

引用格式: 揭添羽, 龚有军, 颜子威. 500 kV 交流架空输电线路雷电性能及防护措施 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(增刊 1): 56-64. JIE Tianyu, GONG Youjun, YAN Ziwei. Lightning performance and protection measures of 500 kV AC overhead transmission lines [J]. Southern energy construction, 2024, 11(Suppl. 1): 56-64. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.S1.09.

500 kV 交流架空输电线路雷电性能及防护措施

揭添羽, 龚有军[✉], 颜子威

(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 500 kV 交流输电线路故障和停电事故的主要原因, 开展输电线路防雷评估对于系统的稳定运行有着极为重要的意义。[方法] 依托我国某在建 500 kV 交流输电线路工程, 根据线路基本参数等信息, 通过电磁暂态程序 (Electro-Magnetic Transient Program, EMTP) 和改进的电气几何模型法 (Electro-Geometric Model, EGM), 对线路的绕击、反击耐雷性能进行了仿真研究, 计算了线路的雷击跳闸 (闪络) 率, 按照线路雷击风险划分原则确定线路杆塔的雷击风险等级, 结合邻近已投运线路的实际运行数据, 针对雷击风险较高的杆塔提出了雷击防护措施, 并通过计算进一步验证了措施的有效性。[结果] 仿真结果表明, 安装线路避雷器是有效的雷击防护措施, 它们可大幅降低杆塔的雷击跳闸率, 提升线路耐雷性能。在采取雷击防护措施后, 全线无雷击风险等级为 IV 级的杆塔, 全线平均雷击跳闸率下降至 I 级的安全水平, 满足《架空输电线路防雷技术导则》(Q/CSG 1107002—2018) 要求。[结论] 文章所提的雷击风险评估方法和防雷措施选择流程是正确并有效的, 对 500 kV 交流架空输电线路防雷设计具有一定的工程应用价值与参考意义。

关键词: 500 kV 交流输电线路; 电磁暂态程序; 电气几何模型法; 耐雷性能; 雷击跳闸率; 雷击防护措施
中图分类号: TM7; TM863 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8676(2024)S1-0056-09
DOI: 10.16516/j.ceec.2024.S1.09 **OA:** <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Lightning Performance and Protection Measures of 500 kV AC Overhead Transmission Lines

JIE Tianyu, GONG Youjun[✉], YAN Ziwei

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

Abstract: [Introduction] A lightning strike is the main cause of failure and outage in 500 kV AC transmission lines, and it is very important to carry out lightning protection assessment for transmission lines for the stable operation of the system. [Method] In this paper, based on a 500 kV AC transmission line project under construction in China, the lightning resistance of the line was simulated and studied using the EMTP (Electro-Magnetic Transient Program) and the EGM (Electro-Geometric Model) and the lightning trip-out (flashover) rate of the line was calculated according to the basic parameters of the line. The lightning risk level of line towers was determined based on the principle of lightning risk classification. Combined with the actual operation data of the nearby lines, lightning protection measures were proposed for towers with higher lightning risk, and the effectiveness of the measures was further verified through calculation. [Result] The simulation results show that the arrester is an effective lightning protection measure, which can significantly reduce the lightning trip-out rate of the tower and improve the lightning resistance of the line. With lightning protection measures, there is no tower with lightning risk level IV on the whole line, and the average lightning trip-out rate of the whole line has dropped to the safe level I, which meets the requirements of *Guide for Lightning Protection of Overhead Transmission Lines* (Q/CSG 1107002—2018). [Conclusion] The lightning risk assessment method and the lightning protection measures proposed in this paper are correct and effective, and have somewhat engineering application and reference values for the lightning protection design of 500 kV AC

overhead transmission lines.

Key words: 500 kV AC transmission line; EMTP; EGM; lightning protection performance; lightning trip-out rate; lightning protection measure

2095-8676 © 2024 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

随着电网的快速发展, 500 kV 输电线路在远距离、大容量输电中起着非常重要的作用, 作为系统核心的网架结构, 其安全与稳定性尤为关键。运行经验表明, 在我国 35 kV ~ 500 kV 输电设备事故中, 雷击造成的输电设备跳闸事故次数在输电设备跳闸事故中排第 1 位, 造成的输电设备非计划停运事故排第 2 位。输电线路可靠的雷击防护一直是运行中的薄弱环节, 对线路进行准确合理的耐雷性能分析及雷击风险评估是开展线路防雷改造, 制定针对性防护措施, 降低线路雷击跳闸率, 保障线路安全可靠运行的重要手段^[1-3]。

目前在开展输电线路雷击风险评估时, 一般以雷击跳闸率为计算目标。基于近年来线路区域雷电定位系统监测数据及线路走廊区域的地形地貌情况, 结合线路特征结构参数、绝缘配置等信息采用合理的反击和绕击方法来计算各基杆塔及全线的雷击跳闸率, 根据雷击跳闸率大小, 按照线路雷击风险划分原则确定线路杆塔的雷击风险等级, 然后研究制定降低杆塔雷击跳闸率的有效措施, 包括安装线路避雷器、降低杆塔接地电阻等^[4-6]。输电线路雷击风险评估的关键是准确计算出线路的雷击跳闸率, 并合理确定雷击风险等级为防雷改造提供依据, 分析时, 线路杆塔结构参数、绝缘配置、沿线地形地貌参数、模型准确性及计算方法合理性等都对雷击跳闸率结果有一定的影响^[7]。国内外对于输电线路的反击耐雷性能分析方法主要涵盖规程法、行波法、蒙特卡洛法以及电磁暂态计算程序法^[8]。其中电磁暂态计算程序法是目前国际上通用的电力系统电磁暂态计算方法, 其计算精度已得到各国学者、工程界的认可, 目前广泛应用于输电线路耐雷性能分析计算中, 因此, 文章采用电磁暂态计算程序法计算线路的雷电反击性能。对于雷电绕击的分析方法, 目前主要包括规程法、经典与改进的电气几何模型法、先导发

展模型法^[9]。其中改进的电气几何模型法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^[10], 因此, 文章采用改进的电气几何模型法计算线路的雷电绕击性能。

500 kV 交流输电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, 文章依托我国某在建 500 kV 交流输电线路工程, 开展线路耐雷性能、雷击防护措施等方面的分析研究, 为今后 500 kV 交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 线路地闪密度

根据雷电定位系统 1999~2012 年共 13 a 数据, 线路所在地市的平均地闪密度为 8.43 次/(km²·a)。按照《架空输电线路防雷技术导则》(Q/CSG 1107002—2018)^[11]中规定的雷区等级划分原则, 该线路位于 D1 级强雷区 ($7.98 < N_g \leq 11.0$), 线路雷击风险较大。

1.2 导、地线参数

500 kV 交流线路采用 JL/LB1A-400/35 型铝包钢芯铝绞线; 地线采用 OPGW-120-72-2-4 型光缆, 导、地线计算参数如表 1 所示。

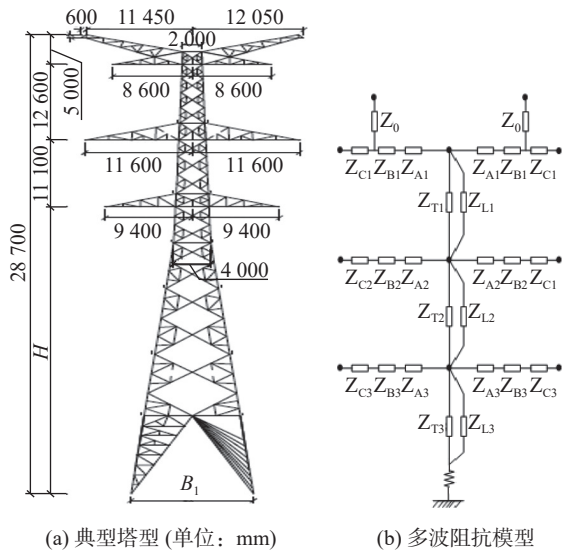
表 1 导、地线计算参数

Tab. 1 Conductor and ground wire calculation parameters

类型	型号	直流电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	外径/mm
500 kV 线路	JL/LB1A-400/35	0.071 7	26.8
地线	OPGW-120-72-2-4	0.362 0	15.2

1.3 杆塔尺寸

以应用于该线路的 5D2W2-Z1 典型杆塔为例, 其导地线布置情况、塔头尺寸等计算参数如图 1(a)



(a) 典型塔型 (单位: mm) (b) 多波阻抗模型

图 1 典型塔型及多波阻抗模型

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

所示。

杆塔采用多波阻抗模型,对横担及塔身的不同尺寸部位进一步细化为多段波阻抗^[12],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。

1.4 绝缘配合

线路绝缘配置方面,悬垂串选用复合及玻璃绝缘子,耐张串采用玻璃绝缘子,统一按照 d 级污区配置绝缘。全线绝缘配置如表 2 所示。

表 2 线路绝缘配置情况

Tab. 2 Line insulation configuration

串型	单联片数/片	绝缘高度/mm
双联160 kN耐张串	31	31*155=4 805
双联240 kN耐张串	36	36*170=6 120
双联180 kN复合绝缘子串	1	4 750
双联240 kN复合绝缘子串	1	4 750
双联300 kN复合绝缘子串	1	4 800
双联160 kN玻璃绝缘子串	30+1	31*155=4 805
双联210 kN玻璃绝缘子串	29+1	30*170=5 100
双联300 kN玻璃绝缘子串	25+1	26*195=5 070

1.5 沿线地形条件

工程沿线地形分布比例以及塔位左、右侧地面倾角占比分别如表 3、图 2 所示。

表 3 沿线地形分布占比

Tab. 3 Distribution ratio of terrain along the line

地形类别	平地	山地
比例/%	10	90

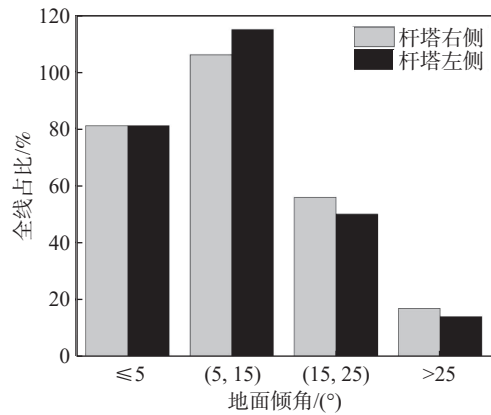


图 2 沿线杆塔地面倾角分布比例

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

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中取值。

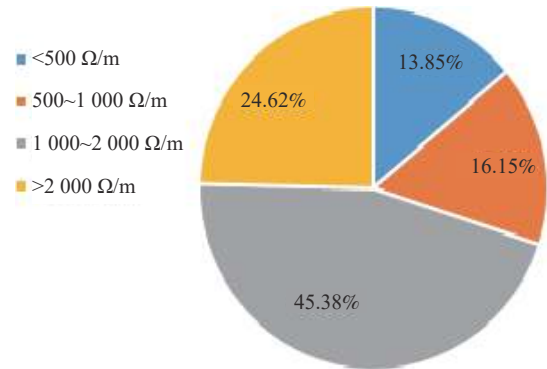


图 3 沿线土壤电阻率分布比例

Fig. 3 Distribution ratio of soil resistivity along the line

2 线路雷电性能研究

2.1 雷击风险等级划分原则

目前,开展输电线路雷击风险评估的方法有很多,实际上不论采用何种评估方法,最终主要的考察指标还是输电线路(杆塔)雷击跳闸率,并基于雷击跳闸率的大小合理划分确定线路雷击风险等级,本文按照《架空输电线路防雷技术导则》(Q/CSG 1107002—2018)中规定的方法进行雷击风险等级划分,其划分原则如表 4 所示。

因此,对于该工程,杆塔(线路)总雷击跳闸率

表 4 输电线路雷击风险等级划分标准

Tab. 4 Transmission line lightning risk classification standard

雷击风险等级	I	II	III	IV
雷击风险程度	较低	一般	较高	严重
杆塔雷击跳闸率	$R_i < 1.0 \times S$	$1.0 \times S \leq R_i < 1.5 \times S$	$1.5 \times S \leq R_i < 3.0 \times S$	$R \geq 3.0 \times S$
线路雷击跳闸率	$R < 1.0 \times S$	$1.0 \times S \leq R < 1.5 \times S$	$1.5 \times S \leq R < 3.0 \times S$	$R \geq 3.0 \times S$

注: R_i —线路第 i 基杆塔及其水平档距范围内的雷击跳闸率(折算至年 40 雷暴日和每百公里长度下的指标)[次·(100 km·a)⁻¹]; R —线路平均雷击跳闸率(折算至年 40 雷暴日和每百公里长度下的指标)[次·(100 km·a)⁻¹]; S —各电压等级架空输电线路雷击跳闸率折算至年 40 雷暴日(即地闪密度 2.78 次·(km²·a)⁻¹)下的基准参考值, 如表 5 所示。

表 5 各电压等级输电线路雷击跳闸率基准参考值

Tab. 5 Benchmark reference value of lightning trip-out rate for transmission lines of various voltage levels

电压等级/kV	110	220	500	±500	±800
基准参考值 S [次·(100 km·a) ⁻¹]	0.525	0.315	0.140	0.150	0.100

$R < 0.14$ 时, 杆塔(线路)雷击跳闸风险较低; $0.14 \leq R < 0.21$ 时, 杆塔(线路)雷击跳闸风险一般; $0.21 \leq R < 0.42$ 时, 杆塔(线路)雷击跳闸风险较高; $R \geq 0.42$ 时, 杆塔(线路)雷击跳闸风险严重。

大量运行经验表明, 对于 500 kV 电压等级的线路, 由于采取平衡高绝缘的配置方式, 杆塔反击耐雷水平较高, 线路雷击跳闸绝大多数由绕击导致, 绕击跳闸风险较高。因此, 本文在划分杆塔的绕击、反击风险时按照 85 : 15 的比例分配, 即对于绕击来说, $R < 0.119$ 时, 杆塔(线路)绕击跳闸风险较低; $0.119 \leq R < 0.1785$ 时, 杆塔(线路)绕击跳闸风险一般; $0.1785 \leq R < 0.357$ 时, 杆塔(线路)绕击跳闸风险较高; $R \geq 0.357$ 时, 杆塔(线路)绕击跳闸风险严重。而对于反击来说, $R < 0.021$ 时, 杆塔(线路)反击跳闸风险较低; $0.021 \leq R < 0.0315$ 时, 杆塔(线路)反击跳闸风险一般; $0.0315 \leq R < 0.063$ 时, 杆塔(线路)反击跳闸风险较高; $R \geq 0.063$ 时, 杆塔(线路)反击跳闸风险严重。

考虑到雷击具有一定的随机分散性, 在进行雷击风险评估时计算出来的理论雷击跳闸率可能与实际的落雷存在一定差异, 因此在采取防护措施时, 优先对雷击跳闸率达到 IV 级的杆塔进行防护, 再根据反击及绕击情况针对性地采取措施。

2.2 雷电反击性能计算

采用 ATP-EMTP (Alternative Transients Program-Electro Magnetic Transient Program) 电磁暂态仿真程序法建立线路 260 基杆塔反击计算仿真模型, 计算

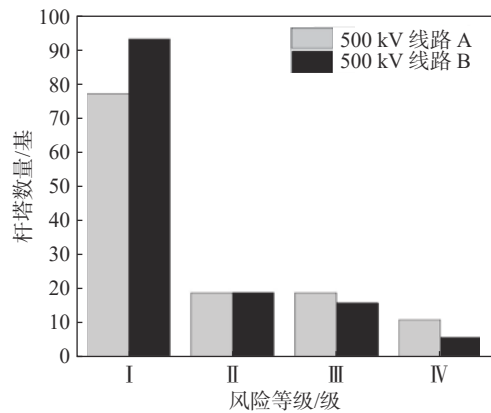


图 4 杆塔反击风险评估结果

Fig. 4 Assessment results of lightning back-strike risk

了线路逐基杆塔反击跳闸率, 结合线路雷击风险等级划分原则, 各风险等级的杆塔数量如图 4 所示。此时 500 kV 线路 A、500 kV 线路 B 全线平均反击跳闸率分别为 0.025 次/(100 km·a·回)、0.020 次/(100 km·a·回), 全线平均反击跳闸率在 II 级及以下。

2.3 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跳闸率^[13-14], 结合雷击风险等级划分原则, 各风险等级的杆塔数量如图 5 所示。

计算得到 500 kV 线路 A、500 kV 线路 B 全线平均绕击跳闸率如表 6 所示, 全线平均绕击跳闸率在 II 级及以下。

2.4 综合雷击闪络率计算

根据杆塔绕击跳闸率与反击跳闸率可得杆塔综合雷击跳闸率, 结合线路雷击风险等级划分原则, 各线路风险等级的杆塔数量如图 6 所示。

各线路雷击风险等级达到 IV 级的杆塔雷击跳闸率详细计算结果如表 7 所示。可见, 线路共有 24 基杆塔的雷击跳闸率风险等级为 IV 级, 因此需要采取一定的雷击防护措施。

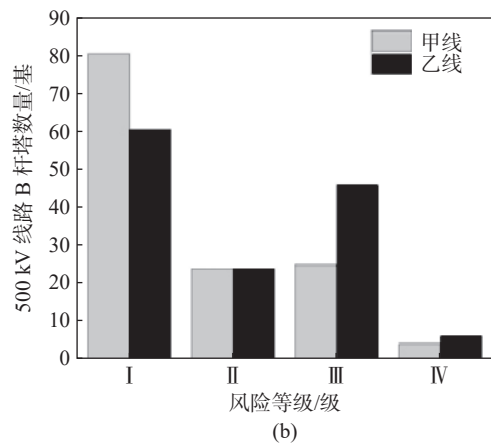
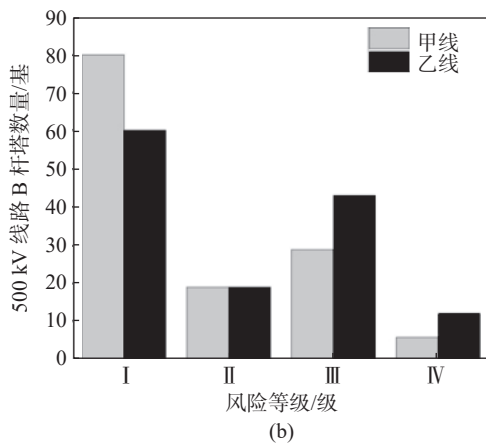
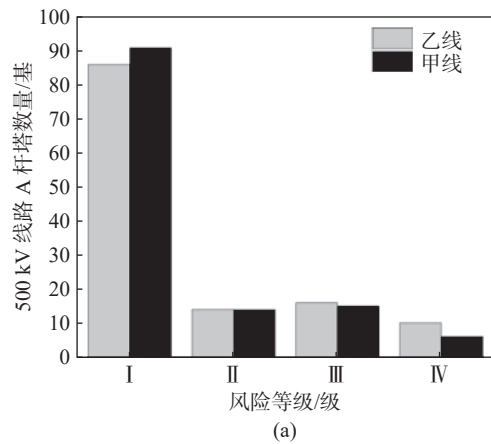
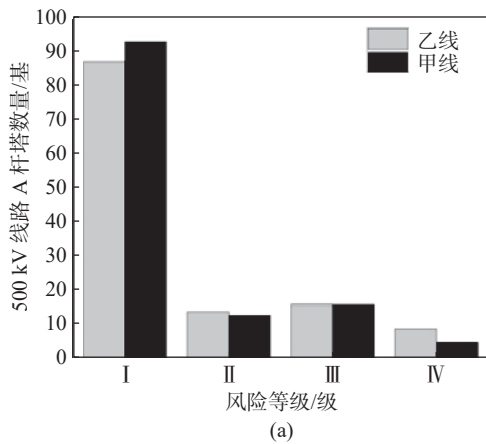


图 5 杆塔绕击风险评估结果

Fig. 5 Assessment results of tower shielding failure risk

图 6 杆塔雷击风险评估结果

Fig. 6 Assessment results of tower lightning risk

表 6 全线平均绕击跳闸率计算结果

Tab. 6 Calculation results of the average shielding failure trip-out rate for the whole line

线路	绕击跳闸率/[次·(100 km·40雷电日) ⁻¹]	
	左回	右回
500 kV线路A	0.103	0.087
500 kV线路B	0.111	0.164

2.5 邻近已投运线路雷击跳闸数据分析

根据 2018~2020 年运维数据,在 2 年 4 个月的时间里,邻近已投运 500 kV 线路共计发生了 3 次雷击跳闸数据,邻近已投运 220 kV 线路共计发生了 9 次雷击闪络数据,如表 8 所示。

结合邻近已投运 500 kV 线路及 220 kV 线路的运行经验,应从如下角度降低线路的雷击跳闸风险:

- 1) 重点防范下坡侧中横担及下横担的雷电绕击。
- 2) 220 kV 线路 E #16 塔曾经发生过雷击闪络,其附近的 500 kV 线路 B ZW101 塔、500 kV 线路 A

GZE93、GZE94 塔,应予以重点关注。

3 线路防护性能研究

3.1 降低接地电阻

由于反击影响整个杆塔,若安装线路避雷器则需要六相导线安装线路避雷器,成本较高。因此,对于反击占比大于 10% 的杆塔,采取降低接地电阻+安装线路避雷器的措施;其余杆塔根据具体绕击相安装线路避雷器。根据上述原则,挑选得到需降低杆塔工频接地电阻的塔位及其降阻效果如表 9 所示。

根据表 9 可知,加大接地装置规格后,杆塔反击跳闸率变化不大,对杆塔总体的跳闸率影响较小,因此本文不再采取降低接地电阻的措施。

3.2 双回线路屏蔽效应

两条同塔双回路平行走线,当平行间距较近时,一条线路的地线对另一条线路的导线也能起到屏蔽作用^[15],如图 7 所示(其中,20 kA 为导致绕击的最小

表 7 雷击风险在 IV 级的杆塔雷击跳闸率计算结果

Tab. 7 Calculation results of lightning trip-out rate for towers with lightning risk at level IV

塔号	左侧总	右侧总	乙线风险等级	甲线风险等级
500 kV线路A				
ZE7	0.007 2	0.466 3	I	IV
ZE40	0.547 9	0.137 5	IV	I
ZE47	0.572 5	0.048 3	IV	I
ZE56	0.098 2	0.447 0	I	IV
GZE70	0.665 3	0.036 2	IV	I
ZE77	0.506 0	0.082 8	IV	I
GZE83	0.551 4	0.229 6	IV	III
GZE91	0.124 1	0.453 2	I	IV
ZE95	0.011 5	0.422 1	I	IV
ZE97	0.473 7	0.239 7	IV	III
ZE100	0.536 6	0.470 9	IV	IV
ZE107	0.617 8	0.536 1	IV	IV
ZE111	0.464 3	0.019 8	IV	I
ZE112	0.474 1	0.380 6	IV	III
塔号	左侧总	右侧总	甲线风险等级	乙线风险等级
500 kV线路B				
GZW31	0.174	0.469	II	IV
ZW36	0.558	0.133	IV	I
ZW47	0.524	0.374	IV	III
ZW57	0.276	0.500	III	IV
ZW60	0.019	0.519	I	IV
ZW61	0.392	0.523	III	IV
ZW66+1	0.040	0.488	I	IV
GZW74	0.487	0.250	IV	III
GZW76	0.122	0.798	I	IV
ZW110	0.434	0.099	IV	I

雷电流)。

根据图 7 可知:

1) 雷电流越大, 地线的对内侧导线的联合屏蔽效果越好。

2) 不考虑高差的情况下, 两条线路平行间距小于 164 m 时, 两条线路的地线可为内侧导线提供良好屏蔽作用。

3) 位于上坡侧的线路的地线可对下坡侧的线路的导线形成较好的屏蔽效果。

4) 位于下坡侧的线路的地线可对上坡侧的线路的导线形成屏蔽效果。线路越靠近, 屏蔽效果越好;

表 8 2018~2020 年线路雷击跳闸数据

Tab. 8 Lightning trip data of lines in 2018~2020

线路	雷击位置	雷击类别	地理特征	与本线路位置关系
500 kV线路 C	#166塔B相 (双回路中相)	绕击	平地	—
500 kV线路 D	#190塔C相 (双回路下相)	绕击	山地下坡侧	≈25 km
500 kV线路 D	#182塔C相 (双回路下相)	绕击	山地下坡侧	≈25 km
500 kV线路 E	#16塔A相 单回路边相	绕击	山顶下坡侧	≈43 m
500 kV线路 F	#88塔C相 单回路边相	绕击	丘陵下坡侧	≈32 km
500 kV线路 G	#34塔#A相 单回路边相	绕击	山地下坡侧	≈60 km
500 kV线路 H	#12塔C相 单回路边相	绕击	山顶下坡侧	≈8 km
500 kV线路 I	#79塔C相 单回路边相	绕击	山坡下坡侧	≈7 km
500 kV线路 J	#15塔C相 单回路边相	绕击	山地下坡侧	≈56 km
500 kV线路 K	#183塔A、B、C相 双回路	反击	山地	—
500 kV线路 L	#19塔C相 单回路边相	绕击	山坡下坡侧	≈5 km
500 kV线路 G	#98塔B相 单回路边相	绕击	山地下坡侧	≈90 km

高差越小, 屏蔽效果越好。

500 kV 线路 A、500 kV 线路 B 雷击风险在 IV 级的杆塔联合屏蔽效果如表 10 所示。

3.3 安装线路避雷器

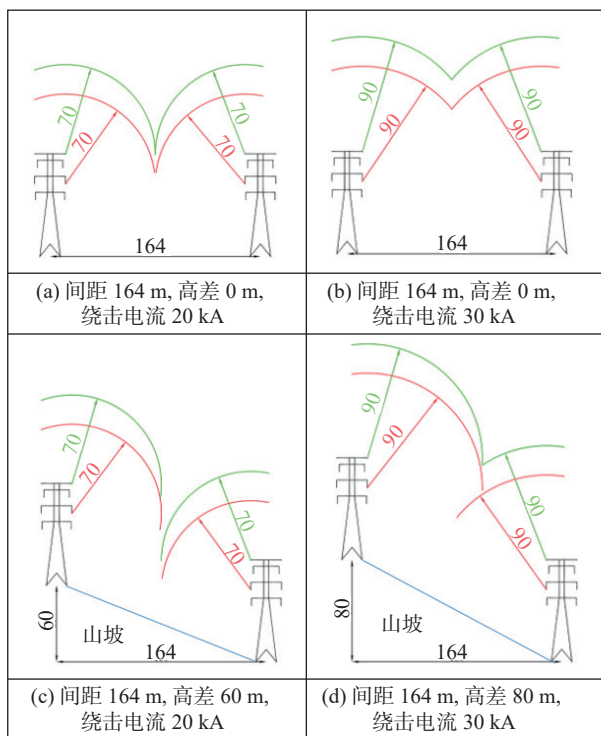
考虑两个线路地线的联合屏蔽作用, 按照绕击严重程度挑选杆塔和相别安装线路避雷器。此外, 考虑到 220 kV 线路 E #16 塔 A 相曾经发生过雷击跳闸事故, ZW101 塔距离其仅 43 m, 结合地形及雷击跳闸率计算结果择相安装线路避雷器; GZE93 塔虽然距离较远(约 1 km), 但是整体与 220 kV 线路 E #16 塔、ZW101 处于同一个山顶, 因此也结合地形及雷击跳闸率计算结果择相安装线路避雷器。线路避雷器安装情况如表 11 所示。500 kV 线路 A 共计 13 基杆塔需安装 17 支线路避雷器; 500 kV 线路 B 共计 8 基杆塔需安装 8 支线路避雷器。

500 kV 线路 A、500 kV 线路 B 雷击风险在 IV 级的杆塔采取防护措施后的风险等级如表 12 所示。

表 9 杆塔工频接地电阻设计变更情况

Tab. 9 Design changes of tower power frequency ground resistance

塔号	降阻前		降阻后	
	接地电阻/ Ω	反击跳闸率/[次·(100 km·40 雷电日) ⁻¹]	接地电阻/ Ω	反击跳闸率/[次·(100 km·40 雷电日) ⁻¹]
ZE40	17.61	0.118 0	6.89	0.109 3
ZE77	11.27	0.080 6	3.73	0.070 8
GZE83	19.05	0.072 6	10.27	0.030 6
GZE91	11.35	0.089 1	4.90	0.051 1
ZE97	12.22	0.154 0	5.27	0.112 7
ZE100	13.77	0.133 2	5.39	0.102 0
ZE107	15.40	0.052 4	15.40	0.023 3
GZW31	9.35	0.093 6	4.04	0.068 7
ZW57	17.62	0.131 0	已最高规格	
GZW74	16.33	0.053 7	16.33	0.051 0



注：图中尺寸单位为 m。

图 7 两条线路平行走线联合屏蔽示意图

Fig. 7 Schematic diagram of combined shielding of two lines in parallel alignment

可见,采取措施后,全线无 IV 级以上风险杆塔。

采取雷击防护措施前后的跳闸率对比如表 13 所示。500 kV 线路 A 乙线、甲线和 500 kV 线路 B 甲线、乙线的平均雷击跳闸率分别下降 31%、21%、

表 10 雷击风险在 IV 级的杆塔联合屏蔽效果

Tab. 10 Combined shielding effect of towers with lightning risk at level IV

塔号	平行间距/m	高差/m	联合屏蔽效果
500 kV 线路 A			
ZE7	86	10	较好
ZE40	184	30	较好
ZE47	146	20	较好
ZE56	130	10	较好
GZE70	140	10	较好
ZE77	350	20	无
GZE83	146	10	较好
GZE91	434	100	无
ZE95	705	150	无
ZE97	470	70	无
ZE100	720	100	无
ZE107	330	120	无
ZE111	178	40	无
ZE112	210	50	无
500 kV 线路 B			
GZW31	78	15	较好
ZW36	80	15	较好
ZW47	152	50	较好
ZW57	148	40	较好
ZW60	150	50	较好
ZW61	130	10	较好
ZW66+1	115	30	较好
GZW74	140	10	较好
GZW76	160	30	较好
ZW110	420	90	无

22%、23%,且全线平均雷击跳闸率下降至 I 级。

4 结论

1) 500 kV 线路 A、500 kV 线路 B 雷击风险在 IV 级的杆塔共计 24 基,占比 9.23%,全线平均雷击跳闸率在 II 级及以下。

2) 对于上述杆塔,加大接地装置规格后,反击跳闸率变化不大,对杆塔总体的跳闸率影响较小。因此本文不采取降低接地电阻的措施。

3) 本文重点在于防护绕击,考虑技术经济性,结合雷击的随机分散性,优先对雷击风险达到 IV 级且绕击风险较高的杆塔安装线路避雷器。

表 11 线路避雷器安装情况
Tab. 11 Installation of line arresters

塔号	左侧(乙线, 东侧)			右侧(甲线, 西侧)		
	上相	中相	下相	上相	中相	下相
500 kV线路A						
ZE40			避雷器			
ZE47			避雷器			
GZE70			避雷器			
ZE77			避雷器			
GZE83			避雷器			
GZE91						避雷器
GZE93	避雷器	避雷器				
ZE95						避雷器
ZE97			避雷器			
ZE100			避雷器			避雷器
ZE107			避雷器			避雷器
ZE111			避雷器			
ZE112			避雷器			避雷器
塔号	左侧(甲线, 东侧)			右侧(乙线, 西侧)		
	上相	中相	下相	上相	中相	下相
500 kV线路B						
GZW31						避雷器
ZW47						避雷器
ZW57						避雷器
ZW60						避雷器
ZW66+1						避雷器
GZW76						避雷器
ZW101		避雷器				
ZW110		避雷器				

4) 综合考虑平行走线线路地线的对导线的联合屏蔽效果, 以及附近已有线路的运行经验, 选取 500 kV 线路 A 13 基杆塔安装 17 支线路避雷器, 选取 500 kV 线路 B 共计 8 基杆塔安装 8 支线路避雷器, 合计 25 支线路避雷器。

5) 采取雷击防护措施后, 500 kV 线路 A 乙线、甲线和 500 kV 线路 B 甲线、乙线的平均雷击跳闸率分别下降 31%、21%、22%、23%, 且全线平均雷击跳闸率下降至 I 级, 满足《架空输电线路防雷技术导则》(Q/CSG 1107002—2018) 要求。

参考文献:

[1] 陈维江, 陈家宏, 谷山强, 等. 中国电网雷电监测与防护亟待研究的关键技术 [J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2009-2015.

表 12 采取防护措施后的杆塔雷击风险等级

Tab. 12 Risk level of lightning on towers with protection measures

塔号	防护前雷击风险等级		防护后雷击风险等级	
	左侧 (乙线, 东侧)	右侧 (甲线, 西侧)	左侧 (乙线, 东侧)	右侧 (甲线, 西侧)
500 kV线路A				
ZE40	V	I	II	I
ZE47	V	I	I	I
GZE70	V	I	I	I
ZE77	V	I	II	I
GZE83	V	III	II	III
GZE91	I	V	I	III
GZE93	III	III	III	I
ZE95	I	V	I	I
ZE97	V	III	III	III
ZE100	V	V	II	III
ZE107	V	V	I	III
ZE111	V	I	I	I
ZE112	V	III	I	II
塔号	防护前雷击风险等级		防护后雷击风险等级	
	左侧 (甲线, 东侧)	右侧 (乙线, 西侧)	左侧 (甲线, 东侧)	右侧 (乙线, 西侧)
500 kV线路B				
GZW31	II	V	II	I
ZW47	V	III	I	III
ZW57	III	V	III	I
ZW60	I	V	I	I
ZW66+1	I	V	I	I
GZW76	I	V	I	I
ZW101	II	I	I	I
ZW110	V	I	I	I

表 13 平均雷击跳闸率对比

Tab. 13 Comparison of average lightning trip-out rate

线路	采取措施前跳闸率/ [次·(100 km·40雷电日) ⁻¹]		采取措施后跳闸率/ [次·(100 km·40雷电日) ⁻¹]	
	甲线	乙线	甲线	乙线
500 kV线路A	0.118	0.134	0.093	0.092
	0.127	0.178	0.099	0.137

CHEN W J, CHEN J H, GU S Q, et al. Key technologies of lightning detection and protection in China power grid [J]. High voltage engineering, 2008, 34(10): 2009-2015.

[2] 赵淳, 阮江军, 李晓岚, 等. 输电线路综合防雷措施技术经济性

- 评估 [J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 290-297. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2011.02.011.
- ZHAO C, RUAN J J, LI X L, et al. Technology and economy evaluation of comprehensive transmission line lightning protection measures [J]. *High voltage engineering*, 2011, 37(2): 290-297. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2011.02.011.
- [3] 赵淳, 陈家宏, 王剑, 等. 电网雷害风险评估技术研究 [J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3012-3021. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2011.12.026.
- ZHAO C, CHEN J H, WANG J, et al. Research on technology of lightning disaster risk assessment for power system [J]. *High voltage engineering*, 2011, 37(12): 3012-3021. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2011.12.026.
- [4] 赵文彬, 顾承昱, 岳灵平, 等. 500 kV 输电线路侧针防护效果的理论与试验研究 [J]. 华东电力, 2013, 41(6): 1220-1224.
- ZHAO W B, GU C Y, YUE L P, et al. Theoretical and experimental research of lateral rod in lightning protection for 500 kV transmission lines [J]. *East China electric power*, 2013, 41(6): 1220-1224.
- [5] 王城钢, 张仲先, 潘秀宝, 等. 架空输电线路绕击防护的新措施 [J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 620-621, 624. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2008.03.018.
- WANG C G, ZHANG Z X, PAN X B, et al. The new lightning shielding protection measure of overhead transmission lines [J]. *High voltage engineering*, 2008, 34(3): 620-621, 624. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2008.03.018.
- [6] 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. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2011.12.041.
- LI Z, YU Z Q, HE J L, et al. Line surge arrester improving lightning protection performance of transmission lines with multi-circuits in a tower [J]. *High voltage engineering*, 2011, 37(12): 3120-3128. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2011.12.041.
- [7] 颜子威, 龚有军, 何智文. ± 800 kV 特高压直流输电线路雷电性能及防护措施研究 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(2): 110-118. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.015.
- YAN Z W, GONG Y J, HE Z W. Research on lightning performance and protective measures of ± 800 kV UHVDC power transmission line [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(2): 110-118. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.015.
- [8] 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(Suppl.1): 33-38. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.S1.005.
- [9] 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.
- [10] ERIKSSON A J. An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis [J]. *IEEE transactions on power delivery*, 1987, 2(3): 871-886. DOI: 10.1109/TPWRD.1987.4308192.
- [11] 中国南方电网有限责任公司. 架空输电线路防雷技术导则: Q/CSG 1107002—2018 [S]. 广州: 中国南方电网有限责任公司, 2018.
- China Southern Power Grid Company Limited. Lightning protection technical guidelines for overhead transmission lines: Q/CSG 1107002-2018 [S]. Guangzhou: China Southern Power Grid Company Limited, 2018.
- [12] 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.
- [13] 李瑞芳, 吴广宁, 曹晓斌, 等. 输电线路档距两端导线不等高时雷电绕击率的计算 [J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1681-1685. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2010.07.030.
- LI R F, WU G N, CAO X B, et al. Calculation on shielding failure rate of transmission lines when the height of conductors on both ends of the span is unequal [J]. *High voltage engineering*, 2010, 36(7): 1681-1685. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2010.07.030.
- [14] 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(1): 53-62. DOI: 10.1109/TDEL.2010.5412002.
- [15] 王韬, 赵乐冰, 吴敏, 等. 500 kV 交流输电通道邻近线路雷电屏蔽特性仿真计算 [J]. 电瓷避雷器, 2020(5): 7-14. DOI: 10.16188/j.isa.1003-8337.2020.05.002.
- WANG T, ZHAO L B, WU M, et al. Simulation study on lightning shielding characteristics of adjacent lines in 500 kV AC transmission channel [J]. *Insulators and surge arresters*, 2020(5): 7-14. DOI: 10.16188/j.isa.1003-8337.2020.05.002.

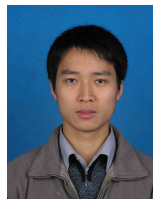
作者简介:



揭添羽

揭添羽 (第一作者)

1998-, 男, 工程师, 中山大学机械硕士, 主要从事架空输电线路设计、防雷保护等方面工作 (e-mail) jietianyu@gedi.com.cn。



龚有军

龚有军 (通信作者)

1984-, 男, 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。

颜子威

1995-, 男, 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。

(编辑 赵琪)