

35 kV 线路避雷器与避雷线防雷效果量化比较分析

王振羽¹, 宋明钰¹, 薄岩¹, 杨廷方², 苏盛²

(1. 国网新源控股有限公司丰满大坝重建工程建设局, 吉林 吉林 132108; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:通过建立 35 kV 线路的仿真模型, 研究线路在有避雷线无避雷器、无避雷线有避雷器以及有避雷线和避雷器这 3 种情况下, 线路耐雷水平的差异以及杆塔分流系数的变化情况。仿真结果表明: 在同样的接地电阻下, 杆塔在有避雷线无避雷器时的分流系数要比有避雷线和避雷器时的分流系数至少大 20%。另当接地电阻小于 20 Ω 时, 线路在无避雷线有避雷器的情况下, 其耐雷水平是有避雷线无避雷器情况下的 1.8~2.0 倍; 而线路在有避雷线和避雷器的情况下的耐雷水平是有避雷线无避雷器情况下的 1.9~2.3 倍。当接地电阻分别为 20、15、10、5 Ω 时, 线路在有避雷线无避雷器的情况下的耐雷水平的提高效果不到其他 2 种情况的 60%。研究结果对于 35 kV 线路的防雷保护具有一定的指导作用和参考价值。

关键词:线路; 防雷; 避雷器; 避雷线; 比较

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.04.021

中图分类号: TM863

文章编号: 1673-9140(2021)04-0165-07

Quantitative comparison of lightning protection effect between 35 kV line arrester and lightning line

WANG Zhenyu¹, SONG Mingyu¹, BO Yan¹, YANG Tingfang², SU Sheng²

(1. State Grid Xinyuan Fengman Dam Reconstruction and Project Construction Bureau, Jilin 132108, China; 2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: By establishing the simulation model of 35 kV lines, the difference of lightning withstand level and the variation of shunt coefficient of towers are studied under three lightning protection cases of applying a shielding wire without lightning arresters, applying lightning arresters without shielding wires, and applying lightning arresters and a shielding wire. The simulation results show that the shunt coefficient of the tower with a shielding wire without lightning arresters is at least 20% larger than that with both lightning arresters and a shielding wire under the same grounding resistance. In addition, when the grounding resistance is less than 20 Ω , the lightning withstand level of the line having a shielding wire without lightning arresters is 1.8 to 2.0 times higher than that of the line having lightning arresters without shielding wires. The lightning withstand level of the line having lightning arresters and a shielding wire is 1.9 to 2.3 times higher than that of the line having a shielding wire without lightning arresters. When the grounding resistance is 20, 15, 10 and 5 Ω respectively, the improvement effect of lightning withstand level of the line in the condition of having shielding wire without lightning arrester is less than 60% of the other two conditions. The research results have certain guidance and reference value for the lightning protection of 35 kV transmission line.

Key words: line; lightning protection; lightning arrester; lightning line; comparison

收稿日期: 2020-03-09; 修回日期: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(51777015)

通信作者: 杨廷方(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事防雷保护及电力设备状态评价研究; E-mail: 2630544839@qq.com

在供配电系统中,35 kV 线路结构复杂、分布区域广泛,且与各种电力线路、通讯信道交叉,极易遭受雷击闪络^[1-3]。实际中对供电线路常通过架设避雷线或装设线路避雷器等方式来提高线路的耐雷水平^[4-6]。国内外学者对此做了大量研究。文献[7]通过用 ATP-EMTP 软件分析了 35 kV 线路雷击特性,提出了 35 kV 线路避雷器多基杆塔、多相导线同时安装的原则;文献[8]研究了加装避雷器对输电线路绕击和反击耐雷水平的影响;文献[9]通过仿真分析了线路安装单相、两相和三相不同避雷器组合的防雷效果;文献[10]重点研究了在不同接地电阻以及线路走廊情况下,不同的避雷器配置对防雷效果的影响;文献[11]通过分析,提出了以改造接地电阻为主,加装避雷线、避雷器为辅的防雷对策,以达到提升输电线路防雷水平目的。以上各种研究都提到了采用避雷器和避雷线对线路进行防雷,但究竟采用哪种方式对线路的防雷更有效,或者此二者在防雷效果上是否同等有效,目前国内外对此问题分析的文献不多。该文将对某山区 35 kV 线路上字型 12 m 直线塔杆塔进行研究。利用 ATP-EMTP 仿真平台建立仿真模型;研究线路在有避雷线无避雷器、有避雷器无避雷线、有避雷线和避雷器这 3 种防雷方案下,线路耐雷水平的差异以及杆塔分流系数的变化情况;通过数值计算,量化分析比较 3 种方案的防雷效果。

1 仿真模型的建立

1.1 线路模型

在 ATP-EMTP 中,按照实际某山区 35 kV 线路参数建立 101 基杆塔,并采用 JMarti LCC 线路模型。线路档距均为 200 m,弧垂平均为 3.05 m,线路全长 20 km;导线为 LGJ-150 钢芯铝绞线,线路末端用 12 km 长线模拟,用以消除线路末端雷电流的折反射影响;采用 GJ-35 型避雷线。

1.2 杆塔模型

该次仿真模型主要选用的是 35 kV 配电线路上字型 12 m 直线塔杆塔,如图 1 所示。该塔的电感值取为 $0.50 \mu\text{H}/\text{m}$ ^[12-15]。

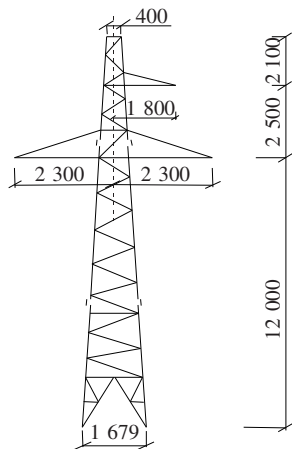


图 1 杆塔模型(单位:mm)

Figure 1 Tower model(Unit:mm)

1.3 绝缘子串闪络模型

绝缘子串闪络采用判据法,认为绝缘两端电压超过 1.5 倍临界冲击闪络电压(CFO)时绝缘子闪络。该线路选用的绝缘子为复合绝缘子 FXBW4-35 型,线路绝缘水平(1.5CFO)为 350 kV。

1.4 雷电流模型

雷电流 i 波形采用与实际雷电流波形极为接近的双指数波^[13-17]Heidler type 15,波形如图 2 所示,其表达式为

$$i = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

式中 I_0 为雷电流幅值,kA; α 、 β 分别为与雷电流波前、波尾时间相关的常数,该文分别取其值为 2.6、50 μs 。其中雷电通道波阻抗取 300 Ω 。

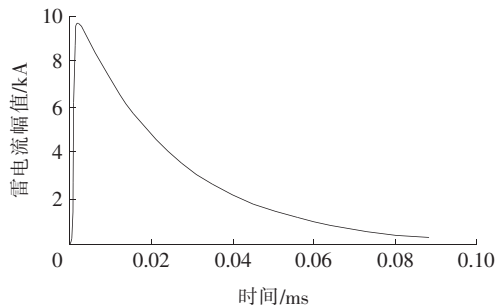


图 2 雷电流波形

Figure 2 Lightning current waveform

2 仿真分析

2.1 雷击杆塔

雷击杆塔时雷电流会沿杆塔向下传播,使得塔

顶电位升高。当塔顶电位与导线电位两者差值过大时,就会引起绝缘子串的沿面闪络,发生反击。根据 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》的附录 C 公式 C17,当雷击塔顶时,线路的耐雷水平为

$$I_1 = \frac{U_{50\%}}{(1-k)\beta_t R_{ch} + \left(\frac{h_0}{h_t} - k\right)\beta_t \frac{L_t}{2.6} + \left(1 - \frac{h_g}{h_c} k_0\right) \frac{h_c}{2.6}} \quad (2)$$

式中 I_1 为线路耐雷水平; k 为避雷线与导线的耦合系数; β_t 为杆塔的分流系数; R_{ch} 为杆塔的冲击接地电阻; k_0 为避雷线对外侧导线系数; L_t 为塔头电感; h_0 为横担对地高度; h_t 为杆塔高度; h_g 为避雷线平均高度; h_c 为导线平均高度。

由式(2)可知,若其他参数一定,当杆塔的分流系数 β_t 变小时, I_1 将升高。另外,若其他参数一定而 R_{ch} 变小时, I_1 也将升高。

2.1.1 有避雷线无避雷器

当线路全线架设避雷线时,若雷击杆塔,则部分雷电流会沿避雷线向远处传播。为研究杆塔的分流情况,计算线路安装避雷线后杆塔的分流系数,在线路仿真模型中,该次仿真选择易遭受雷击的 9# 杆塔作为雷击点,即雷电流的注入点,注入雷电流的幅值为 10 kA。由于该 35 kV 线路较长,杆塔较多,该次仿真重点选择雷击点及其双侧杆塔部分,即 8 号至 10 号杆塔(易击段)部分,其线路仿真模型如图 3 所示。

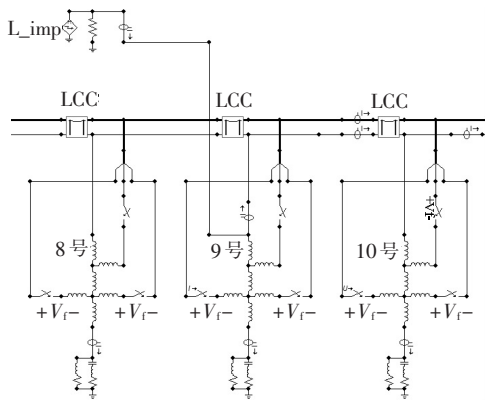


图 3 线路杆塔仿真模型

Figure 3 Simulation model of transmission tower

经 ATP-EMTP 仿真计算,当雷电流 L_{imp} 发生雷击 9 号杆塔塔顶时,雷电不仅会沿避雷线向两侧传播,还会顺着塔顶的接地引线入地。仿真得到的各部分雷电流波形如图 4 所示,此时杆塔的接地电阻为 10Ω 。根据仿真结果以及图 4,经计算可得,当雷击杆塔时,避雷线分得的电流占雷电流幅值的 3.40%,而经杆塔入地电流占雷电流的 96.60%,即杆塔分流系数 β_t 为 0.97。

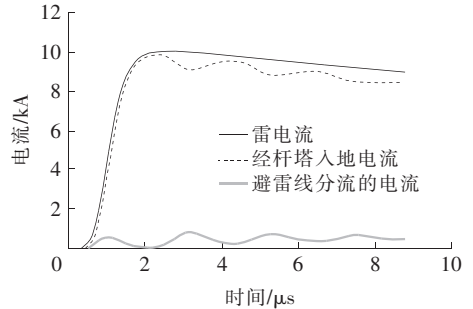


图 4 有避雷线无避雷器时各部分雷电流波形

Figure 4 Every parts of lightning current waveform for applying a shielding without lightning arresters

为论证杆塔分流系数是否会随着雷电流幅值大小及杆塔接地电阻变化而改变,在仿真模型中,将雷电流幅值(I_A)依次设置为 1、2、4、6、8、10 kA,并将接地电阻(R_g)分别设置为 5、10、15、20、25、30、35 Ω 。经 ATP-EMTP 仿真计算,对应的杆塔分流系数 β_t 如表 1 所示,可知雷电流幅值升高,杆塔分流系数并没有发生变化,但杆塔接地电阻增大会使得杆塔分流系数变小。这表明,雷电流幅值大小并不是杆塔分流系数的影响因子,而杆塔接地电阻阻值大小与杆塔分流系数呈负相关性。

表 1 有避雷线无避雷器时的杆塔分流系数计算结果

Table 1 Current shunt coefficient calculation of tower applying a shielding wire without lightning arresters

$I_A /$ kA	设置不同 $R_g(\Omega)$ 时的 β_t						
	5	10	15	20	25	30	35
1	0.98	0.97	0.95	0.93	0.92	0.90	0.89
2	0.98	0.97	0.95	0.93	0.92	0.90	0.89
4	0.98	0.97	0.95	0.93	0.92	0.90	0.89
6	0.98	0.97	0.95	0.93	0.92	0.90	0.89
8	0.98	0.97	0.95	0.93	0.92	0.90	0.89
10	0.98	0.97	0.95	0.93	0.92	0.90	0.89

杆塔分流系数随雷电流幅值及接地电阻的变化趋势如图5所示。另外,通过 ATP-EMTP 仿真计算,得到随着杆塔接地电阻的变化线路耐雷水平变化的情况,如表2所示。

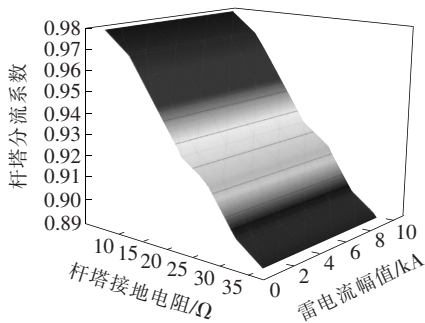


图5 有避雷线无避雷器时杆塔分流系数的变化趋势

Figure 5 Trends of current shunt coefficient of tower applying a shielding wire without lightning arresters

表2 有避雷线无避雷器时的耐雷水平计算结果

Table 2 Lightning withstand level calculation of tower applying a shielding wire without lightning arresters

R_g/Ω	I_1/kA	R_g/Ω	I_1/kA
5	36.2	25	20.5
10	31.5	35	15.4
15	27.8	30	17.6
20	25.0		

由以上仿真结果可得,当线路有避雷线无避雷器时,杆塔接地电阻越小,杆塔的分流系数变大,线路的耐雷水平越高。经分析发现,杆塔接地电阻大时经杆塔接地引下线入地的电流变少,杆塔的分流系数变小,引下线的压降变小。但是杆塔接地电阻变大,接地电阻压降也会变大,在一定程度上抵消了引下线压降变小的程度,从而使塔顶电位更高,故导致绝缘子串更容易闪络、降低线路的耐雷水平。

2.1.2 无避雷线有避雷器

只对线路易击段 8、9、10 号塔的三相装设线路避雷器,避雷器安装方式如图6所示。其余塔的三相不装设避雷器,雷电流注入 9 号塔。

通过 ATP-EMTP 仿真计算,得到不同杆塔接地电阻下的线路耐雷水平和分流系数,如表3所示。在仿真中,避雷器的额定电压为 51 kV,其短时耐受电流为 100 kA,雷电冲击电压下残压为 134 kV,其表面的瓷套雷电冲击耐受电压为 185 kV。对于无避雷线的不中性点不接地系统,当单相导线对地(杆

塔)放电后,导致第二相导线闪络时的最大雷电流幅值才是线路的耐雷水平。当一相导线对地放电后,对于第二相导线而言,相当于有了一根地线,只是没有分流,故杆塔分流系数为 1。

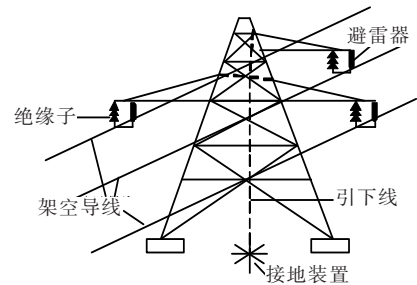


图6 线路装设避雷器

Figure 6 Installation of line lightning arrester

表3 无避雷线有避雷器时的耐雷水平和分流系数

Table 3 Lightning withstand level and current shunt coefficient of tower applying lightning arresters without shielding wires

R_g/Ω	I_1/kA	β_t	R_g/Ω	I_1/kA	β_t
5	70.8	1	25	34.6	1
10	61.8	1	30	27.8	1
15	51.8	1	35	23.6	1
20	42.5	1			

由表3可知,当线路装设避雷器后,避雷器接地电阻越小,线路的耐雷水平越高,同时杆塔的分流系数为 1。

2.1.3 有避雷线和避雷器

线路全线装设避雷线,同时仅在易击段 8、9、10 号塔的三相安装避雷器。线路的避雷器与避雷线安装如图7所示。雷电流注入 9 号塔。通过 ATP-EMTP 仿真计算,得到不同杆塔接地电阻下的线路耐雷水平和分流系数,如表4所示。

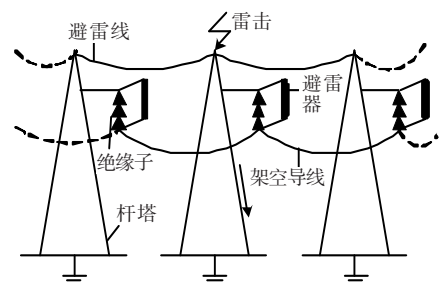


图7 线路装设避雷器和避雷线

Figure 7 Installation of line lightning arresters and a shielding wire

表 4 有避雷线和避雷器时的耐雷水平和分流系数

Table 4 Lightning withstand level and current shunt coefficient of tower with lightning arrester and shielding wire

R_g/Ω	I_1/kA	β_i	R_g/Ω	I_1/kA	β_i
5	83.5	0.79	25	38.6	0.57
10	70.3	0.72	30	30.8	0.54
15	59.6	0.67	35	26.8	0.51
20	48.6	0.62			

由表 4 可知,当线路装设避雷线和避雷器后,杆塔接地电阻越小,杆塔的分流系数越大,线路的耐雷水平越高。

2.2 结果分析

根据仿真分析,由表 1~4 可得杆塔分流系数在线路有避雷线无避雷器、无避雷线有避雷器、有避雷线和避雷器 3 种方案下的变化情况,如图 8 所示,可知线路在无避雷线有避雷器情况下,由于没有避雷线的分流,杆塔的分流系数为 1,故值最大。在同样的接地电阻下,杆塔在有避雷线无避雷器时的分流系数要比有避雷线和避雷器时的分流系数至少大 20%。这是因为避雷器动作后进行了分流。

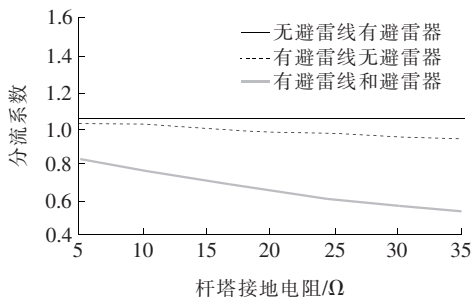


图 8 杆塔分流系数的变化情况

Figure 8 Trends of current shunt coefficient of tower

由表 2~4 可得在线路有避雷线无避雷器、无避雷线有避雷器以及有避雷线和避雷器 3 种方案下的耐雷水平变化情况,如图 9 所示,可知对于同样的杆塔接地电阻,线路在有避雷线无避雷器的情况下耐雷水平最低。而线路在无避雷线有避雷器以及有避雷线和避雷器 2 种情况下耐雷水平比较大,且在无避雷线和避雷器的情况下,耐雷水平要稍高些。经计算,当接地电阻小于 20 Ω 时,线路在无避雷线有避雷器的情况下,其耐雷水平是有避雷线无避雷器情况下的 1.8~2.0 倍;而线路在有避雷线和避雷器情况下的耐雷水平是有避雷线无避雷器情况下的

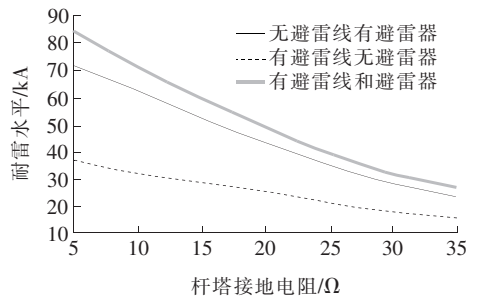


图 9 杆塔耐雷水平变化情况

Figure 9 Trends of lightning withstand level of tower

1.9~2.3 倍。且随着接地电阻越小,上述倍数越大。

另外,随着接地电阻的减小,3 种防雷方案情况的耐雷水平都会提高,但是线路在无避雷线有避雷器和有避雷线与避雷器这 2 种情况下,耐雷水平提高的效果要比线路在有避雷线无避雷器的情况下大得多。经计算,当接地电阻分别为 20、15、10、5 Ω 时,线路在有避雷线无避雷器的情况下的耐雷水平的提高效果不到其他 2 种情况的 60%。因此,从分析来看,35 kV 线路装设避雷器比架设避雷线更能提高耐雷水平。另从经济投资方面考虑,架设避雷线的费用远高于装设避雷器。故线路采用避雷器防雷比架设避雷线性性价比更高。

3 防雷改造工程

福建省某山区 35 kV 线路全长为 32 km。全线共跨河流 2 次、水库尾 2 次、县道公路 5 次、乡村公路 9 次,线路杆塔共计 183 杆。线路所经区域:10% 为丘陵、25% 为山地、45% 为高山大岭、10% 为水田。全线地质:泥水 15%、松砂石 35%、岩石 50%。所有杆塔自然接地,地势高陡,其中 5、6、7 号杆塔以及 14、15 号杆塔经常遭受雷击。

根据仿真分析,对该线路易击段加装避雷器,进行防雷改造。为了提高线路的耐雷水平,进一步降低接地电阻,该次改造决定将易施工或易遭雷击的连续几级杆塔的接地装置连接起来,连接线深埋土中。部分杆塔的接地装置连接施工示意如图 10 所示,避雷器安装在角钢横担上,一端用引线与导线连接,一端与支撑横担连接。

线路防雷改造完成后线路的跳闸率大大下降。

2015—2018年该线路的跳闸事故记录统计情况如表5所示。经计算,由表5可得,该线路改造后的雷击跳闸率降低到了改造前的27.3%。这表明该次线路的防雷改造是有效的。通过该次改造,大大提高了线路的耐雷水平。

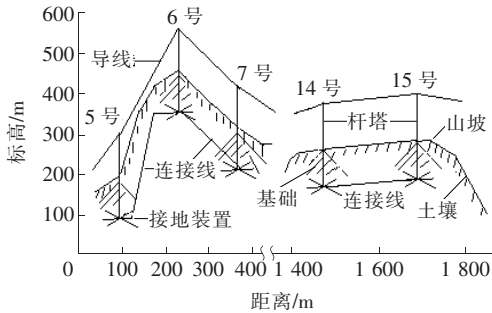


图10 接地装置连接施工示意

Figure 10 Connecting sketch for grounding connections

表5 线路跳闸事故统计

Table 5 Trip accident record form

年份	外力破坏	自然灾害	雷击跳闸		其他
			反击	直击	
2015—2016	9	8	14	8	8
2017—2018	5	11	1	5	6

4 结语

该文通过建立35 kV线路的仿真模型,分析研究了线路在有避雷线无避雷器、有避雷器无避雷线以及有避雷线和避雷器这3种防雷方案下,线路耐雷水平的差异以及杆塔分流系数的变化情况。

1)线路在无避雷线有避雷器情况下,由于没有避雷线分流,杆塔的分流系数值最大。在同样的接地电阻下,杆塔在有避雷线无避雷器时的分流系数要比有避雷线和避雷器时的分流系数至少大20%。

2)对于同样的杆塔接地电阻,线路在有避雷线无避雷器情况下的耐雷水平小于2种情况:当接地电阻小于 $20\ \Omega$ 时,线路在无避雷线有避雷器的情况下,其耐雷水平是有避雷线无避雷器情况下的1.8~2.0倍;而线路在有避雷线和避雷器情况下的耐雷水平是有避雷线无避雷器情况下的1.9~2.3倍。

从分析来看,当35 kV线路装设避雷器后,由于增加了线路释放雷电能量的能力,故使跳闸率下降,其防雷性能优于避雷线。该文的防雷改造实例

也证明了线路装设避雷器的有效性。

参考文献:

- [1] 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.
SIMA Wenxia, YANG Qing, LI Yongfu, et al. Analysis and prospect of evaluation methods for lightning shielding failure of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2500-2513.
- [2] 王建军,唐谟懿,周力行. 地形地貌对配电线路雷害影响分析[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(1): 151-156.
WANG Jianjun, TANG Moyi, ZHOU Lixing. Topography impact analysis for distribution line lightning damage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1): 151-156.
- [3] 俞胜,梁晖,马恒瑞. 考虑环境因素影响的配电线路雷电绝缘防护失效概率计算[J]. 智慧电力, 2020, 48(5): 106-110.
YU Sheng, LIANG Hui, MA Hengrui. Lightning insulation failure probability calculation of distribution line considering environmental factors[J]. Smart Power, 2020, 48(5): 106-110.
- [4] 毕洁廷. 计及山谷深度的输电线路雷电绕击率三维EGM研究[J]. 中国电力, 2021, 54(8): 91-97.
BI Jieting. Three-dimensional EGM study on shielding failure rate of transmission lines considering canyon depth[J]. Electric Power, 2021, 54(8): 91-97.
- [5] 据泽立,吕新良,蒲路,等. 陕西地区配电线路新型防雷装置研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(11): 94-99.
JU Zeli, LV Xinliang, PU Lu, et al. Analysis and application of new lightning protection equipment of distribution lines in Shanxi Province[J]. Electric Power, 2019, 52(11): 94-99.
- [6] 夏亮,杨江平,邓斌,等. 雷达站电源综合防雷系统研究与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 143-150.
XIA Liang, YANG Jiangping, DENG Bin, et al. Study and design of comprehensive lightning protection system for power supply of radar station[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 143-150.
- [7] 刘守豹,曾伟,廖文龙,等. 35 kV输电线路雷击特性及防雷措施研究[J]. 电瓷避雷器, 2018(6): 34-38.

- LIU Shoubao, ZENG Wei, LIAO Wenlong, et al. Analysis of lightning transient characteristics and lightning protection measures of 35 kV overhead line[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2018(6):34-38.
- [8] 李想,姜伟. 35 kV线路耐雷水平影响因素仿真研究[J]. *电瓷避雷器*, 2017(4): 125-131.
- LI Xiang, JIANG Wei. Simulation study on the influence factors of lightning withstand level of 35 kV transmission line[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2017(4): 125-131.
- [9] 郝捷,郑惠萍,薄利明,等. 35 kV架空线路避雷器安装方式的仿真研究[J]. *电瓷避雷器*, 2017(3): 101-107.
- HAO Jie, ZHENG Huiping, BO Liming, et al. Simulation study on arresters installation method for 35 kV overhead lines[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2017(3): 101-107.
- [10] 张铁竹,张桂香. 考虑线路走廊环境的35 kV配电网避雷器优化配置研究[J]. *电瓷避雷器*, 2016(5): 74-78.
- ZHANG Tiezhu, ZHANG Guixiang. Optimal configurations of surge arresters of 35 kV distribution lines with different line corridors environment[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2016(5):74-78.
- [11] 杨俊武,姚璞,李枚,等. 架空输电线路雷击事故分析及对策[J]. *湖南电力*, 2019,39(3):23-25.
- YANG Junwu, YAO Pu, LI Mei, et al. Analysis and countermeasures of lightning strike accidents on overhead transmission line[J]. *Hunan Electric Power*, 2019,39(3):23-25.
- [12] 张淼,汤心韵,周力行,等. 电站10 kV连续倾斜架空线防雷配置改造[J]. *电力科学与技术学报*, 2019,34(2): 169-174.
- ZHANG Miao, TANG Xinyun, ZHOU Lixing, et al. Power station 10 kV continuous tilt overhead line lightning protection reformation[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2019,34(2): 169-174.
- [13] 刘宇晴,王晗钰,林子鉴,等. 基于雷电记录与行波数据的雷击故障测距结果优化方法[J]. *电网与清洁能源*, 2021,37(1):1-7.
- LIU Yuqing, WANG Hanyu, LIN Zijian, et al. An optimization method for lightning fault location results based on lightning records and traveling wave data[J]. *Power System and Clean Energy*, 2021, 37(1): 1-7.
- [14] 李超,梁武民. 避雷器监测系统关键技术实现方案研究[J]. *电测与仪表*, 2020,57(6):148-152.
- LI Chao, LIANG Wumin. Research on key technology of surge arrester monitoring system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020,57(6):148-152.
- [15] 吕哲,王增平. 基于暂态波形特征的输电线路雷击干扰与故障识别方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020,48(6):18-26.
- LV Zhe, WANG Zengping. Identification of lightning strike disturbance and faults for transmission line based on transient waveform characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2020,48(6):18-26.
- [16] Martinez J A, Goldsworthy D, Horton R. Switching overvoltage measurements and simulations—Part I: Field test overvoltage measurements[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014,29(6): 2502-2509.
- [17] Han Rui, Yang Qing, Sima Wenxia, et al. Non-contact measurement of lightning and switching transient overvoltage based on capacitive coupling and pockels effects[J]. *Electric Power Systems Research*, 2016,139:93-100.