

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.04.027

垂直接地极对杆塔冲击接地电阻的影响研究

高竹青¹, 曹晓斌², 杜俊乐², 田明明²

(1. 国网山东省电力公司潍坊供电公司, 山东 潍坊 261021; 2. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 雷击输电线路杆塔时, 杆塔接地装置的冲击电阻过大是造成雷电反击跳闸的主要原因。针对如何利用垂直接地极有效降低杆塔冲击接地电阻这一问题, 文中建立典型杆塔接地装置仿真模型, 研究了不同长度垂直接地极的影响范围; 垂直接地极数量、长度对于杆塔接地装置降阻效果的影响。通过研究发现, 不同长度垂直接地极影响范围不同: 10 m长垂直接地极的影响范围大约为40 m, 而3 m和5 m长垂直接地极的影响范围分别为5 m和20 m; 在所添加垂直接地极总长度相同的情况下, 所采用单根垂直接地极的长度越长, 则降阻效果越好; 随着垂直接地极数量的增加, 其降阻率都不断趋向饱和。推荐在泄漏电流弱的地方添加尽可能长的垂直接地极, 然后再根据其影响范围增加合适的垂直接地极数量。该结论可为杆塔接地体的设计及改造提供参考。

关键词: 雷电; 垂直接地极; 接地体; 杆塔; 冲击接地电阻

Study on the Effect of Vertical Rod on Reducing Tower's Impulse Grounding Resistance

GAO Zhuqing¹, CAO Xiaobin², DU Junle², TIAN Mingming²

(1. Weifang Power Supply Company of State Grid Shandong Electric Power Company, Shandong Weifang 261021, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: When lightning current striking the tower, the main cause of lightning trip-out is large impulse resistance of the tower grounding device. In view of how to use the vertical rod to reduce the impulse grounding resistance of tower, this paper establishes simulation model of typical tower grounding device to study the influence scope of different length vertical rod, the number and length of vertical grounding electrodes influence on resistance reducing effect. Through the study found that the different length of the vertical rod affects different area-the influence scope of 10 meter vertical rod is about 40 m, however, the influence scope of 3 m and 5 m vertical rod is about 5 m and 20 m respectively. When the total length of vertical grounding electrode under the same condition, the length of the vertical rod is longer, the resistance reduction effect is the better. With the increase in the number of vertical grounding electrodes, the resistance-reducing ratio is always saturated. This paper recommended that adding as much as possible long vertical rod at the place which the leakage current is weak, then according to the vertical rod's impact area to increase the right number of vertical rod. This conclusion can provide technical reference for the design and reconstruction of the tower grounding device.

Key words: lightning current; vertical rod; grounding body; tower; impulse grounding resistance

0 引言

当雷电流击中杆塔或避雷线时, 大部分雷电流会通过接地装置流入大地。由于杆塔接地装置散流不良造成接地电阻过高时, 雷电流会在塔顶产生

极高的过电压, 造成绝缘子闪络, 引起线路跳闸^[1-6], 输电线路杆塔接地装置可以有效保障电力系统的安全可靠运行^[7-10]。中国电网实际运行经验表明, 对接地装置增加垂直接地极可以有效降低其冲击接地电阻, 并且还可以改善跨步电压等问题。近年来

收稿日期: 2017-10-30; 修回日期: 2018-01-08

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金(51325704)。

Project Supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars (51325704).

国内学者对于接地装置的冲击特性展开深入的研究,目前针对接地装置冲击特性的研究主要通过以下3种方式:地网冲击的真型实验、模拟实验和仿真计算。由于受冲击设备、实验场地及实验费用等的制约,开展地网冲击真型实验的相关研究较少^[11]。文[12-15]采用模拟实验的方法,通过等比例的缩小接地装置尺寸来获取大尺寸接地体冲击系数的试验数据;文[16-17]通过模拟试验提出在接地极上的合适位置布置“针刺”状短导体能够起到增强其冲击散流均匀度,降低其冲击接地电阻的作用,且当“针刺”位于接地极中部而非端部时,降阻效果更明显;文[18]通过对垂直接地极的仿真计算提出增设垂直接地极能有效减低接地系统的接地电阻、减小发电站的接触电压和跨步电压、减小季节因素对地网安全性的影响;文[19]中规定在高土壤电阻率地区,当地下较深处的土壤电阻率较低时,可采用井式、深钻式接地极或采用爆破式接地技术来降低接地装置的冲击接地电阻,但该规程中并未给出具体的垂直接地极埋设的长度及数量的建议。

增加垂直接地极可以有效改善接地装置冲击接地电阻过大、接触电压、跨步电压等问题,但是对接地装置增加垂直接地极的位置及所加接地极的长度、数量等问题需要展开深入研究。文中利用电磁仿真软件对目前电力系统采用的典型杆塔接地装置进行建模仿真,通过在杆塔接地装置上施加2.6/50 μs 标准雷电流,分析垂直接地极长度、数量对杆塔冲击接地电阻降阻效果的影响,并通过研究给出了垂直接地极的推荐布置方式,可为杆塔接地装置的设计和改造提供参考。

1 杆塔接地体仿真模型的建立

1.1 建立杆塔接地体仿真模型

文中利用电磁仿真软件CDEGS对500 kV杆塔典型接地装置进行建模仿真,仿真模型见图1。图1中接地体材料使用 $\phi 10\text{ mm}$ 圆钢,矩形框的边长为18 m,射线长度设为 $X(\text{m})$,埋深 $d=0.8\text{ m}$,在土壤电阻率 ρ 为1 000 $\Omega\cdot\text{m}$ 和2 000 $\Omega\cdot\text{m}$ 的情况下分别对杆塔接地装置建模仿真。

1.2 杆塔接地装置的编号规则

采用2.1节中的典型杆塔接地体仿真模型,根据文[20]计算的有效散流长度,当土壤电阻率 ρ 为2 000 $\Omega\cdot\text{m}$,射线长度 X 取为86 m,接地导体每1 m分为1段。由于图1中的接地装置为对称装置,并且雷电流也为四边对称注入方式,因此在研究接地

装置冲击散流规律时可只观察一条边的散流分布情况。冲击接地装置导体分段及编号情况见图2。

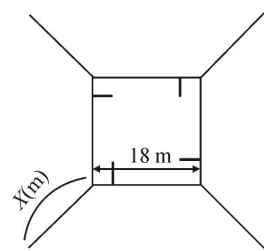


图1 杆塔接地体的仿真模型

Fig. 1 The simulation model of typical tower grounding body

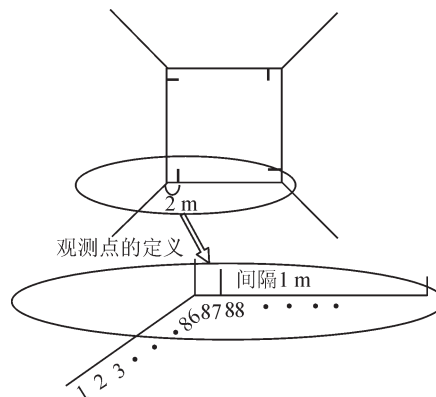


图2 接地导体的编号分布

Fig. 2 Number distribution of the grounding conductor

垂直接地极的位置及数量对杆塔接地装置的影响,可以通过所施加垂直接地极后的冲击散流分布情况进行研究。

2 垂直接地极位置、数量对降阻效果的影响

垂直接地极对接地装置的降阻效果可用降阻率 ζ 来表示,其定义为

$$\zeta = \frac{|R' - R|}{R} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: R 为降阻前的冲击电阻; R' 为降阻后的冲击电阻。

2.1 土壤电阻率为2 000 $\Omega\cdot\text{m}$ 时垂直接地极对降阻效果的影响

采用图1的仿真模型,根据文[20]计算得到的有效长度,当土壤电阻率为2 000 $\Omega\cdot\text{m}$ 时,取接地装置射线长度为86 m,导体1 m分为一段,从射线末端到矩形边依次编号为1-104,然后为其添加半径为0.005 m的垂直接地极。

2.1.1 添加10 m垂直接地极

根据文[20]中的研究结论:接地体框型部分及雷电流注入点处散流能力较弱,沿着射线方向接地体散流能力逐步增强,射线末端的散流能力最强。

据此首先在散流能力较弱处(即冲击电流注入点处)添加10 m长的垂直接地极,观察散流规律,其添加垂直接地极前后的散流分布对比见图3。

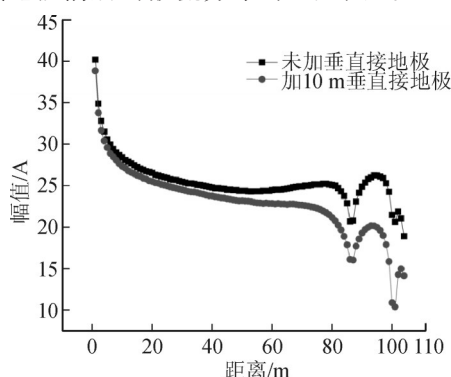


图3 一根10 m垂直接地极散流情况对比

Fig. 3 A 10 m vertical rod diffuser comparison

从图3可以看出,当在冲击电流注入点增加一根10 m的垂直接地极后,影响的散流范围较大,除了矩形框部分,也影响了一定长度的射线部分。通过对比分析发现,一根10 m的垂直接地极影响范围约为40 m,而此时的冲击接地电阻为 $17.02\ \Omega$,降阻率为3.95%。

由于10 m垂直接地极的影响范围大约为40 m,第2次则间隔40 m在编号为60处继续增加10 m长垂直接地极,观察散流分布情况,其添加垂直接地极前后的散流分布对比见图4。

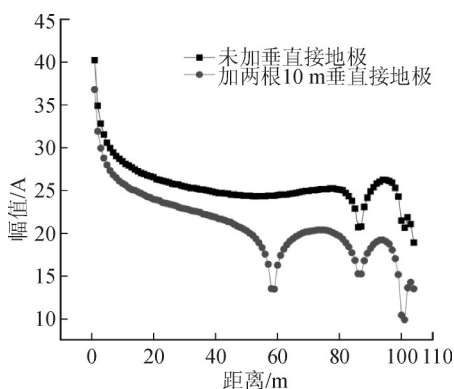


图4 2根10 m垂直接地极散流情况对比

Fig. 4 Two 10 m vertical rods diffuser comparison

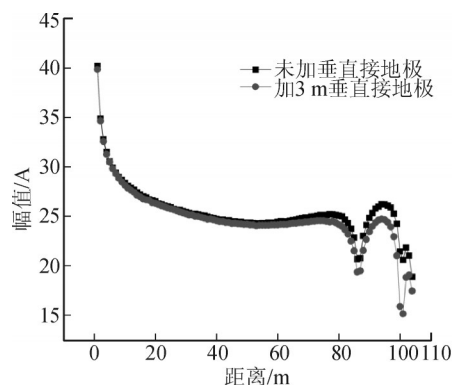
由图4可以看出,当在60号导体段处再次添加一根10 m的垂直接地极后,2根垂直接地极几乎影响了整个杆塔接地装置的散流分布,添加2根10 m长垂直接地极后的冲击接地电阻值为 $16.44\ \Omega$,降阻率7.22%。

考虑10 m长垂直接地极的影响范围,继续间隔40 m在编号为20导体段处添加一根10 m长的垂直接地极,此时接地装置的冲击接地电阻为 $16.17\ \Omega$,降阻率为8.75%,随着垂直接地极数量的增加,降阻

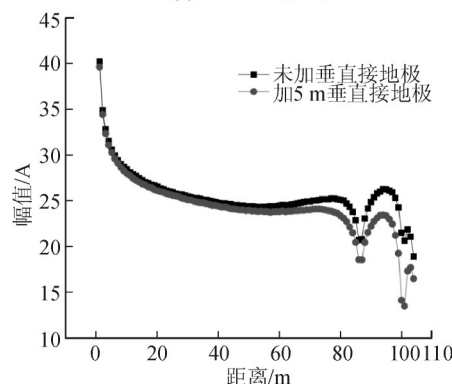
率不断趋向饱和。

2.1.2 添加3、5 m垂直接地极

与2.1.1节类似,首先在散流能力较弱处(即冲击电流注入点处)分别添加3、5 m长的垂直接地极,观察散流规律,其添加垂直接地极前后的散流分布对比见图5。



(a) 3 m垂直接地极



(b) 5 m垂直接地极

图5 3、5 m垂直接地极散流情况对比

Fig. 5 3 m and 5 m vertical rod diffuser comparison

从图5可以看出,当在冲击电流注入点分别添加一根3 m或5 m的垂直接地极后,虽然影响了一定范围内导体段的散流效果,但是影响范围相对10 m的垂直接地极较小。通过对比分析发现,一根3 m和5 m长垂直接地极的影响范围分别约为5 m和20 m。

根据垂直接地极各自的影响范围为接地装置继续增加垂直接地极数量,其中3 m长接地极的添加间距为5 m,5 m长垂直接地极的添加间距为20 m。通过计算得到相应的冲击接地电阻和降阻率,见表1、2。

通过表1、2可以发现:随着垂直接地极数量的增加,其降阻率都不断趋向饱和;并且在所加垂直接地极总长度相同的情况下,5 m长垂直接地极的降阻效果优于增加3 m长垂直接地极。

2.1.3 3种垂直接地极降阻效果分析

在考虑不同长度垂直接地极的影响范围后,对比3种垂直接地极的降阻效果,见图6。

表1 3 m垂直接地极对冲击接地电阻的影响
Table 1 3 m vertical rod effect on grounding resistance

垂直接地极数量/个	冲击接地电阻/ Ω	降阻率/%
0	17.72	0.00
1	17.62	0.56
2	17.47	1.41
3	17.36	2.03
4	17.27	2.54
5	17.11	3.44
6	16.99	4.12
7	16.89	4.68
8	16.79	5.25
9	16.69	5.81
10	16.59	6.38

表2 5 m垂直接地极对冲击接地电阻的影响
Table 2 5 m vertical rod effect on grounding resistance

垂直接地极数量/个	冲击接地电阻/ Ω	降阻率/%
0	17.72	0.00
1	17.48	1.35
2	17.21	2.96
3	16.95	4.35
4	16.79	5.25
5	16.69	5.81
6	16.48	6.99

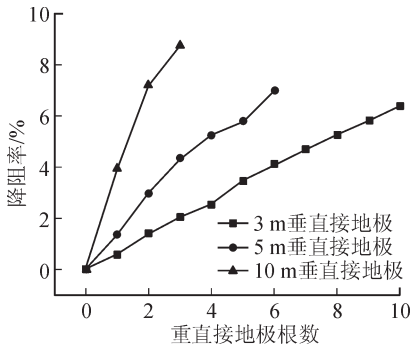


图6 不同长度垂直接地极降阻效果对比
Fig. 6 The resistance-reducing effect comparison between different length of the vertical rod

由图6可以看出:垂直接地极越长,垂直接地极数量越多,降阻效果越好。当考虑材料成本后,在相同垂直接地极总长度下,不同垂直接地极降阻率对比情况见表3。

表3 30 m总长度下,不同垂直接地极降阻率对比
Table 3 Comparing the different vertical grounding resistance reduction rate under the total length of 30 m

垂直接地极长度/m	降阻率/%
3	6.38
5	6.99
10	8.75

从表3可以看出,在所添加垂直接地极总长度相同的情况下,随着单根垂直接地极长度的增加(充分考虑不同长度垂直接地极影响范围的情况后),其相应的降阻效果也随之变得越来越好。

因此,在施工难度、人工成本等允许的情况下,在进行接地改造时,应在泄漏电流弱的地方添加尽可能长的垂直接地极,然后再根据其影响范围增加合适的垂直接地极数量。

2.2 土壤电阻率为1 000 $\Omega\cdot\text{m}$ 时垂直接地极对降阻效果的影响

根据文[20]计算得到的有效长度,当土壤电阻率为1 000 $\Omega\cdot\text{m}$ 时,取接地装置射线长度为61 m,导体1 m分为一段,从射线末端到矩形边依次编号为1-79,然后为其添加半径为0.005 m的垂直接地极。

与文2.1节类似,通过增加10、5、3 m长垂直接地极进行建模仿真发现:一根10 m的垂直接地极影响范围同样约为40 m;而一根3 m和5 m长垂直接地极的影响范围同样分别约为5 m和20 m。

在考虑不同长度垂直接地极的影响范围后,对比3种垂直接地极的降阻效果,见图7。

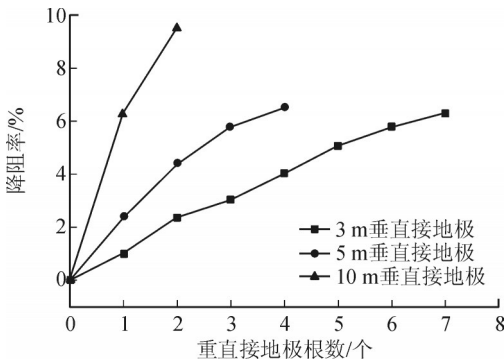


图7 不同长度垂直接地极降阻效果对比
Fig. 7 The resistance-reducing effect comparison between different length of the vertical rod

由图7可以看出,垂直接地极越长,垂直接地极数量越多,降阻效果越好。当考虑材料成本后,在相同垂直接地极总长度下,不同长度的垂直接地极降阻率对比见表4。

表4 20 m总长度下,不同垂直接地极降阻率对比
Table 4 Comparing the different vertical grounding resistance reduction rate under the total length of 20 m

垂直接地极长度/m	降阻率/%
3	6.28
5	6.53
10	9.49

从表4可以看出,在所添加垂直接地极总长度相同的情况下,随着单根垂直接地极长度的增加(充分考虑不同长度垂直接地极影响范围的情况后),其

相应的降阻效果也随之变得越来越好。

因此,在施工难度、人工成本等允许的情况下,在进行接地改造时,应在泄漏电流弱的地方添加尽可能长的垂直接地极,然后再根据其影响范围增加合适的垂直接地极数量。

3 结论

文中在电磁仿真软件中建立典型杆塔接地装置仿真模型,研究了垂直接地极长度、数量对杆塔冲击接地电阻降阻效果的影响,得出结论如下:

1)通过研究发现不同长度垂直接地极的影响范围不同,当采用多根垂直接地极时其间距应该大于其影响范围,从而达到较好的降阻效果。10 m长垂直接地极的影响范围大约为40 m;而3 m和5 m长垂直接地极的影响范围分别为5 m和20 m。

2)通过研究发现在所添加垂直接地极总长度相同的情况下,随着单根垂直接地极长度的增加,其相应的降阻效果也随之变得越来越好。

3)通过研究发现随着垂直接地极数量的增加,其降阻率都不断趋向饱和,因此在增加垂直接地极时应当取合适的数量。推荐所加垂直接地极影响范围能够覆盖整个杆塔接地装置时即可。

在施工难度、人工成本等允许的情况下,在进行接地改造时,应在泄漏电流弱的地方添加尽可能长的垂直接地极,然后再根据其影响范围增加合适的垂直接地极数量。

参考文献:

- [1] 韩学民,夏长征,喻剑辉,等. 杆塔接地体冲击电位分布特性的模拟试验[J]. 高电压技术,2011,37(10):2464-2470. HAN Xuemin, XIA Changzheng, YU Jianhui, et al. Simulation experiment on potential distribution for grounding electrode of transmission tower under impulse current[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10):2464-2470.
- [2] 彭向阳,詹清华,周华敏,广东电网同塔多回路雷击跳闸影响因素及故障分析[J]. 电网技术,2012,36(3):81-87. PENG Xiangyang, ZHAN Qinghua, ZHOU Huamin. Influencing factors of lightning outage in multi-circuit transmission lines on same tower in guangdong power grid and fault analysis[J]. Power System Technology, 2012, 36 (3): 81-87.
- [3] 左鹏,魏冲,邹军,等. 不等间距布置导体的接地网优化设计[J]. 高电压技术,2011,37(9):2315-2320. ZUO Peng, WEI Chong, ZOU Jun, et al. Optimal design of grounding grid in which conductor unequally spaced[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2315-2320.
- [4] 严飞,何慧雯,谷定燮,特高压线路雷击塔顶时导线上的感应过电压[J]. 高电压技术,2006,32(12):7-10. YAN Fei, HE Huiwen, GU Dingxie. Research on induced over-voltage caused by lightning strike on top of UHV transmission towers[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12):7-10.
- [5] 张波,何金良,曾嵘. 电力系统接地技术现状及展望[J]. 高电压技术,2011,37(3):548-554. ZHANG Bo, HE Jinliang, ZENG Rong. State of art and prospect of grounding technology in power system[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 548-554.
- [6] 杨帅,邹建明,喻剑辉,等. 输电线路与引雷塔雷电监测与雷电流波形分析[J]. 高电压技术,2013,39(6):1536-1540. YANG Shuai, ZHOU Jianming, YU Jianhui, et al. Monitoring and analysis of lightning current waveform observed on transmission line and lightning tower[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6):1536-1540.
- [7] 何金良,曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京:科学出版社,2007. HE Jinliang, ZENG Rong. Grounding technology in power system[M]. Beijing:China Science Press, 2007.
- [8] 张波,余绍峰,孔维政,等. 接地装置雷电冲击特性的大电流试验分析[J]. 高电压技术,2011,37(3):548-554. ZHANG Bo, YU Shaofeng, KONG Weizheng, et al. Experimental analysis on impulse characteristics of grounding devices under highlightning current[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 548-554.
- [9] HEINRICH G R. Lightning protection[M]. London: Edward Arnold, 1973:26-27.
- [10] HE J L, GAO Y Q, ZENG R, et al. Effective length of counterpoise wire under lightning current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2):1585-1591.
- [11] 邓长征,杨迎建,董晓辉,等. 接地装置冲击大电流试验系统研制及杆塔接地冲击特性测试[J]. 高电压技术,2013,39(6):1527-1535. DENG Changzheng, YANG Yingjian, DONG Xiaohui, et al. Development of impulse high current testing system of grounding devices and testing of tower grounding impulse characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1527-1535.
- [12] 邓长征,杨迎建,童雪芳,等. 接地装置冲击特性研究分析[J]. 高电压技术,2012,38(9):2447-2454. DENG Changzheng, YANG Yingjian, TONG Xuefang, et al. Impulse characteristic analysis of grounding devices[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2447-2454.
- [13] 刘浔,陈俊武,尹小根,等. 输电线路杆塔接地装置冲击接地电阻特性研究[J]. 华中科技大学学报,2005,33(12):54-60. LIU Xun, CHEN Junwu, YIN Xiaogen, et al. The characteristics of impulse grounded resistance of transmission line towers[J]. Journal of Huazhong University of Science &

- Technology, 2005, 33(12):54-60.
- [14] 杨琳, 吴广宁, 李建明. 接地网冲击特性实验[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 201-204.
YANG Lin, WU Guangning, LI Jianming. Field test of impulse characteristic of ground mesh[J]. Power System Technology, 2010, 34(3):201-204.
- [15] 司马文霞, 雷超平, 袁涛, 等. 改善冲击散流时地中电场分布的接地降阻试验[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2294-2301.
SIMA Wenxia, LEI Chaoping, YUAN Tao, et al. Experimental study on grounding resistance reduction based on improved grounding electric field distribution induced by the diffuser of impulse current[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9):2294-2301.
- [16] 袁涛, 雷超平, 司马文霞, 等. 提高接地极散流效率的冲击接地降阻分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 278-283.
YUAN Tao, LEI Chaoping, SIMA Wenxia, et al. Analysis of grounding resistance reduction effect based on enhancing impulse current leakage efficiency[J]. Transaction of China Electro technical Society, 2012, 27(11):278-283.
- [17] 李景丽, 蒋建东, 李丽丽. 针刺式接地装置降阻机制的仿真和试验研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1):211-217.
LI Jingli, JIANG Jiandong, LI Lili. Simulation and experiment study on resistance-reducing mechanism of grounding device with spicules[J]. Power System Technology, 2013, 37(1):211-217.
- [18] 曾嵘, 何金良, 高延庆, 等. 垂直接地极对接地系统电气性能的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(3):25-27.
ZENG Rong, HE Jinliang, GAO Yanqing, et al. Influence of vertical grounding electrodes on electrical characteristics of grounding systems[J]. Journal of Tsinghua University(Nature Science), 2001, 41(3):25-27.
- [19] 交流电气装置的接地设计规范:GB 50065—2011[S]. 2011.
Code for design of AC electrical installations earthing:GB 50065—2011[S]. 2011.
- [20] 曹晓斌, 高竹青, 杜俊乐, 等. 雷击杆塔接地体有效散流长度的研究[C]//第32届中国气象学会年会S20第十三届防雷减灾论坛——雷电物理和防雷新技术. 天津:中国气象学会, 2015:915-919.
CAO Xiaobin, GAO Zhuqing, DU Junle, et al. Research on the effective dissipation length of tower grounding device under lightning current[C]//the 32 Chinese Meteorological Society, S20 the 13 Forum on Lightning Protection and Disaster Reduction-new Technology of Lightning Physics and Lightning Protection. Tianjin:CMS, 2015:915-919.

高竹青(1990—), 男, 硕士, 研究方向为过电压与接地保护技术。

曹晓斌(1974—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为过电压与绝缘配合、防雷与接地技术。

(上接第181页)

- upon an impact on a composite target[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2012, 53(1): 113-117.
- [10] 高压交流熔断器第2部分—限流熔断器:GB/T 15166.2—2008[S]. 2008.
The second part of HTAC—Current limit fuse:GB/T 15166.2—2008[S]. 2008.
- [11] 周挺, 毛柳明. 高压限流熔断器的过电压动态仿真与数值计算[J]. 高压电器, 2007, 43(3):203-205.
ZHOU Ting, MAO Liuming. Numerical calculation and dynamic simulation of the overvoltage during the breaking progress for the high voltage current limiting fuse[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(3): 203-205.
- [12] 徐黎明. 负荷开关-熔断器组合电器中 T_0 的确定[J]. 高压电器, 2000, 36(5):47-49.
XU Liming. The confirmation of time T_0 of of fuse striker as load switch in combination units[J]. High Voltage Apparatus, 2000, 36(5): 47-49.
- [13] VELDANOV V A, MARKOV V A, PUSEV V I, et al. Computation of nondeformable striker penetration into low-strength obstacles using piezoelectric accelerometry data[J]. Technical Physics, 2011, 56(7): 992-1002.
- [14] YOON S H, KWON Y W, CLAWSON L A. Experimental investigation on low energy impact behavior of foam cored sandwich composites[J]. KSME International Journal, 1997, 11(2): 136-142.
- [15] COMPTON P, STYLES M, KALYANASUNDARAM S. A comparison of low energy impact behaviour in aluminium foam and polymer foam sandwich structures[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Sandwich Structures. Aalborg, Denmark:Aalborg University, 2005:643-652.

王金元(1980—), 男, 博士研究生, 研究方向为机械动力学。