

±800 kV 特高压直流输电线路雷电性能及防护措施研究

颜子威, 龚有军[✉], 何智文

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 雷击是造成±800 kV 特高压直流输电线路故障的首要原因, 开展输电线路防雷评估对系统的安全与稳定运行至关重要。[方法] 文章依托我国某在建±800 kV 特高压直流输电线路工程, 根据工程设计使用条件选用导、地线型, 通过沿线各海拔、气象区分布塔型数量, 确定了主力杆塔; 综合沿线各塔位地面倾角、土壤电阻率、雷暴日、气象区等分布比例, 评估了全线耐雷性能, 并针对工程雷电特性, 提出了具体的防雷优化措施, 此外, 还对比了电气几何模型 (EGM) 法中关于地形考虑的 2 种方法间的计算差异。[结果] 计算结果表明: 工程综合雷击闪络率不满足设计参考值要求, 全线以绕击防护为主, 沿线雷暴日与杆塔正极侧的地形条件是防雷关键影响因素。[结论] 将全线位于 C 级及以上多雷区, 山区正极侧地面倾角 $\geq 25^\circ$ 的杆塔保护角采用 -15° 设计后, 可满足雷击闪络率不大于 0.10 次/(100 km·a·40 d) 的防雷要求, 经分析对比邻近已投运±800 kV 线路的耐雷性能与实际运行数据, 论述了文章计算方法及结果的合理性。

关键词: 特高压直流输电线路; 雷电性能; 防雷优化措施; 雷击闪络率; 电气几何模型 (EGM)

中图分类号: TM7; TM863

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)02-0110-09

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Lightning Performance and Protective Measures of ±800 kV UHVDC Power Transmission Line

YAN Ziwei, GONG Youjun[✉], HE Zhiwen

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] Lightning strike is the primary cause of failures of ±800 kV UHVDC power transmission lines, and the lightning protection assessment of power transmission lines is critical to the safe and stable operation of the system. [Method] Based on a ±800 kV power transmission line project under construction in China, the conductor and ground wire types were selected according to the design and use conditions of the project, and the typical towers were determined according to the altitude and meteorological area distribution along the line. After comprehensive consideration of the distribution ratio of ground inclination, soil resistivity, thunderstorm days, meteorological zone, etc. of towers along the line, the lightning protection performance of the line was evaluated and specific lightning protection measures were proposed in respect of the lightning characteristics of the project. In addition, the calculation differences between the two methods regarding terrain considerations in the EGM were compared. [Result] The calculation results show that the comprehensive lightning flashover rate doesn't meet the requirements of design reference value and mainly protect against shielding failure. Thunderstorm days and the terrain conditions on the positive side of tower are the key factors for lightning protection. [Conclusion] After adopting the -15° tower protection angle, the line located in lightning areas with C level and above whose positive side ground inclination angle is $\geq 25^\circ$ can meet the lightning protection requirements that the lightning flashover rate is not more than 0.10 fl/(100 km·a·40 d). The lightning protection performance and actual operating data of this project and adjacent ±800 kV as-built lines are compared and analyzed, which verifies the rationality of the calculation method and results in this paper.

Key words: UHVDC power transmission line; lightning performance; lightning protection optimization measures; lightning flashover

收稿日期: 2021-10-26 修回日期: 2022-01-03

基金项目: 中国能建广东院科技项目“±800 kV 特高压直流输电控制与保护设备技术要求”(ER03691W)

rate; electrical geometric model (EGM)

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

± 800 kV 特高压直流输电线路作为直流输电系统的重要组成部分,其安全与稳定性尤为重要^[1],据相关资料显示,截至2017年12月底, ± 800 kV 复奉线、 ± 800 kV 锦苏线、 ± 800 kV 宾金线共发生各类重启28次。其中,雷击导致重启19次,占有重启事故的67.9%,是造成“三大直流”线路重启的首要原因^[2]。

输电线路电压等级、杆塔设计、导线参数、地形与地质条件等都会对特高压直流线路的雷电性能造成影响^[3-5]。国内外对于输电线路的绕击耐雷性能分析方法^[6]主要涵盖规程法、经典与改进的电气几何模型(EGM)法、先导发展模型(LPM)法。其中规程法^[7]基于运行经验及小电流下的模型试验结果提出,工程应用较为简单,但对于超(特)高压等级线路,该方法与实际运行情况的差别较大;先导发展模型^[8]基于长空气间隙放电与雷电放电过程的相似性,较为清晰地描述了雷电绕击发展的物理内涵,但针对先导起始、击穿判据、上下行先导发展规律目前仍存在不同的观点,且尚无运行经验验证。改进的电气几何模型法^[9]在经典几何模型基础上考虑了构筑物结构高度对引雷效果的影响,应用简便,且和实际运行经验相比较为相符,该方法在日本、欧美等国家得到了广泛运用,在我国也得到了普遍认可,因此,本文采用EGM法计算线路的雷电绕击性能。对于雷电反击的分析方法,目前主要包括规程法、行波法、蒙特卡洛法以及电磁暂态程序法(EMTP)^[10]。其中EMTP法在相关科研及设计单位应用较为广泛,目前使用较多的仿真软件有“ATP-EMTP”和“PSCAD-EMTDC”等,在电力系统雷电过电压的数值分析领域提供了有效手段^[11-13],本文采用该方法并结合杆塔的多波阻抗模型分析输电线路的雷电反击性能,计算时考虑了波在传播过程中的畸变、折反射、绝缘子串击穿的物理过程以及杆塔结构对波传播过程的影响等因素。

特高压直流线路工程沿线走廊雷电活动、海拔、气象、地形与地质条件等因素分布复杂,在工程建设前期开展防雷专项评估、提出必要的保护优化措施

是确保工程安全稳定运行的关键,本文依托我国某在建 ± 800 kV 直流线路工程,开展线路耐雷性能、防雷保护措施等方面的分析研究,为今后特高压直流输电线路的防雷设计及运行提供技术参考。

1 计算边界条件

1.1 沿线雷电活动统计

通常将地区的雷电活动频繁程度用年平均雷暴日(Thunderstorm days, T_d)或地闪密度(Ground flash density, N_g)表示。地闪密度与雷暴日之间的换算关系可由式(1)确定。

$$N_g = 0.023T_d^{1.3} \quad (1)$$

根据年平均雷暴日数或地闪参数将雷区划分为4个层级,分别为少雷区($T_d < 15$, $N_g \leq 0.78$)、中雷区($15 \leq T_d < 40$, $0.78 < N_g \leq 2.78$)、多雷区($40 \leq T_d < 90$, $2.78 < N_g \leq 7.98$)与强雷区($90 \leq T_d$, $7.98 < N_g$)。由气象台站雷暴日统计数据,沿线雷暴日数的分布比例如表1所示,全线加权平均雷暴日数为47.2 d。

表1 沿线雷暴日统计

Tab. 1 Statistics of thunderstorm days along the line

雷暴日/d	线路长度/km	所占比例/%
40	1 165.8	55.39
50	676.6	32.14
70	211.1	10.03
80	51.4	2.44

1.2 线路参数

导、地线型根据工程实际设计条件选用,基本计算参数如表2所示。

基于沿线不同海拔及组合气象区所采用的塔型数量,各选取一基主力杆塔如表3所示。以ZC27102A典型杆塔为例,其极导线布置情况、塔头尺寸等计算参数如图1(a)所示。

杆塔采用多波阻抗模型^[14],对横担及塔身的不同尺寸部位进一步细化为多段波阻抗,如图1(b)所示。该模型不仅反应了波在杆塔上的行进,还考虑到了杆塔自身结构及不同高度对地电容的变化。

表 2 极导线与地线计算参数

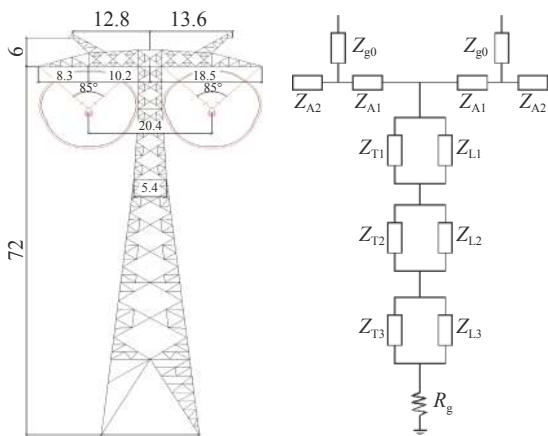
Tab. 2 Calculating parameters for pole conductor and ground wire

类型	导线型号	直流电阻/[Ω·(km) ⁻¹]	外径/mm	计算弧垂/m	悬挂高度/m
极导线	JL1/G3A-1000/45	0.028 9	42.1	20.18	54~75
	JL1/G2A-1000/80	0.028 6	42.9	9.77~22.34	54~75
	JL1/G2A-900/75	0.034 5	40.6	15.57~17.1	54~75
	JLHA4/G2A-900/75	0.034 5	40.6	16.71~26.38	54~75
	JLHA1/G2A-900/75	0.037 4	40.6	12.93	54~75
普通地线	JLB20A-150	0.581	15.8	5.85~17.55	60~81
	JLB20A-240	0.358	20.0	11.9~15.01	60~81
	JLB20A-300	0.420	11.5	7.26	60~81

表 3 不同地形、海拔及冰区所选用典型杆塔

Tab. 3 Typical towers selected for different terrains, altitudes and ice zone

地形	冰区/mm	海拔/m	主力塔型	带电体对塔身构件 最小间隙距离/m
平丘	10	0~1 500	Z27102A	6.74
	10	0~1 500	ZC27102A	6.74
山地	10	1 500~2 000	ZC30102A	7.05
	15	0~2 000	ZC27153A	7.11
	15	2 000~3 000	ZC30151B	8.43
	20	500~1 500	ZC27204A	8.10
	20	1 500~3 000	ZC30203B	10.10
	30	1 000~2 000	ZC27302B	10.02
	30	2 000~3 500	ZC30301B	9.79
	40	1 000~2 500	ZC27401B	8.41
	60	2 000~3 000	ZC3060B	7.70



注：图中尺寸单位为 m。

图 1 典型塔型及多波阻抗模型

Fig. 1 Typical tower type and multi-wave impedance model

1.3 沿线地形条件

工程沿线地形分布比例以及塔位正、负极侧地面倾角占比分别如表 4、图 2 所示。

表 4 沿线地形分布占比

Tab. 4 Distribution ratio of terrain along the line

地形类别	河网泥沼	平地	丘陵	一般山地	高山
比例/%	3.1	2.1	20.1	55.6	19.1

1.4 沿线土壤电阻率

沿线土壤电阻率分布如图 3 所示，接地电阻根据各塔位土壤电阻率实测结果参照《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》(GB 50790—2013)^[15] 中取值。

2 线路雷电性能及防护措施研究

2.1 雷电绕击性能计算

采用 ATP-EMTP 电磁暂态仿真程序结合改进的电气几何模型法计算线路绕击性能^[16-17]，雷电流对于地线及大地的击距可分别由式(2)与式(3)确定：

$$r_s = 10I^{0.65} \quad (2)$$

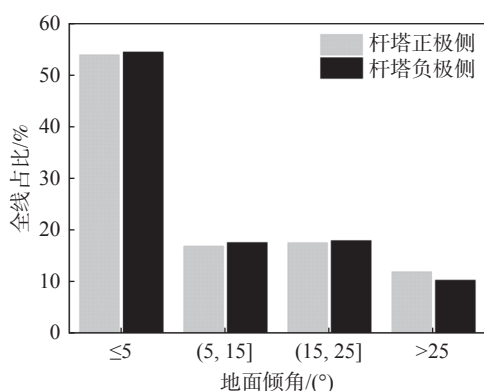


图 2 沿线杆塔地面倾角分布比例

Fig. 2 Distribution ratio of ground inclination of towers along the line

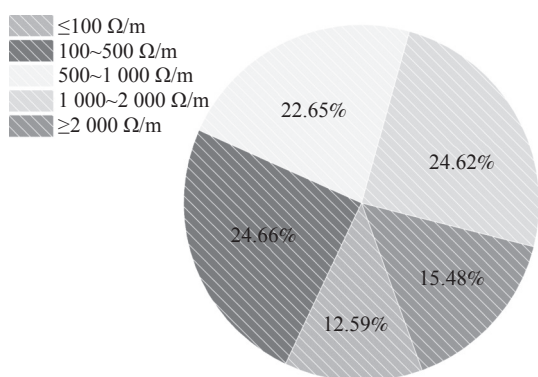


图 3 沿线土壤电阻率分布比例

Fig. 3 Distribution ratio of soil resistivity along the line

$$r_g = \begin{cases} [3.6 + 1.7 \ln(43 - h_c)] I^{0.65} & (h_c < 40 \text{ m}) \\ 5.5 I^{0.65} & (h_c \geq 40 \text{ m}) \end{cases} \quad (3)$$

极导线的击距还需考虑系统工作电压对雷电先导的影响, 负极性雷对极导线的击距如式(4)所示:

$$r_c = 1.63(5.015 I^{0.578} - 0.001 U_{dc})^{1.125} \quad (4)$$

式中:

r_s 、 r_g 、 r_c ——雷电流对地线、大地与极导线的击距(m);

I ——雷电流(kA);

h_c ——导线平均高度(m);

U_{dc} ——极导线上的工作电压(kV)。

当杆塔较高时有雷电先导侧向击中导线的情况发生, 在绕击计算中考虑了雷电先导和垂直大地平面成一定入射角的情况, 入射角概率密度采用日本研究成果, 见式(5)。

$$g(\psi) = 0.75 \cos^3(\psi) \quad (5)$$

式中:

ψ ——入射角(°);

$g(\psi)$ ——入射角概率密度。

以图 1 所示典型杆塔为例, 采用杆塔实际间隙, 计算得到该塔型在不同地面倾角、呼高及保护角等组合条件下的绕击闪络率, 如表 5 所示。

本工程全线对于平丘塔型保护角取 0°, 山地保

表 5 典型杆塔在不同组合条件下的绕击闪络率

Tab. 5 Shielding flashover rate of typical towers under different combination conditions

雷暴日/d	呼称高/m	地面倾角/(°)	绕击闪络率/[次·(100 km) ⁻¹ ·a ⁻¹]					
			-10°	-11°	-12°	-13°	-14°	-15°
40	72	0	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
		10	0.193	0.155	0.123	0.096	0.059	0.053
		20	0.842	0.757	0.676	0.600	0.483	0.464
		30	1.498	1.399	1.303	1.211	1.064	1.039
	66	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		10	0.082	0.063	0.046	0.033	0.016	0.014
		20	0.448	0.391	0.339	0.291	0.221	0.210
		30	1.028	0.942	0.861	0.785	0.664	0.644
	60	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		10	0.030	0.020	0.013	0.008	0.002	0.002
		20	0.217	0.186	0.157	0.131	0.094	0.089
		30	0.545	0.489	0.438	0.390	0.319	0.308
54	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	10	0.008	0.004	0.002	0.001	0.000	0.000	
	20	0.094	0.078	0.064	0.051	0.034	0.032	
	30	0.263	0.232	0.204	0.179	0.141	0.135	

护角取 -10° ，根据表 3 中所选用的典型杆塔，综合全线 15 个设计包段在不同地形、海拔、冰区、雷暴日下的分布比例，经加权统计得到各地区平均绕击闪络率如表 6 所示。40 d 雷暴日下，各设计包段间的绕击闪络率随地面倾角占比的变化关系如图 4 所示。

表 6 沿线各地区及全线平均绕击闪络率

Tab. 6 Average shielding failure flashover rate of all regions along the line and the whole line

线路所属地区	线路长度/km	杆塔正极侧 $\geq 20^\circ$ 倾角占比/%	绕击闪络率/[次·(100 km) $^{-1}$ ·a $^{-1}$]
四川省	388.7	18.05	0.092 7
重庆市	328.5	21.50	0.106 0
湖北省	787.1	22.00	0.104 5
安徽省	486.7	24.06	0.102 5
浙江省	113.8	22.41	0.135 9
全线	2 104.9	21.70	0.107 2

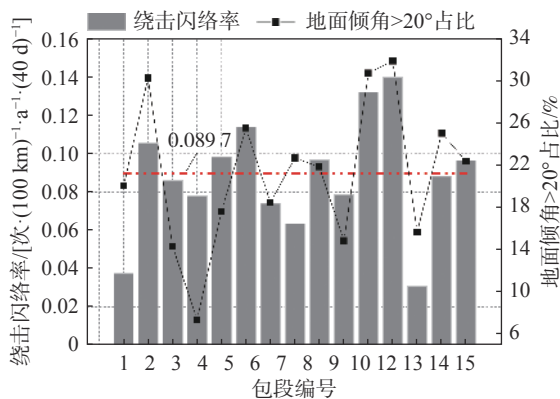


图 4 各设计包段雷电绕击闪络率

Fig. 4 Lightning shielding failure flashover rate of design line sections

计算结果表明，全线加权平均绕击闪络率为 0.107 2 次/(100 km·a)。由图 4 可见，各包段折算至 40 d 雷暴日下的绕击闪络率与杆塔正极侧地面倾角占比的变化规律基本一致，但不同包段间的绕击闪络率受地形(地面倾角)因素影响的显著性有所区别，这主要由于工程沿线海拔条件及风、冰等气象环境的分布差异所造成，例如，在线路所经四川凉山州、湖北恩施、湖北宜昌等高海拔、重冰区分布较多的区域，这些地区塔头间隙设计裕度相对较大，防雷性能较好，对于由于地形因素造成的雷电屏蔽失效作用来说有一定缓冲作用。而对于轻、中冰区占比较多

的区域则相反，地面倾角对绕击率的影响更为显著。

2.2 雷电反击性能计算

运行经验表明，雷击档距中央地线与极导线发生反击闪络的情况罕见，可不予考虑。本文在雷电反击性能计算中仅考虑雷击塔顶的情况。

雷击杆塔时，极导线上的感应过电压磁分量比电分量要小得多。忽略极导线至地面间的电场强度变化，视为与地面处相同，极导线上的感应电压可通过式(6)进行计算^[18-19]：

$$U_s = 2.2I^{0.4}h_c \left(1 - \frac{h_g}{h_c}k_0\right) \quad (6)$$

式中：

h_g ——地线对地平均高度(m)；

k_0 ——地线与导线间的耦合系数。

以图 1 所示典型杆塔为例，在不同接地电阻及计算呼高下的雷电反击耐雷水平与反击闪络率如表 7 所示。

综合各包段土壤电阻率、海拔、冰区、雷暴日等

表 7 典型杆塔在不同组合条件下的反击闪络率

Tab. 7 Back flashover rate of typical towers under different combination conditions

雷暴日/d	呼称高/m	接地电阻/ Ω	耐雷水平/kA	反击闪络率/[次·(100 km) $^{-1}$ ·a $^{-1}$]
40	72	10	289	0.018
		15	279	0.023
		20	268	0.031
		25	257	0.041
		30	239	0.061
		10	304	0.012
	66	15	292	0.016
		20	280	0.022
		25	268	0.031
		30	248	0.046
		10	324	0.007
		15	310	0.010
60	20	296	0.014	
	25	281	0.021	
	30	258	0.034	
	10	348	0.004	
	15	330	0.006	
	54	20	312	0.009
54	25	295	0.014	
	30	268	0.025	

分布比例, 经加权统计得到各地区的平均反击闪络率如表 8 所示。40 d 雷暴日下, 各包段间的反击闪络率与土壤电阻率占比的变化关系如图 5 所示。

表 8 沿线各地区及全线平均反击闪络率

Tab. 8 Average back flashover rate of all regions along the line and the whole line

线路所属地区	线路长度/km	土壤电阻率大于 1 000 Ω·m ⁻¹ 占比/%	反击闪络率/[次·(100 km) ⁻¹ ·a ⁻¹]
四川省	388.7	25.34	0.020 6
重庆市	328.5	54.88	0.020 2
湖北省	787.1	32.05	0.020 9
安徽省	486.7	49.21	0.029 4
浙江省	113.8	64.47	0.049 9
全线	2 104.9	40.04	0.024 3

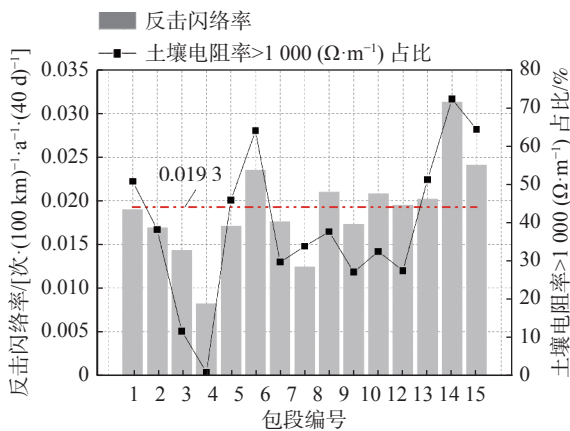


图 5 各设计包段雷电反击闪络率

Fig. 5 Lightning back flashover rate of design line sections

计算结果表明: 全线加权平均反击闪络率为 0.024 3 次/(100 km·a)。各设计包段折算至 40 d 雷暴日下的反击闪络率随土壤电阻率占比的变化趋势基本一致, 土壤电阻率越高, 则雷电流负反射波对雷电流的削弱作用减小, 反击闪络率越高。

2.3 综合雷击闪络率计算

将全线绕击闪络率与反击闪络率求和可得综合雷击闪络率如表 9 所示。

表 9 全线综合雷击闪络率

Tab. 9 Comprehensive lightning flashover rate of the whole line

线路长度/km	绕击闪络率/[次·(100 km) ⁻¹ ·a ⁻¹]	反击闪络率/[次·(100 km) ⁻¹ ·a ⁻¹]	综合雷击闪络率/[次·(100 km) ⁻¹ ·a ⁻¹]
2 104.9	0.107 2	0.024 3	0.131 5

由表 9 可见, 全线综合雷击闪络率为 0.131 5 次/(100 km·a), 折算至每年的雷击闪络次数要小于 3 次/a, 且以绕击为主要雷闪形式, 本文计算结论与以往特高压直流工程运行经验相符。当平丘地区保护角取 0°, 山地保护角取 -10° 的条件下, 全线综合雷击闪络率要略大于《架空输电线路防雷导则》(Q/GDW 11452—2015)^[20] 中对于 ±800 kV 线路雷击风险指标为 0.10 次/(100 km·a·40 d) 的控制要求。

2.4 防雷优化措施

表 10 给出了平丘与山地地区线路段杆塔在不同地线保护角取值下的全线绕击闪络率测算结果。

表 10 不同保护角取值下的全线绕击闪络率

Tab. 10 Shielding failure flashover rate under different protection angles

保护角	平丘 0°	平丘 -5°	平丘 -10°	平丘 0°	平丘 -5°
	山地 -10°	山地 -10°	山地 -10°	山地 -15°	山地 -15°
绕击闪络率	0.107 2	0.101 0	0.099 5	0.058 7	0.053 2

由于工程沿线所经平丘地区杆塔占比较小, 平丘塔型地线保护角的优化对于全线绕击闪络率来说总体影响不大。测算结果表明: 当平丘地区杆塔保护角不变, 山地杆塔保护角取 -15° 时, 全线绕击闪络率降幅高达 45.24%。

我国大部分下行雷为负极性, 正极导线更易吸引下行负极性雷电先导, 根据以往直流特高压工程雷击闪络记录, 正极侧雷击故障占比约为 84%。结合本工程计算结论与实际运行数据, 本工程沿线雷电活动情况与杆塔正极侧地形条件是防雷的关键影响因素。雷暴日较大的地区, 线路走廊落雷密度大, 线路遭受雷击的概率较高; 地面倾角较大的杆塔对雷电的屏蔽效应减弱, 绕击闪络率提高。考虑到防雷措施的可靠性与经济性, 针对杆塔地面倾角及落雷密度分布实测情况, 表 11 给出了当前保护角条件下, 即平丘地区保护角取 0°, 山地保护角取 -10°, 并进一步将沿线位于 C 级及以上多雷区, 山地正极侧地面倾斜角 ≥ 20° (方案 A) 与 ≥ 25° (方案 B) 的杆塔地线保护角进一步降低 5° 后的综合雷击闪络率测算结果及各方案对应的经济技术指标。

由表 11 可见, 将本工程位于 C 级及以上多雷区, 山地正极侧地面倾角 ≥ 25° 的杆塔保护角进一步降

低 5°后, 全线综合雷击闪络率相比原方案降低 9.92%, 可满足±800 kV 线路综合雷击闪络率不大于 0.10 次/(100 km·a·40 d)的控制要求。

表 11 保护角优化后的全线综合雷击闪络率

Tab. 11 Comprehensive lightning flashover rate of the whole line after the protection angle is optimized

方案	需改造杆塔数量/基	改造经费/万元	综合雷击闪络率/[次·(100 km) ⁻¹ ·a ⁻¹ ·(40 d) ⁻¹]	降低百分数/%
原方案	0	0	0.108 9	0.00
A	227	136.60	0.079 3	-27.17
B	90	65.18	0.098 1	-9.92

2.5 不同绕击计算方法下的雷击闪络率对比

工程计算中当采用电气几何模型法(EGM)评估线路绕击性能时, 对地形因素的考虑主要有两种观点与方法, 其中, 方法一(本文): 以直流杆塔正极与负极性导线侧的实际地面倾角考虑; 方法二^[1]: 根据表 3 中的地形类别对极导线的平均高度 h'_c 进行初估, 该方法对于不同地形类别, 在确定极导线高度时采用不同的选取原则如式(7)所示。

$$h'_c = \begin{cases} h_{dt} - 2S_d/3 & (\text{河网、平地}) \\ h_{dt} & (\text{丘陵}) \\ 1.5h_{dt} & (\text{一般山地}) \\ 2h_{dt} & (\text{高山}) \end{cases} \quad (7)$$

不同地形条件下, 地线对地平均高度 h'_g 的计算方法如式(8)所示:

$$h'_g = h_d + (h_{bt} - h_{dt}) + \frac{2}{3}(S_d - S_b) \quad (8)$$

式中:

h_{dt} ——杆塔处极导线高度(m);

h_{bt} ——杆塔处地线高度(m);

S_d ——极导线弧垂(m);

S_b ——地线弧垂(m)。

由上述方法二, 本工程全线综合闪络率加权计算结果对比如表 12 所示。采用方法二下的绕击闪

表 12 不同地形考虑方法下的雷击闪络率计算对比

Tab. 12 Comparison of calculation of lightning flashover rate under different terrain considerations

计算方法	次/(100 km·a)		
	绕击闪络率	反击闪络率	综合雷击闪络率
方法一	0.107 2	0.024 3	0.131 5
方法二	0.178 1	0.024 3	0.202 4

络率相比方法一增加约 66.1%, 综合雷击闪络率增加 53.9%。这主要由于此方法未考虑杆塔沿山区地形的实际架设情况, 基于 EGM 法计算原理, 当杆塔沿坡方向架设时, 如图 6(a)及图 6(b)所示, 位于下坡侧的极导线暴露弧增大, 地面对雷电的屏蔽效果减弱; 当杆塔沿爬坡方向架设时, 如图 6(c)所示, 杆塔两侧极导线与地面大致平行, 地面的屏蔽效果可大致等效为平地对雷电的屏蔽作用, 因此, 采用该方法在线路杆塔爬坡架设情形下的绕击计算值相比实际情况会显著增大, 需进一步结合全线杆塔沿山区地形的架设情况对计算结果进行修正。

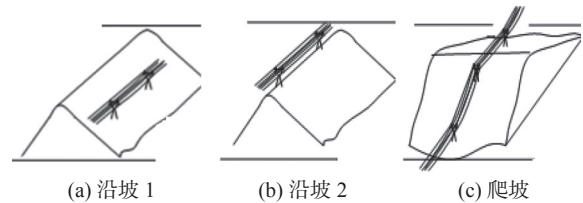


图 6 杆塔在山区环境下的架设

Fig. 6 Erection of towers in mountainous environment

2.6 邻近已投运±800 kV 线路雷击闪络率实际运行值与计算值对比

选取投运年限较长且与本工程相对邻近的±800 kV 复奉线、锦苏线、灵绍线等直流特高压工程的综合雷击闪络率理论计算值线路与实际运行数据对比如表 13 所示。

表 13 邻近特高压线路雷击闪络率运行值与计算值对比
Tab. 13 Comparison of operating value and calculated value of lightning flashover rate of adjacent UHV lines

工程名称	投运日期	年平均雷暴日/d	平均雷击闪络率/[次·(100 km) ⁻¹ ·a ⁻¹]		
			运行值	计算值	数据来源
±800 kV 复奉线	2009.12	47.2	0.018	0.364	中国电科院
±800 kV 锦苏线	2012.06	50.3	0.049	0.384	中国电科院
±800 kV 灵绍线	2016.08	50.0	0.051	0.189	中国电科院

由表 13 可见, 以往直流特高压工程雷击闪络率理论计算值与实际运行经验相比较为保守, 实际运行值大都在 0.10 次/(100 km·a)以下, 且远小于理论计算结果。这主要由于以往特高压直流线路防雷计算均采用较小的杆塔规划间隙; 此外, 对于所经高海

拔,重冰区较多的线路工程,塔头间隙尺寸的不同将导致线路的耐雷性能存在明显差异,对于全线雷击闪络率评估来说有较大影响;山区杆塔所处地形环境较为复杂,沿山坡架设的杆塔,靠近上坡侧的线路,雷电下行先导与上山坡间更易满足跃变,雷电的屏蔽作用加强,该侧线路的绕击率降低,而以往杆塔地面倾斜角又通常根据地形等类型进行划分等效,因此,对于所经山区环境较多的线路工程,直流正极处于上坡侧具有负倾角的塔位,其雷击闪络率的理论计算值将远高于实际情况。

本工程悬垂串均为V型串,导线的风偏摆动非常小,且部分输电走廊处于高海拔、重冰区等恶劣环境,这些区域塔型绝缘子串较长,塔头实际间隙尺寸要远大于规划操作间隙,工程采用实际间隙计算更贴近于真实情况。本文结合工程设计条件,对于多种海拔、气象区分别选用具有代表性的典型杆塔,并采用实际空气间隙尺寸进行计算,对于EGM法的地形因素采用沿线杆塔正、负极侧的地面倾角实测值代入,经加权统计得到的全线综合雷击闪络率相比以往特高压直流工程更为贴合实际运行经验,且留有适当裕度,验证了本文计算方法及结果的合理性。

3 结论

1) 全线加权综合雷击闪络率为0.1315次/(100 km·a),40 d雷暴日下为0.109次/(100 km·a),略大于 ± 800 kV输电线路雷击闪络率为0.10次/(100 km·a·40 d)的控制指标要求。

2) 本工程以绕击防护为主,沿线雷暴日与杆塔正极侧的地形条件(地面倾斜角)是本工程防雷的关键影响因素。将全线位于C级及以上多雷区,山区正极侧地面倾角 $\geq 25^\circ$ 的杆塔保护角进一步降低 5° ,全线综合雷击闪络率降低约9.92%,可满足防雷控制要求。

3) 采用电气几何模型法对全线进行绕击性能分析时,根据地形分类折算导线高度的计算方法相较考虑杆塔实际地面倾角的计算结果显著增大,需进一步结合全线杆塔在山区地形的架设情况对计算结果进一步修正。

4) 本文计算结论相比以往特高压直流工程更贴合运行经验,且留有适当裕度。对比分析邻近已投运 ± 800 kV复奉线、锦苏线、灵绍线等直流工程以往

雷击闪络率理论计算值与线路实际运行值之间的差异,论述了本文计算方法及结果的合理性。

参考文献:

- [1] 张翠霞,葛栋,殷禹. 直流输电系统的防雷保护 [J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2070-2074. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2008.10.023.
ZHANG C X, GE D, YIN Y. Lightning protection of HVDC transmission system [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2070-2074. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2008.10.023.
- [2] 雷梦飞,王少华,刘黎,等. 特高压直流输电线路雷击故障特性分析 [J]. 电瓷避雷器, 2019, 62(3): 57-62. DOI: 10.16188/j.isa.1003-8337.2019.03.009.
LEI M F, WANG S H, LIU L, et al. Analysis on lightning fault characteristics of UHVDC transmission line [J]. Insulators and Surge Arresters, 2019, 62(3): 57-62. DOI: 10.16188/j.isa.1003-8337.2019.03.009.
- [3] 唐春林. 特高压直流输电线路耐雷性能的影响因素研究 [D]. 成都: 西华大学, 2019.
TANG C L. Research on influencing factors of the lightning protection performance of UHVDC transmission lines [D]. Chengdu: Xihua University, 2019.
- [4] 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性能研究 [J]. 电网技术, 2007, 31(8): 1-5. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3673.2007.08.001.
LI L C, SIMA W X, YANG Q, et al. Research on lightning withstand performance of ± 800 kV ultra HVDC power transmission line from Yunnan to Guangdong [J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 1-5. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3673.2007.08.001.
- [5] 张刘春. ± 1100 kV特高压直流输电线路防雷保护 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(19): 4611-4617. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.171395.
ZHANG L C. Lightning protection of ± 1100 kV UHVDC transmission line [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(19): 4611-4617. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.171395.
- [6] 李倩,王学军,汪晶毅,等. ± 800 kV极导线与接地极线共塔线路耐雷性能及双极闭锁反事故措施分析 [J]. 南方能源建设, 2018, 5(4): 86-91. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.013.
LI Q, WANG X J, WANG J Y, et al. Analysis on the lightning performance and anti-accident measures of ± 800 kV bipolar blocking of polar wires and electrode wires on the same tower [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(4): 86-91. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.013.
- [7] 中华人民共和国原电力工业部. 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.
Ministry of Electric Power Industry of the People's Republic of China. Overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations: DL/T 620—1997 [S]. Beijing: China

- Electric Power Press, 1997.
- [8] 司马文霞, 杨庆, 李永福, 等. 输电线路雷电绕击评估方法分析及展望 [J]. *高电压技术*, 2015, 41(8): 2500-2513. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.08.004.
- SIMA W X, YANG Q, LI Y F, et al. Analysis and prospect of lightning shielding failure evaluation methods of transmission lines [J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(8): 2500-2513. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.08.004.
- [9] ERIKSSON A J. An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis [J]. *IEEE Power Engineering Review*, 1987, PER-7(7): 67-68. DOI: 10.1109/MPER.1987.5526997.
- [10] 冯裕山, 王纯. 特高压直流输电线路雷击故障辨识方法分析 [J]. *内蒙古电力技术*, 2021, 39(5): 64-68. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2021.0103.
- FENG Y S, WANG C. Analysis of lightning fault identification methods for UHVDC transmission lines [J]. *Inner Mongolia Electric Power*, 2021, 39(5): 64-68. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2021.0103.
- [11] 单蒙, 刘为雄. 基于EMTP的高压输电工程电磁暂态研究 [J]. *南方能源建设*, 2017, 4(1): 57-60. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.010.
- SHAN M, LIU W X. Research on electromagnetic transient of HV power transmission project based on EMTP [J]. *Southern Energy Construction*, 2017, 4(1): 57-60. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.010.
- [12] 程维杰, 张仕鹏, 刘一鸣. 基于ATP仿真模型自动运行的架空输电线路防雷性能评估方法 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(增刊1): 33-38. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.S1.005.
- CHENG W J, ZHANG S P, LIU Y M. Lightning performance assessment method for overhead transmission line based on ATP model automatic generation [J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(Supp. 1): 33-38. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.S1.005.
- [13] 谢文炳, 赵贤根, 肖佩, 等. 基于FDTD和EMTP的特高压大跨越线路雷击暂态过程对比分析 [J]. *高压电器*, 2019, 55(9): 187-193. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2019.09.025.
- XIE W B, ZHAO X G, XIAO P, et al. Comparative analysis on lightning surge response of UHVAC large-span river-crossing transmission line based on FDTD and EMTP [J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(9): 187-193. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2019.09.025.
- [14] HARA T, YAMAMOTO O. Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis [J]. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 1996, 143(3): 283-289. DOI: 10.1049/ip-gtd:19960289.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. ± 800 kV直流架空输电线路设计规范: GB/T 50790—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for design of ± 800 kV DC overhead transmission lines: GB/T 50790-2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [16] 李瑞芳, 吴广宁, 曹晓斌, 等. 输电线路档距两端导线不等距时雷电绕击率的计算 [J]. *高电压技术*, 2010, 36(7): 1681-1685.
- LI R F, WU G N, CAO X B, et al. Calculation on shielding failure rate transmission lines when the height of conductors on both ends of the span in unequal [J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(7): 1681-1685.
- [17] TANIGUCHI S, TSUBOI T, OKABE S, et al. Improved method of calculating lightning stroke rate to large-sized transmission lines based on electric geometry model [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, 17(4): 1276-1283. DOI: 10.1016/S0306-4522(02)00074-X.
- [18] 范冕, 万磊, 戴敏, 等. 1 000 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, 3(39): 584-591. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2013.03.011.
- FAN M, WAN L, DAI M, et al. Lightning performance simulation of quadruple-circuit transmission line with dual voltage 1 000 kV/500 kV on the same tower [J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 3(39): 584-591. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2013.03.011.
- [19] 陈国庆. 交流输电线路绕击仿真模型及同杆双回耐雷性能的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2003. DOI: 10.7666/d.y794950.
- CHEN G Q. Research on simulation model of AC transmission line winding and lightning resistance performance of the same rod double loop [D]. Chongqing: Chongqing University, 2003. DOI: 10.7666/d.y794950.
- [20] 国家电网公司. 架空输电线路防雷导则: Q/GDW 11452—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- State Grid Corporation of China. Lightning protection guidelines for overhead transmission lines: Q/GDW 11452-2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

作者简介:



颜子威

颜子威 (第一作者)

1995-, 男, 湖南岳阳人, 工程师, 北京交通大学电气工程硕士, 主要从事架空输电线路设计、防雷保护等方面工作 (e-mail) yanziwei@gedi.com.cn。



龚有军

龚有军 (通信作者)

1984-, 男, 湖南湘乡人, 高级工程师, 清华大学电气工程硕士, 主要从事输电线路设计、电磁暂态、防雷保护等方面工作 (e-mail) gongyoujun@gedi.com.cn。

何智文

1989-, 男, 广东广州人, 工程师, 华南理工大学电气工程硕士, 主要从事架空输电线路设计、送电线路三维数字化研究与设计等方面工作 (e-mail) hezhiwen@gedi.com.cn。

(编辑 孙舒)