性电阻材料方面的研究。