

连续雷电冲击下典型杆塔接地装置冲击 接地电阻分析

刘宇彬¹, 雷川丽¹, 唐利松¹, 冯子阳², 周力行²

(1. 湖南经研电力设计有限公司, 湖南 长沙 410000; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:为分析连续雷电冲击下杆塔接地装置的冲击特性, 对不同土壤、材料及形状的典型接地体进行连续冲击试验。在连续脉冲冲击下, 随着冲击脉冲时间间隔的增大, 二次冲击接地电阻由土壤击穿时的较低值增大, 逐渐恢复到单脉冲冲击接地电阻; 但在一定的时间间隔范围内, 含水量较少的土壤中接地装置的二次冲击接地电阻明显大于单脉冲冲击接地电阻; 不同形状及不同材料接地体的二次冲击接地电阻不同。在杆塔接地设计时应考虑连续雷电冲击下冲击接地电阻增大现象, 综合考虑接地体的材料及其形状。基于实验结果, 提出连续雷电冲击下杆塔接地系统的 ATPDraw 仿真建模方法, 该方法能较好地模拟冲击接地火花效应和土壤击穿后土壤电阻率恢复过程。

关键词:连续雷电冲击; 杆塔接地; 冲击接地电阻; 土壤电阻率

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.028 中图分类号: TM862 文章编号: 1673-9140(2023)01-0243-06

Impulse grounding resistance analysis of typical tower grounding device under continuous lightning impulse

LIU Yubin¹, LEI Chuanli¹, TANG Lisong¹, FENG Ziyang², ZHOU Lixing²

(1. The Research of Hunan Province Electric Power Design Limited, Changsha 410000, China; 2. School of Electrical & information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to analyze the impulse characteristics of tower grounding device under continuous lightning impulse, continuous impact tests of typical grounding bodies with different soils, materials and shapes are carried out. Under continuous pulse impact, with the increase of impulse time interval, the secondary impact grounding resistance increases from the lower value at soil breakdown to the single pulse impact grounding resistance. However, within a certain time interval, the secondary impulse grounding resistance of grounding device in soil with less water content is significantly greater than that of single pulse impulse. The secondary impulse grounding resistances of grounding bodies with different shapes and materials are different. In the tower grounding design, the increase of impulse grounding resistance under continuous lightning impulse needs to be considered, and the material and shape of grounding body should be comprehensively considered. Based on the experimental results, the ATP Draw simulation modeling method of tower grounding system under continuous lightning impulse is proposed. This method achieves good effect when simulating the spark effect of impulse grounding and the recovery process of soil resistivity after soil breakdown.

Key words: continuous lightning impulse; tower grounding; impulse grounding resistance; soil resistivity

收稿日期: 2021-09-12; 修回日期: 2022-04-26

基金项目: 湖南省战略性新兴产业科技攻关与重大科技成果转化项目(2018GK4002)

通信作者: 周力行(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事高电压与绝缘技术研究; E-mail: zlxztwyr@163.com

输电线路杆塔接地对输电线路安全稳定运行至关重要,杆塔接地装置的冲击散流特性是输电线路杆塔接地设计的基础^[1-2]。已有杆塔接地系统的冲击散流特性,通常是以单次冲击电流波模拟雷电流进行试验分析的结果。但通过雷电观测发现,雷电过程存在一次击穿多次放电,即雷电的多脉冲现象,雷电流波形表现为多个脉冲组成,时间间隔一般在几百微秒至几百毫秒不等^[3-4]。由于雷电冲击的火花效应,土壤在雷电流冲击下击穿电离,土壤电阻率降低,且在短时间内不能完全恢复。因此,土壤介质在连续雷电冲击下所表现的特性与单次脉冲电流冲击表现不同^[5]。

接地冲击散流特性的研究主要有数值计算和试验研究等方法,实验研究包括真型试验和模拟实验2种^[6]。模拟实验能较好地反映接地系统物理过程,近几年相关学者对杆塔冲击特性进行了大量的实验研究^[7-10]。文献[10]对于连续冲击电流作用下的土壤放电特性进行试验研究,提出土壤放电恢复机理,分析土壤放电恢复系数与冲击电流幅值、土壤含水量及土壤含盐量的关系,为后续研究打下基础,但尚未开展连续雷电冲击下杆塔接地装置的冲击特性的研究。

本文构建连续冲击模拟实验平台,开展不同土壤、不同形状、不同材料的典型接地装置在连续冲击下的冲击特性试验与分析,为输电线路杆塔接地系统的优化设计提供参考。

1 实验平台

实验平台由2个并联的单脉冲冲击电流发生器构成,实验回路如图1所示。两脉冲的时间间隔由测控一体化系统控制球隙点火时间调节,0~100 ms可调,单个脉冲电流波形为8/20 μ s,脉冲幅值1~10 kA可调。连续冲击电流经电缆线接到实验样品上,利用测控一体化系统测量放电波形用于分析。

以沙土作为试验样品,如图2所示,土壤介质置于边长为80 cm的立方体盒中,沙盒内表面嵌有铜膜并接地,电极埋入土壤中间,其底端距三侧铜膜40 cm,土壤均匀分布,无湿沙结团现象。

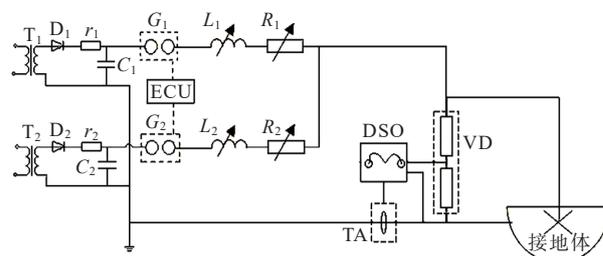


图1 实验原理

Figure 1 Experimental schematic diagram



图2 沙土试验样品

Figure 2 Sand test samples

取试验比例尺为10,试验中长度为0.4 m、直径为5 mm、埋深为0.15 m的水平接地极,对应于实际长度为4 m、直径为5 cm、埋深为1.5 m的水平接地极。典型接地装置模型如下。

- 1) 水平接地极。长为0.4 m、直径为5 mm的镀锌圆钢、锰铜、石墨烯柔性接地体各一个,埋深为15 cm。
- 2) 十字型接地装置。长为0.4 m、直径为5 mm的镀锌钢、圆钢、锰铜各一个,埋深为0.15 m。

2 试验结果分析

2.1 土壤湿度对冲击接地电阻的影响

土壤散流特性与土壤含水量关系紧密,土壤含水量越高,土壤电阻率越小。在单冲击电流作用下,冲击接地电阻随着土壤电阻率的增大而增大。在连续冲击电流作用下,由于首次冲击火花效应的影响,后面冲击时土壤电阻率、土壤临界击穿场强等会有明显不同。为此,分别选取湿润、较干燥及干燥土壤,其土壤电阻率分别为13、65.4、167.6 $\Omega \cdot \text{m}$ 。接地体选材为一字型镀锌钢。对接地体进行连续冲击试验,记录电流、电压波形,并计算冲击接地电阻。

$$R_{ch} = \frac{U_m}{I_m} \quad (1)$$

式中, I_m 为雷电流波形幅值; U_m 为电压波形幅值^[11-12]。测试结果如表1、图3所示。

表1 不同土壤中水平接地体的二次冲击接地电阻

Table 1 Secondary impulse grounding resistance of horizontal grounding body in different soils Ω

| 脉冲类型 | 时间间隔/ms | 不同含水量土壤 | | |
|------|---------|---------|-------|------|
| | | 湿润土壤 | 较干燥土壤 | 干燥土壤 |
| 单脉冲 | — | 5.64 | 13.0 | 32.0 |
| 双脉冲 | 0.5 | 4.97 | 8.5 | 12.6 |
| 双脉冲 | 1.0 | 5.68 | 16.1 | 18.5 |
| 双脉冲 | 10.0 | 5.84 | 13.3 | 24.5 |
| 双脉冲 | 50.0 | 5.95 | 13.0 | 28.5 |

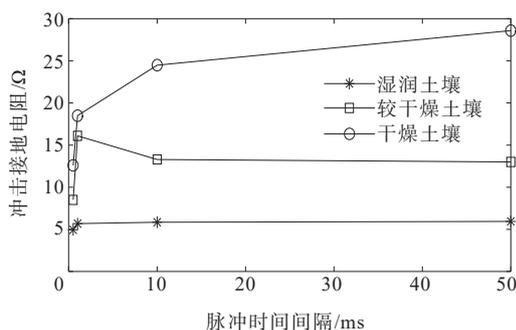


图3 不同含水量土壤中水平接地体的冲击接地电阻

Figure 3 Impact grounding resistance of horizontal grounding body in soil with different water content

由表1、图3可知,无论单脉冲冲击还是连续脉冲冲击,水平接地体在湿润土壤中的冲击接地电阻远小于干燥土壤下的冲击接地电阻。在连续冲击下,随脉冲时间间隔的增大,湿润土壤中的水平接地体的二次冲击接地电阻,由土壤击穿时的较低值增大到单脉冲冲击时的接地电阻值。含水量较少的较干燥土壤中的水平接地体,其二次冲击接地电阻从土壤击穿时的低值增大,当脉冲时间间隔在1 ms左右时,二次冲击接地电阻明显大于单脉冲冲击接地电阻,而后随时间间隔增大逐渐降至单脉冲冲击接地电阻。干燥土壤中的水平接地体,其二次冲击接地电阻从土壤击穿时的低值逐渐增大,但在较长的时间间隔内,二次冲击接地电阻均小于单脉冲冲击接地电阻。

现有土壤冲击放电恢复理论认为,在大电流冲击下土壤电离击穿,土壤电阻率降低;随着放电过程结束,放电产生的带电粒子逐渐消散,土壤电阻率逐渐恢复,恢复时间可达数十甚至上百毫秒。若

在恢复过程中出现后续冲击,由于首次冲击下积聚的带电粒子尚未完全消散,有利于后续冲击电流的散流,其冲击接地电阻较首次冲击时低^[13-14]。但在有一定水分的较干燥土壤中接地体,其二次冲击接地电阻却存在明显大于单脉冲冲击接地电阻情况,仅考虑土壤击穿后带电粒子的消散过程不能解释这一现象。

由于土壤在结构上呈现出多孔特征,土壤颗粒之间充斥着空气间隙。对于干燥的土壤,土壤冲击放电仅由颗粒间的空气间隙击穿形成的通道进行,其冲击电阻相对较高。而对于有一定含水量的土壤,土壤颗粒表面覆有水膜,在冲击电流作用下,沿土壤颗粒表面的水膜及空气间隙发生放电而形成放电通道,其冲击电阻低于干燥土壤。对于充分湿润的土壤,土壤颗粒之间的空气间隙都填满水,土壤靠水分和盐分导电,土壤电阻率低,其冲击接地电阻相对更低。

连续冲击下,首次冲击土壤击穿后,土壤水分蒸发对接地体二次冲击电阻的影响不容忽视。二次冲击接地电阻不仅与击穿后带电粒子的消散过程有关,还与水分的蒸发与恢复过程密切相关。含水量较少的土壤中的接地体,在首次脉冲冲击击穿瞬间,一方面电离使土壤散流增强,土壤电阻率下降到很低;另一方面,土壤电离又使接地体周边水分蒸发,部分土壤颗粒表面覆有的水膜消失。伴随电离产生的带电粒子的逐渐消散,土壤电阻率也逐渐恢复增大,且土壤水分恢复相对滞后,在一定时间范围内,后续冲击电流作用下,土壤仅通过颗粒间的空气间隙击穿放电,与干燥土壤中的情况一样,其冲击接地电阻将明显大于首次脉冲冲击接地电阻;随后土壤水分逐渐恢复,土壤电阻率恢复,后续冲击下的冲击接地电阻接近单脉冲冲击值。

湿润土壤中的接地体,首脉冲冲击时,水分蒸发在几十毫秒内不足以使大部分土壤颗粒之间填充水分消散,土壤导电机理没有发生改变,其二次冲击接地电阻与单脉冲冲击情况几乎一致。即使部分土壤颗粒之间的填充水分消散,土壤放电机理转变为土壤颗粒间水膜及空隙通道放电,若二次冲击时带电粒子已消散,则二次冲击接地电阻稍大于单脉冲冲击接地电阻。

干燥土壤的含水量很小,其冲击时水分蒸发的

影响可以忽略,土壤击穿后,二次冲击接地电阻仅由带电粒子的消散过程决定。随着带电粒子的消散,二次冲击接地电阻由击穿时的低值增大到单脉冲冲击接地电阻值,不存在冲击接地电阻增大情况。

2.2 形状及材料对冲击接地电阻影响

接地体的形状对冲击接地电阻也有影响。取尺度相同的一字型镀锌钢和十字型镀锌钢进行连续冲击试验,土壤均为干燥土壤,对比分析2种装置的二次冲击接地电阻,如图4所示。

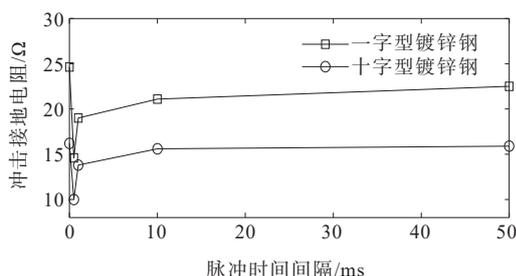


图4 不同形状接地体的二次冲击接地电阻

Figure 4 Impulse grounding resistance of grounding bodies with different shapes

由图4可知,十字型接地体的冲击接地电阻小于一字型的冲击接地电阻。主要是由于十字型接地体与土壤的接触面积要大于一字型接地体与土壤的接触面积,其散流效果较好。2种典型接地体的二次冲击接地电阻均存在一个恢复过程,约在50 ms提高至正常值,由此推测该土壤在击穿后的恢复时间约为50 ms。

对锰铜、圆钢和镀锌钢3种常见材料的一字型接地体进行连续冲击试验,其冲击接地电阻如图5所示。试验结果表明,在连续脉冲电流冲击下,不同材料的接地体,其冲击接地电阻不同,土壤击穿后的恢复时间也不同。锰铜的散流效果优于圆钢和镀锌钢。因此在实际接地体选择过程中应综合考虑接地体的材料及其形状。

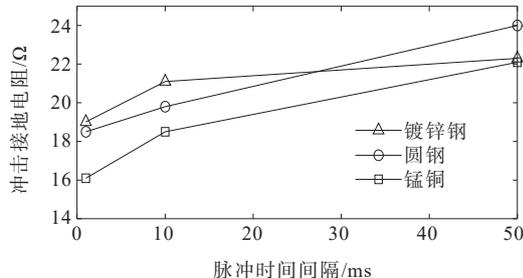


图5 一字型接地体的冲击接地电阻

Figure 5 Impulse grounding resistance of I-type grounding body

3 连续冲击下杆塔接地冲击特性仿真模型

当土壤含水量较少时,连续雷电冲击下,杆塔接地装置的冲击接地电阻有可能大于单脉冲冲击下的接地电阻值,杆塔接地系统的设计值可能不满足防雷要求,给输电线路的安全运行带来隐患。工程上通常采用ATP-Draw对杆塔接地系统的雷电冲击特性进行仿真,基于上述实验结果,在接地系统建模时不仅要考虑火花效应,还应考虑土壤击穿后土壤电阻率的恢复过程。

3.1 土壤电阻率的恢复系数

从工程角度出发,仅考虑土壤含水量较少的情况。设 I_1 、 I_2 分别为第1、2冲击脉冲作用时土壤样品中流过的电流峰值, U_1 、 U_2 分别为第1、2冲击脉冲作用时土壤样品上的电压峰值,第1、2冲击脉冲作用时的冲击接地电阻值 R_1 、 R_2 分别为

$$R_1 = U_1 / I_1$$

$$R_2 = U_2 / I_2 \quad (2)$$

定义土壤恢复系数为

$$k = R_2 / R_1 \quad (3)$$

根据实验结果,采用Matlab拟合得到较干燥土壤击穿后土壤电阻率恢复系数为

$$k = -8.272e^{-5t} + 0.3844e^{-0.3t} + 1.002, t > 0.5 \text{ ms} \quad (4)$$

土壤冲击击穿后土壤电阻率为

$$\rho(t) = k\rho_0 \quad (5)$$

3.2 考虑火花效应的水平接地体仿真模型

取水平接地体长为30 m、半径为0.005 m,埋深为0.8 m,土壤电阻率 $r_0 = 100 \text{ W} \cdot \text{m}$ 。建立水平接地体ATP-Draw仿真模型如图6所示。

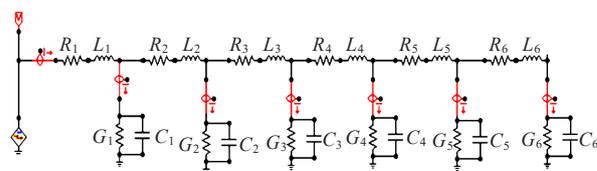


图6 水平接地体ATPDraw仿真模型

Figure 6 ATP Draw simulation model of horizontal grounding body

先考虑火花效应。当雷电流产生的场强超过土壤的临界击穿场强时,接地体周围的土壤击穿,产生火花放电。取土壤临界击穿场强为

$$E_c = 241r^{0.215} \text{ kV/m} \quad (6)$$

土壤电离使接地体散流半径增大,散流增强,冲击电流沿接地体不均匀流散。为此,将接地体分为 n 段,每段长为 Δl ,并认为各段内均匀散流。第 i 段等效半径为 r_i ,散流密度为

$$J_i = E_i / r \quad (7)$$

若第 i 段土壤电离,其场强取为 E_c ,该段接地体散流为 ΔI_i ,由式(7)计算该段导体等效半径为

$$r_i = \frac{\rho \Delta I_i}{2\pi \Delta l E_c} \quad (8)$$

采用逐次逼近的方法确定接地体仿真模型。首先不考虑火花效应,仿真计算冲击电流 I 作用下接地体各段散流 $\Delta I_i, i=1, 2, \dots, n$ 。由式(8)计算接地体各段的等效半径 r_i 及相应的电感 L_i 、电容 C_i 、电导 G_i 等参数,并取代原 ATP-Draw 仿真模型中参数,计算各段散流 $\Delta I_i'$ 。重复上述步骤,直至 $\Delta I_i'$ 与 ΔI_i 相同时,认为此时接地体的 ATPDraw 仿真模型已充分考虑土壤击穿的火花放电过程。

3.3 连续冲击下水平接地体仿真模型

在单脉冲冲击仿真模型的基础上,加入一个冲击电源,构成双脉冲冲击电流源,两脉冲的幅值均为 10 kA、波形均为 2.6/50 μs ,时间间隔为 1 ms。

考虑土壤击穿后土壤电阻率的恢复过程,土壤击穿后土壤电阻率为 $r(t) = kr_0$,仿真模型中各段的电导参数是时变的,用时间控制的非线性电导元件来模拟: $G_i(t) = G_i/k(t)$,其他参数不变。仿真模型及结果如图 7、8 所示。首脉冲冲击下电压波形 $U_{m1} = 98 \text{ kV}$,冲击接地电阻为 9.8Ω ;二次脉冲冲击下电压波形 $U_{m2} = 117 \text{ kV}$,相应的冲击接地电阻为 11.7Ω ,明显大于单脉冲冲击下的接地电阻值,基于单脉冲冲击特性设计的接地系统有可能不满足防雷要求。在设计杆塔接地系统时应考虑连续雷电冲击下冲击接地电阻增大现象。

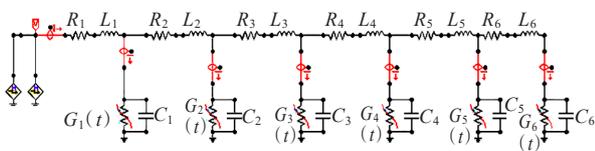


图 7 连续冲击下水平接地体仿真模型

Figure 7 Simulation model of horizontal grounding body under continuous impulse

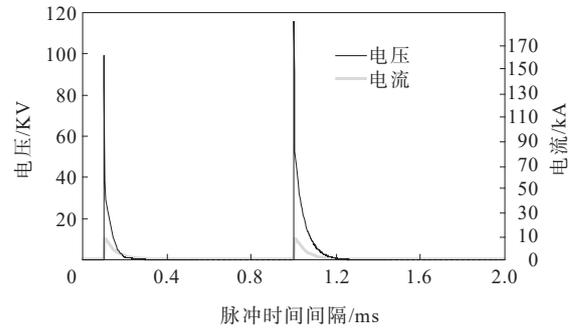


图 8 连续冲击下水平接地体仿真波形

Figure 8 Simulation waveform of horizontal grounding body under continuous impulse

4 结语

通过对不同土壤、材料及形状的接地体的连续冲击模拟试验,结合土壤放电恢复过程机理分析,得到以下结论。

1) 含水量较少的土壤中接地体在连续脉冲电流冲击下,由于其首次冲击土壤击穿的累积效应,包括土壤水分蒸发及带电粒子消散过程,其二次脉冲冲击接地电阻存在明显大于单脉冲下冲击接地电阻的情况。干燥土壤中接地体不存在这现象,随脉冲时间间隔的增大,其二次冲击接地电阻由击穿时的低值增大,逐渐恢复到单脉冲下的冲击接地电阻。湿润土壤中接地体,其二次冲击接地电阻接近或稍大于单脉冲下的冲击接地电阻。在输电线路接地设计中应考虑连续雷电冲击下冲击接地电阻增大现象。

2) 在连续脉冲电流冲击下,十字接地体冲击接地电阻均小于一字型接地体的冲击接地电阻;锰铜、圆钢和镀锌钢等 3 种常见材料接地体的冲击接地电阻不同,其中锰铜的散流效果最优。在实际接地体选择过程中应综合考虑接地体的材料及其形状。

3) 利用 ATP-Draw 对杆塔接地系统的雷电冲击特性进行仿真建模时,采用逐次逼近方法调整模型参数,实现对冲击接地火花效应的模拟。通过设置时变电导模型可实现对连续冲击下土壤电阻率的恢复过程的模拟。但土壤击穿后土壤电阻率恢复过程的影响因素复杂,准确模拟还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 薛士敏,陈硕,顾诚,等.一种基于暂态量的柔性直流系统保护及雷击识别方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(9):45-53.
XUE Shimin, CHEN Shuo, GU Cheng, et al. A method for protection and lightning identification in a flexible DC system based on transient quantities[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9):45-53.
- [2] 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.
- [3] 郭蕾,古维富,刘彬,等.杆塔接地装置的冲击阻抗建模及应用[J].电工技术学报,2020,35(10):2239-2247.
GUO Lei, GU Weifu, LIU Bin, et al. Impulse impedance modeling and application of tower grounding device[J]. Journal of Electrical Technology, 2020, 35(10):2239-2247.
- [4] 罗东辉,袁涛,司马文霞,等.连续冲击电流作用下土壤放电通道体积特征参数提取方法及机理分析[J].高压技术,2020,46(5):1791-1799.
LUO Donghui, YUAN Tao, SIMA Wenxia, et al. Mechanism and method of volume parameter extraction of soil discharge channel under successive impulse currents[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5):1791-1799.
- [5] 毕洁廷,计及山谷深度的输电线路雷电绕击率三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.
- [6] 梅诚.雷电冲击下接地装置冲击降阻与散流优化研究[D].成都:西南交通大学,2019.
MEI Cheng. Research on impact resistance reduction and dispersion optimization of grounding devices under lightning impulse[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [7] 王红坡.关于防雷接地中的冲击接地电阻分析[J].价值工程,2018,37(27):146-148.
WANG Hongpo. Analysis of impact earthing resistance in lightning protection grounding[J]. Value Engineering, 2018, 37(27): 146-148.
- [8] 杨鑫,王延夫,唐国栋,等.耦合地线在10 kV架空线路中的应用研究[J].高压电器,2022,58(12):92-101+108.
YANG Xin, WANG Yanfu, TANG Guodong, et al. Research on application of coupled ground wire in 10 kV overhead line[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 92-101+108.
- [9] 肖微,胡元潮,阮江军,等.柔性石墨复合接地材料及其接地特性[J].电工技术学报,2017,32(2):85-94.
XIAO Wei, HU Yuanchao, RUAN Jiangjun, et al. Flexible graphite composite electrical grounding material and its grounding application features[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2):85-94.
- [10] 陈一惊,赵壮民,李军浩.冲击电压下CVT传递特性及其缺陷故障检测研究[J].智慧电力,2022,50(8):89-94+108.
CHEN Yicong, ZHAO Zhuangmin, LI Junhao. Research on CVT transmission characteristics and defect fault detection under impulse voltage[J]. Smart Power, 2022, 50(8):89-94+108.
- [11] 匡福志,李霞,钟湘平等.山区配电线路塔位地形雷击风险分类[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):66-72.
KUANG Fuzhi, LI Xia, ZHONG Xiangping, et al. Classification of lightning strike risk for distribution line tower terrain in mountainous area[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4):66-72.
- [12] 魏睿,周力行,彭超敏,等.同相供电系统中负载突变时的电流检测方法[J].电力科学与技术学报,2020,35(4):147-153.
WEI Rui, ZHOU Lixing, PENG Chaomin, et al. In phase change in load current monitoring method in power system research[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4):147-153.
- [13] 王巨丰,韩力,卢辛,等.基于气吹灭弧模型研究工频电弧发展及抑制机理[J].电测与仪表,2021,58(8):104-109.
WANG Jufeng, HAN Li, LU Xin, et al. Study on the development of power frequency arc and suppression mechanism based on gas-blown arc-extinguishing model [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(8):104-109.
- [14] 宰红斌,刘云峰,卫栋,等.面向采空区的输电线路杆塔设计优化方法[J].电力工程技术,2021,40(4):182-188.
ZAI Hongbin, LIU Yunfeng, WEI Dong, et al. Optimization method of transmission line tower design for goaff[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4):182-188.