

超高压及特高压直流输电线路雷击闪络研究

周 唯¹, 陈兴福², 任 伟³

1. 西南电力设计院, 四川 成都 610021;
2. 国网浙江省电力公司台州供电公司, 浙江 台州 318000;
3. 四川华能宝兴河水电有限责任公司, 四川 雅安 625000)

摘要: 雷击是造成输电线路闪络的重要原因。在中国跳闸率比较高的地区, 高压线路由雷击引起的跳闸约占40%~70%, 尤其是在多雷、土壤电阻率高、地形复杂的地区, 雷击事故率更高。根据已建超高压及特高压直流输电线路的雷电活动情况及特高压直流工程的典型杆塔型式, 从宏观上评估电网雷害的总体风险水平, 评估输电线路所经区域的雷击闪络风险, 以行波法和电气几何模型法与先导法对直流输电线路的反击跳闸率和绕击跳闸率进行了计算研究, 并总结了目前中国直流线路雷击闪络的主要特点。

关键词: 超高压; 特高压; 直流输电线路; 雷击闪络

Abstract: Lightning stroke is an important cause of the flashover of transmission lines. The tripping caused by lightning stroke in HV lines is about 40%~70%. Especially in the areas with much thunders, high soil resistivity and complex topography, the accident rate caused by lightning stroke is higher. According to the typical tower type and the lightning activities in UHV and EHV DC transmission lines which have been established, the overall risk level of lightning disturbance is evaluated from a macroscopic view, and the risk of lightning flashover in the region that the transmission lines passes through is also evaluated. The back-flashover tripout rate and the shield failure tripout rate of DC transmission lines are calculated and studied with the traveling wave method, electrogeometric model method and leader development method. And the main characteristics of lightning flashover in DC lines in China are summarized.

Key words: ultra-high voltage (UHV); extra-high voltage (EHV); DC transmission lines; lightning flashover

中图分类号: TM863 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)02-0010-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.02.003

0 引言

近年来东部沿海的城市建设规模和工业生产区域都在扩大发展, 中国的经济发展形势对国家电网的输送能力和交直流配套电网的可靠性提出了更高的要求。中国高压直流输电起步相对较晚, 按照电力系统规划方案, 在“十一五”和“十二五”期间, 国家电网公司加快了超特高压直流输电建设步伐。1987年年底中国投运了自行建成的舟山100 kV海底电缆直流输电工程, 随后葛洲坝—上海±500 kV电压等级, 1200 MW的大功率直流输电线路投运, 大大促进了中国高压直流输电水平的提高。2000年以后, 中国又相继建成了±800 kV特高压直流复奉示范工程、云广直流工程、锦苏直流工程、哈郑直流工程、溪浙

直流工程, 另外还有目前正在规划和建设中的灵绍(宁东)直流、酒湖直流工程。另外, 国家电网工程还建成了±660 kV银东示范工程、±500 kV葛南、龙政(三常)、江城(三广)、宜华(三沪)、德宝、伊穆(呼辽)、林枫(葛沪二回)、天广、贵广、贵广二回直流工程, 以及灵宝背靠背、高岭背靠背直流工程^[1-4]。

1 国网系统直流线路运行情况分析

通过国家电网公司下属运行单位和科研单位的调查统计, 截止2014年3月, 国家电网公司共拥有直流线路13条, 共计16587.2 km。±800 kV直流线路4回, 为复奉线(1907 km)、锦苏线(2058 km)、哈郑线(2195 km)、溪浙线(1680 km); ±660 kV直流线路1回, ±500 kV直

表1 2005—2012年国家电网公司系统直流输电线路跳闸次数统计表

电压等级/kV	雷击/次	污闪/次	冰害/次	外力破坏/次	风偏/次	鸟害/次	其他/次	合计/次
±800	3	0	0	0	0	0	4	7
±660	0	0	0	1	0	0	0	1
±500	73	47	42	15	14	4	17	212
±400	1	0	0	1	0	2	0	4
合计	77	47	42	17	14	6	21	224

表2 2005—2012年国网公司直流输电线路故障停运次数统计表

电压等级/kV	雷击/次	污闪/次	冰害/次	外力破坏/次	风偏/次	鸟害/次	其他/次	合计/次
±800	1	0	0	0	0	0	2	3
±660	0	0	0	0	0	0	0	0
±500	3	0	14	8	6	1	3	35
±400	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	4		14	8	6	1	5	38

流线路7回,±400 kV 直流线路1回。

2005—2012年,国网公司系统直流线路共发生闪络224次,强迫停运38次。其中由雷击引起的闪络77次,占统计数据的34%。2005—2012年国家电网公司系统直流输电线路跳闸次数统计详见表1所示。可以看到雷击是造成直流输电线路闪络的最主要的因素。

2005—2012年,国家电网公司系统直流输电线路共发生故障停运(线路闪络后闭锁)38次,其中由雷击引起的故障停运仅为4次,占统计数据的10%。2005—2012年国网公司直流输电线路故障停运次数统计详见表2所示。

2 国网公司系统直流线路雷击闪络情况分析

2005—2012年国家电网公司系统直流输电线路雷击闪络情况,详见表3所示。由此可知,除2007年以外,±500 kV 直流线路的雷击闪络率均在0.07~0.29次/(100 km·a)之间波动。2007年夏季受大范围强对流天气影响,公司系统区域范围内连降大雨,直流线路雷击闪络也达到历史最高的18次;近年来虽然雷击跳闸数仍在10次/a左右浮动,但由于直流线路长度增加,雷击跳闸率下降至0.1次/(100 km·a)左右。2005—2012年各年度各电

压等级直流输电线路雷击闪络次数详见图1所示。

表3 2005—2010年国网公司直流输电线路雷击跳闸情况

电压等级 时间/a	±500 kV 雷击跳闸率/(次·100 km ⁻¹ ·a ⁻¹)
2005	0.07
2006	0.066
2007	0.463
2008	0.287
2009	0.229
2010	0.153
2011	0.093
2012	0.108

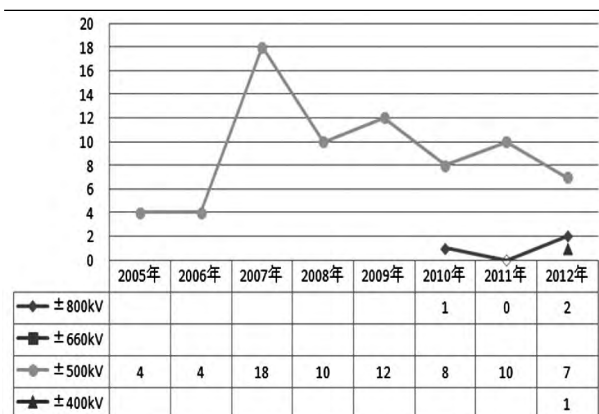


图1 2005—2012年各年度各电压等级直流输电线路雷击闪络次数

3 典型直流线路的雷击闪络情况分析

3.1 葛南、林枫高压直流输电工程

葛洲坝—南桥 ±500 kV 直流输电工程是中国第一项远距离高压直流输电工程,该工程极 I 和极 II 分别于 1989 年 9 月 17 日和 1990 年 8 月 20 日投入商业运行。额定输送功率为 1 200 MW 线路全长约 1 045 km。

随着中国电力建设的发展,特别是三峡水利发电工程的建成投运,加快了西电东送的步伐。为增加三峡水电站至华东电网输送功率、提高线路走廊输送能力,国家电网公司利用现有单回葛南 ±500 kV 直流输电线路走廊,改造为 ±500 kV 同塔双回直流输电线路,即葛南直流与林枫直流(三沪二回)线路。2011 年 3 月,随着林枫直流的投产,该同塔双回线路额定输送功率为每回 3 000 MW,共 6 000 MW,这使原走廊条件下线路的送电能力大大提高。

葛南直流工程运行前期,由于缺乏直流外绝缘设计的相关经验,外绝缘普遍偏低,外绝缘问题一直是影响该工程安全运行的一个突出问题。随着葛南直流工程外绝缘改造的完成,葛南直流输电工程的后期运行情况有所好转。图 2 所示为 2002—2009 年 ±500 kV 葛南直流输电工程各类型外绝缘事故所占比例统计情况。由图中可以看出,线路雷击闪络所占比例最大为 45%。葛南线 2004—2007 年雷击闪络次数统计,详见表 4 所示。葛南线雷击闪络率高于交流 500 kV 线路雷击跳闸率 0.14 次/(100 km·a) 的平均值。正极线易发生雷击闪络,约 81% 的雷击闪络发生在极线 I 上。

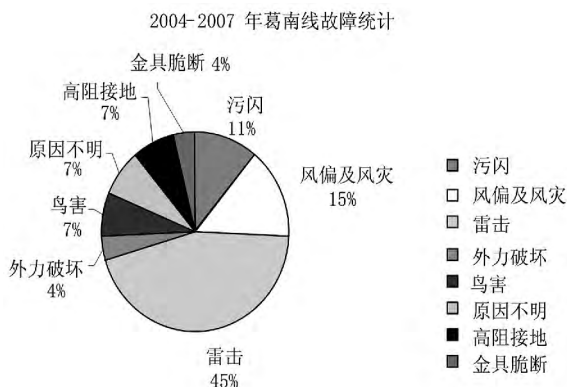


图 2 2004—2007 年 ±500 kV 葛南直流输电线路的外绝缘事故

表 4 葛南 ±500 kV 直流线路雷击闪络(2002—2009 年)

时间/a	雷击闪络/次
2002	2
2003	2
2004	4
2005	0
2006	4
2007	4
2008	4
2009	6
合计	26 (5)
雷击闪络率/(次·100 km ⁻¹ ·a ⁻¹)	0.31

注:2002—2009 年的 26 次雷击闪络中除 5 次是极 II(负极)闪络外均为极 I(正极)闪络。

3.2 ±500 kV 江城高压直流输电工程

±500 kV 江城直流输电线路起于湖北江陵换流站,由北至南穿越湖南省境内,止于广东惠州鹤城换流站,是三峡电力外送的主要通道。输电线路纵横延伸,地处旷野,穿越平原、山丘、大山区或跨越江河,且大都处于地面的制高点,因而易遭受雷击。由雷击造成的线路跳闸事故在电网总事故中占有很大的百分比。据统计,±500 kV 江城直流输电线路的雷击跳闸率占该线路总跳闸率的 40% 以上。

2004—2009 年江城线共发生雷击跳闸 20 次,全部为绕击跳闸,其中极 I(正极)跳闸 17 次,占全部雷击跳闸的 85%,极 II(负极)跳闸 3 次,占全部雷击跳闸的 15%,平均每年雷击跳闸 3.33 次,平均雷击跳闸率为 0.389 次/(100 km·a),其中 5~8 月为雷击集中期。200—2009 年江城 ±500 kV 直流线路雷击闪络次数统计,详见表 5 所示。

表 5 江城 ±500 kV 直流线路雷击闪络(2004—2009 年)

线路	年份	月份						合计
		4	5	6	7	8	9	
江城线	2004		1		2	1		4
	2005		1	1				2
	2006	1	1	1		1		4
	2007	1		1	1	1		4
	2008		1	1		1		3
	2009		1				1	3
	总计		2	5	4	3	4	1

3.3 天广、贵广高压直流输电工程

表6为南方电网广州局±500 kV天广、贵广直流线路雷电闪络情况。由表中可以看到:2003—2006年天广、贵广线共发生雷击跳闸8次,其中极I(正极)跳闸为7次,占全部雷击跳闸的87.5%;绕击跳闸6次,占全部雷击跳闸的75%;山地地形下跳闸6次,占全部雷击跳闸的75%。2004—2007年广州局直流线路雷电闪络次数统计,详见表6所示。

4 ±800 kV与±500 kV直流线路防雷性能分析

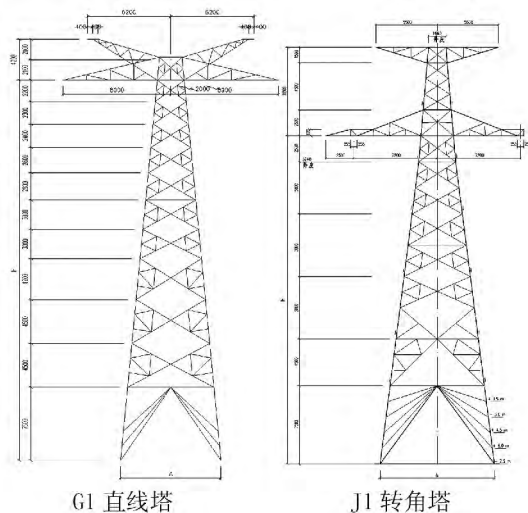
国内±500 kV直流线路已经有20年的设计、运行经验,可作为±800 kV直流线路设计的参考。现以2003年建成投产的三峡至华东第一回±500 kV直流工程(宜昌龙泉—常州政平,以下称为龙政直流)为例,计算其防雷性能,并与实际防雷运行参数相比较。

表6 广州局直流线路雷电闪络(2004—2007年)

线路名称	时间	线路极性	地形	类型	重合闸
±500 kV 天广	2003-08-23	+	水塘	绕击	不成功
	2004-08-11	+	山地	绕击	成功
	2004-08-23	+	山地	绕击	成功
	2004-09-19	+	山地	反击	成功
	2004-09-21	+	平地	绕击	成功
±500 kV 贵广	2006-06-02	+	山地	绕击	成功
	2006-05-04	-	山地	绕击	成功
	2006-06-16	+	山地	不明	成功

4.1 ±500 kV直流线路参数

±500 kV龙政直流线路全长860.2 km,典型杆塔单线图如图3所示。



注:计算中杆塔呼称高采用经济称高36 m。

图3 ±500 kV直流输电线路典型塔的单线图

全线平均雷暴日为40天。±500 kV龙政直流线路主要参数详见表7所示。

表7 ±500 kV直流线路计算所用导线地线参数

项目	型号	直流电阻 / (Ω·km ⁻¹)	导线外径 / mm	水平间距 / m	悬挂高度 / m	弧垂 / m	分裂间距 / m
地线	GJ-80	2.482 0	11.4				
	OPGW-90	0.690 0	13.0	12.4	40	13	/
极导线	6×ACSR-720/50	0.039 8	36.2	16.0	31	15	0.5

沿线地形分布和各地形的杆塔接地电阻,详见表8所示。

表8 ±500 kV直流线路沿线地形分布和杆塔工频接地电阻

地形	比例/%	工频接地电阻/Ω
平地、河网	64.76	5~10
丘陵	11.25	10~15
一般山地	20.95	15~20
高山大岭	3.04	20~30

中国电科院对±500 kV直流线路的雷电性能进行了计算,绕击采用电气几何模型方法(electro-geometric model, EGM)计算,反击采用行波法计算。系统最大工作电压为510 kV,雷电U_{50%}为按间隙距离6 m考虑,为3 150 kV。

4.2 ±500 kV直流线路耐雷性能计算

目前,国内外用于输电线路绕击耐雷性能的计算方法,主要采用电气几何模型法和先导发展模型法。这里采用EGM对特高压直流线路进行绕击耐雷性能的评估,并与电气几何模型法、先导法等计算结果进行对比计算,并采用了IEEE标准所推荐的击距公式,计算中假设雷电的极性为负极性^[5,6]。EGM的基本原理为:由雷云向地面发展的先导头部到达距被击物体临界击穿距离(简称击距)的位置以前,击中点是不确定的,先到达哪个物体的击距之内,即向该物体放电;击距同雷电流幅值有关。根据杆塔单线图,±500 kV龙政直流地线保护角为11.3°。±500 kV直流线路绕击雷电性能的计算结果,详见表9所示。

从表9中计算结果可见,虽然地线在杆塔处的保护角相对较大,但由于杆塔高度相对较低,平原和丘陵地区地线可以完全屏蔽极导线;只有在山地和高山正负极线均有可能发生绕击闪络,绕击闪络概

率相对较大。

表9 ±500 kV 直流线路绕击雷电性能的计算

地线保护角/(°)	地形	极线	绕击闪络率	绕击闪络率/(次·100 km ⁻¹ ·a ⁻¹)		
11.3	平原	+	0	0		
		-	0			
	丘陵	+	0	0		
		-	0			
	山地	h_{dt}	+	0	0	
			-	0		
		$1.5h_{dt}$	+	2.836		3.223
			-	0.387		
	高山	+	4.641	6.540		
		-	0.899			

±500 kV 直流线路反击耐雷水平的计算结果, 详见表10所示。计算中, 对于负极性雷, 反击闪络均发生在正极线上, 负极线不易发生反击闪络。从表10中计算结果可见: 杆塔工频接地电阻在10 Ω以下时, ±500 kV 直流线路反击耐雷水平较高, 反击闪络率较低^[7, 8]。

将±500 kV 直流线路的绕击闪络率和反击闪络率相加便可得到其雷击闪络率再考虑沿线地形等因素便可求得整条线路的加权平均雷击闪络率^[9]。

通过计算可得: 全线860.2 km 每年雷击闪络约5次, 加权平均雷击闪络率为0.58次/(100 km·a)。

表10 ±500 kV 直流线路反击雷电性能的计算

间隙距离	工频接地电阻/Ω	反击耐雷水平/kA	反击耐雷水平概率	反击闪络率/(次·100 km ⁻¹ ·a ⁻¹)
6 m	30	136	0.028 5	0.533
	20	173	0.010 8	0.202
	15	201	0.005 2	0.065
	10	243	0.001 7	0.021
	5	312	0.000 3	0.004

表11 ±500 kV 直流线路雷电闪络事故

线路	线路长度/km	雷击闪络次数					雷击闪络率/(次·100 km ⁻¹ ·a ⁻¹)
		2004年	2005年	2006年	2007年	合计	
葛南线	1 045	4	0	3	4	11	0.26
龙政线	895	1	2	1	4	8	0.22
江城线	940	1	2	4	4	11	0.29
宜华线	1 070	/	/	/	5	5	0.47

4.3 ±500 kV 直流线路运行经验

国家电网公司±500 kV 跨区直流输电工程2004—2007年运行情况, 详见表11所示。

从表11中数据可知4条±500 kV 直流线路雷击闪络率运行值为0.22~0.47次/(100 km·a), 4条直流线路的综合雷击闪络率为0.28次/(100 km·a)。此运行数据小于龙政线的雷击闪络率的计算值0.58次/(100 km·a)。可见采用EGM对特高压直流线路进行绕击耐雷性能的评估还是偏保守的, 原因分析如下。

(1) 山地的绕击闪络率占雷击闪络率的比重较大, 而山区地形复杂, 较难用一种模型进行模拟, 计算中偏严考虑, 采用了严苛的情况^[10]。

(2) 随着防污的要求, 直流线路逐年调爬, 实际线路杆塔的空气间隙距离可能大于计算值6 m。

4.4 ±800 kV 直流线路雷击闪络率计算值

雷击一直是导致输电线路闪络和强迫停运的主要原因之一, 直流线路也不例外。由于±800 kV 特高压直流线路绝缘高, 不易发生雷电反击闪络, 雷击闪络主要是由于绕击造成的, 为此途径雷电活动频繁地区的±800 kV 线路采用了负地线保护角的措施来降低绕击闪络率。

对±800 kV 特高压直流线路的雷电性能计算分析, 可采用电气几何模型进行绕击闪络率计算, 采用行波法进行反击闪络率计算。表12统计出了复奉、锦苏、哈郑、溪浙、灵绍特高压直流输电线路防雷计算结果, 计算偏严考虑, 反击计算时杆塔接地电阻

表12 ±800 kV 特高压直流线路的防雷核算计算结果

线路名称	复奉线	锦苏线	哈郑线	溪浙线	灵绍线
线路长度/km	1 907	2 058	2 195	1 680	1 720
年平均雷暴日	47.2	50.3	24.7	63.7	29.5
绕击闪络率/ (次·100 km ⁻¹ ·a ⁻¹)	0.225	0.241	0.094	0.298	0.069
反击闪络率/ (次·100 km ⁻¹ ·a ⁻¹)	0.139	0.143	0.039	0.152	0.12
雷击闪络率/ (次·100 km ⁻¹ ·a ⁻¹)	0.364	0.384	0.133	0.45	0.189
数据来源	中国电科院	中国电科院	中国电科院(武汉)	中国电科院	中国电科院

采用设计值 绕击计算时,地形因素偏严苛考虑。

从表12 计算结果统计值可知,线路路径雷电活动越强烈雷击闪络率越大,绕击闪络占雷击闪络的主要部分。±800 kV 特高压直线塔采用V型绝缘子串,保护角小于-6°,平原、丘陵地区地线可完全屏蔽导线,山区和高山大岭地区绕击闪络率较大。

目前绕击计算所采用的方法和参数和±500 kV 高压直流线路运行经验相对一致,但±800 kV 复奉线2010—2012年的平均雷击闪络率为0.05次/(100 km·a),表4~12雷击闪络率计算值大于复奉线的运行值,主要是因为计算中山地的绕击闪络率占雷击闪络率的比重较大,而山区地形复杂,较难用一种模型进行模拟,计算中偏严苛考虑,采用了严苛的情况。且±800 kV 复奉线运行时间相对较短,有待进一步积累运行经验,修正防雷计算方法。

5 小 结

由以上运行数据及模拟计算分析,可以总结出中国直流线路雷击闪络的主要特点为如下。

(1) 随着中国输电线路防雷技术及管理水平的不断提高,近年来直流线路因雷击造成的闪络率则呈持续下降的趋势;

(2) 与交流系统相同,直流线路的雷击闪络绝

大多数为绕击闪络,且在山区地形下更容易发生闪络;

(3) 由于中国的雷电多为负极性雷,直流线路正极性导线容易发生雷击闪络。

参考文献

- [1] 朱文卫. 特高压直流输电线路耐雷水平和雷击闪络率的研究[J]. 科技信息, 2010(31): 751-807.
- [2] 李立涅, 司马文霞, 杨庆, 等. 云广±800 kV 特高压直流输电线路耐雷特性研究[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 1-5.
- [3] Hara T, Yamamoto O. Modelling of a Transmission Tower for Lightning - surge Analysis [J]. IEEE PGTD, 1996(3): 283-289.
- [4] 鲁旭臣, 毕海涛, 黄福存. ±500 kV 超高压直流输电线路耐雷性能的研究[C]. 中国电机工程学会高压专业委员会2009年学术年会论文集, 2009.
- [5] 聂定珍, 周沛洪, 戴敏, 等. ±500 kV 同杆双回直流线路雷电性能的研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 148-151, 155.
- [6] 叶会生, 何俊佳, 李化, 等. 雷击高压直流线路杆塔时的过电压和闪络仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(21): 31-35.
- [7] 孙振, 王建国, 谢从珍, 等. 110~500 kV 复合绝缘子的雷电闪络特性[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 43-46.
- [8] 任晋旗, 崔吉峰, 李震宇, 等. 合成绝缘子悬挂方式对雷电冲击特性影响[J]. 高电压技术, 2006, 32(1): 29-31.
- [9] 孙鹤鸿, 任晋旗, 严萍, 等. 架空输电线路雷击跳闸率影响因素研究现状[J]. 高电压技术, 2004, 30(12): 12-14.
- [10] 陆宠惠, 聂定珍. 线路雷电过电压的绝缘配合[J]. 高电压技术, 1996, 22(2): 91-94.

作者简介:

周 唯(1982), 硕士, 工程师, 从事输电线路技术设计工作;

陈兴福(1982), 硕士, 工程师, 从事电网工程基建项目管理工;

任 伟(1982), 本科, 工程师, 从事水电站运行维护工作。

(收稿日期: 2014-12-21)