

12-1-2022

Simulation research on impulse characteristics of pole tower grounding device in double layer soil based on ATP-Draw

Lixing Zhou

School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China

Lizhi Luo

School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China

Yubin Liu

State Grid Hunan Electric Power Company Economic Research Institute, Changsha 410000, China

Hong Su

Loudi Electric Power Corporation, Loudi 417700, China

Jinqi Liu

Loudi Electric Power Corporation, Loudi 417700, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

Zhou, Lixing; Luo, Lizhi; Liu, Yubin; Su, Hong; Liu, Jinqi; and Deng, Yuwen (2022) "Simulation research on impulse characteristics of pole tower grounding device in double layer soil based on ATP-Draw," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 37: Iss. 5, Article 21.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.05.021

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol37/iss5/21>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

Simulation research on impulse characteristics of pole tower grounding device in double layer soil based on ATP-Draw

Authors

Lixing Zhou, Lizhi Luo, Yubin Liu, Hong Su, Jinqi Liu, and Yuwen Deng

基于 ATP-Draw 的双层土壤中杆塔接地装置冲击特性的仿真研究

周力行¹, 罗力之¹, 刘宇彬², 苏虹³, 刘瑾琪³, 邓裕文³

(1.长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.国网湖南省电力公司经济研究院, 湖南 长沙 410000;
3.国网娄底供电公司, 湖南 娄底 417700)

摘要:为研究分层土壤对接地装置冲击散流特性的影响, 本文提出一种基于 ATP-Draw 的双层土壤中杆塔接地装置冲击特性仿真方法。采用拉普拉斯方法计算双层土壤中的水平接地体、垂直接地体的接地电阻值, 以及双层土壤结构下接地装置各部分链式电路模型的电导参数、电容参数、电感参数等, 搭建复杂土壤中杆塔接地装置的 ATP-Draw 仿真模型, 该模型能够实现分层土壤中输电线路杆塔接地装置雷电冲击特性的仿真分析及冲击接地电阻的准确计算, 可用于杆塔接地系统设计。

关键词: 双层土壤; 镜像法; 接地体; ATP; 冲击接地电阻; 仿真

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.05.021 中图分类号: TM75 文章编号: 1673-9140(2022)05-0191-07

Simulation research on impulse characteristics of pole tower grounding device in double layer soil based on ATP-Draw

ZHOU Lixing¹, LUO Lizhi¹, LIU Yubing², SU Hong³, LIU Jinqi³, DENG Yuwen³

(1.School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2.State Grid Hunan Electric Power Company Economic Research Institute, Changsha 410000, China;
3.Loudi Electric Power Corporation, Loudi 417700, China)

Abstract: In order to study the influence of layered soil on the impulse current dispersing characteristics of grounding device. This paper proposes a simulation method for the impulse characteristics of the double-layer soil tower grounding device based on ATP-Draw. By using the Laplace method, the grounding resistance of the horizontal grounding body and the vertical grounding body in the double-layer soil are calculated. The conductivity parameters, capacitance parameters, and inductance parameters of each part of the chain circuit model of the grounding device under the double-layer soil structure are obtained. ATP-Draw simulation model of pole grounding device in complex soil is established. The proposed model can realize the simulation analysis of lightning impulse characteristics of transmission line pole grounding device in the sealed layer soil and the accurate calculation of impact grounding resistance. The contribution of this paper can be applied in the grounding system design of power transmission tower.

Key words: double-layer soil; mirror image method; grounding device; ATP; impulse grounding resistance; simulation

收稿日期: 2020-07-27; 修回日期: 2020-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(51777015); 湖南电力有限公司依托工程基建新技术研究应用项目(HN-YTKY-XL04)

通信作者: 罗力之(1996—), 男, 硕士, 主要从事高电压与绝缘研究; E-mail: 837724650@qq.com

输电线路杆塔接地冲击散流特性是杆塔接地装置设计与施工的基础,通常采用 ATP-Draw、CDEGS 等软件通过建模仿真获取其冲击散流特性,计算其冲击接地电阻^[1]。ATP-Draw 是一款暂态电磁程序,适合对杆塔接地系统在雷电冲击下的散流暂态过程的仿真计算。在均匀土壤结构下,现有的杆塔接地 ATP-Draw 仿真模型充分考虑了接地体冲击火花效应及电感应^[2],仿真结果能准确反映接地系统的冲击散流特性,但未考虑复杂土壤结构的影响。

在实际输电线路接地网设计中,土壤结构复杂,分层土壤电阻率、土层厚度、接地装置形式等对接地装置的冲击散流有很大影响^[3-6]。为简便实用,工程上以水平分层处理复杂土壤结构,采用镜像法、拉普拉斯方法或其他数值计算方法可精确计算分层土壤中简单接地极的冲击接地电阻,但难以用于复杂接地装置的计算^[7]。采用有限元方法计算,能有效地模拟土壤电离不均匀性和放电通道随机性,但存在计算收敛问题^[8-9]。工程上用软件建模仿真更有利于接地系统冲击散流特性的优化降阻。因此,在建模仿真时不仅要考虑火花效应,还必须考虑土壤分层的影响^[10-11]。

本文首先通过拉普拉斯方法计算水平双层土壤中单位长度水平接地体、垂直接地体的等效电导参数;然后再按分段有损传输线的分布参数链式电路,建立双层土壤结构下接地装置的 ATP-Draw 仿真模型;最后对双层土壤中杆塔接地装置雷电冲击散流特性进行仿真。

1 双层土壤中接地体链式电路模型

根据接地装置形状和有损传输线分布参数等值电路原理,建立接地体分段均匀流散的 ATP-Draw 仿真模型^[12-14],如图 1 所示。接地体单位长度的电阻、电感、电容、电导分别为 R_0 、 L_0 、 G_0 、 C_0 。复杂土壤结构下,各层的土壤电阻率 ρ 不同,分布参数 G_0 也不同。双层土壤结构下与均匀土壤结构下的仿真模型区别就在于参数 G_0 不同。

1.1 双层土壤结构下水平接地体的电导参数

对于双层土壤,上层土壤电阻率为 ρ_1 、厚度为

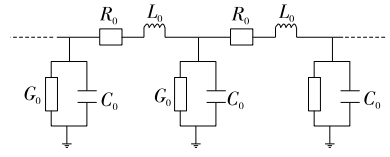


图 1 有损长线模型

Figure 1 Lossy long line model

s , 下层土壤电阻率为 ρ_2 。水平接地体长为 l , 半径为 r , 埋深为 h , 且有 $1 \gg 2h \gg 2r$, 若水平接地体在上层土壤中, 由镜像法求得水平接地电极的接地电阻为

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \left[(\ln \frac{l^2}{2hr} - 0.61) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ k^n \left[\ln \frac{l + \sqrt{l^2 + (2ns - 2h)^2}}{2ns - 2h} + \frac{2ns - 2h}{l} - \sqrt{1 + \left(\frac{2ns - 2h}{l} \right)^2} + 2 \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + (2ns)^2}}{2ns} + 2 \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + (2ns)^2}}{2ns} + 2 \frac{2ns}{l} - 2 \sqrt{1 + \left(\frac{2ns}{l} \right)^2} + \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + (2ns + 2h)^2}}{2ns + 2h} + \frac{2ns + 2h}{l} - \sqrt{1 + \left(\frac{2ns + 2h}{l} \right)^2} \right] \right\} \right] \quad (1)$$

式中 $k = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$; n 为镜像级数, 由 $R(n+1) - R(n) \leq 0.01 \Omega$ 确定^[7]。

通过 Matlab 编程计算出双层土壤下的水平接地体的 R , 再由 $R = 1/G_0 l$, 计算出接地装置水平导体的电导参数 G_0 ; 由 $C_0 = \epsilon \rho_d G_0$ 求得 C_0 。

1.2 双层土壤结构下垂直接地体的电导参数

1) 接地电极不穿入下层土壤。

由镜像法求出垂直接地体的电导参数为

$$G_0 = \frac{2\pi}{\rho_1 \left(\ln \frac{2l}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln \frac{2ns + l}{2ns - l} \right)} \quad (2)$$

2) 接地电极穿入下层土壤。

当接地电极穿入下层土壤时, 将电极分成为上层土壤和下层土壤两段分别进行计算。上、下层土壤中接地极的电导参数 G_{01} 、 G_{02} 分别由拉普拉斯方法求得:

$$G_{01} = \frac{2\pi}{\rho_1 \left(\ln \frac{2l}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln \frac{2ns + l}{2(n-1)s + l} \right)} \quad (3)$$

$$G_{02} = \frac{2\pi}{\rho_2 \left(\ln \frac{2l}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} k'' \ln \frac{2ns+l}{2(n-1)s+l} \right)} \quad (4)$$

单位长度的分布电容参数按 $C_0 = \epsilon \rho_d G_0$ 计算,其中 ρ_d 为接地体所在的土壤层电阻率。接地电阻由 $R = 1/[SG_{01} + (1-S)G_{02}]$ 计算。

设双层土壤中水平接地体长为 30 m、半径为 0.005 m、埋深 $h = 0.5$ m 的水平接地体,上层土壤 $\rho_1 = 100 \Omega \cdot \text{m}$,下层土壤 $\rho_2 = 1\,000 \Omega \cdot \text{m}$ 。当上层土壤厚度 $s = 10$ m 时,由式(1)计算其工频接地电阻值为 8.6Ω ;随着上层土壤厚度增大,下层土壤对接地体散流影响逐渐减弱,接地电阻变小,趋于单层土壤下的 6.1Ω 。

2 双层土壤中水平接地体冲击散流特性 ATP-Draw 仿真模型

由链式等效电路,建立双层土壤中水平接地体 ATP-Draw 仿真模型。单位长度电感按下式计算:

$$L_0 = \frac{u_0}{2\pi} (\ln \frac{2l}{r} - 1) \quad (5)$$

取水平接地体长 $l = 30$ m 半径为 $r = 0.005$ m,埋深 $h = 0.5$ m,上层土壤电阻率 $\rho_1 = 100 \Omega \cdot \text{m}$,厚度 $s = 10$ m,下层土壤电阻率 $\rho_2 = 1\,000 \Omega \cdot \text{m}$ 。利用式(1)计算得到其接地电阻为 8.62Ω 。

当雷电流幅值较大,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,产生强烈的火花放电,即火花效应^[15]。取土壤临界击穿场强为

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

土壤电离使接地体散流半径增大,接地极散流增强,冲击电流沿接地体不均匀流散^[16-17]。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

$$J_i = \frac{E_i}{\rho} \quad (7)$$

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 ,其散流密度 $J_i = \Delta I_i / (2\pi r_i \Delta l)$,则该段导体等效半径为

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

具体仿真步骤如下。

1)将水平接地体划为 n 等分,设定每段内接地体均匀散流。本案例接地体均分为 6 等分,每段长 5 m。将幅值 10 kA 的 $8/50 \mu\text{s}$ 雷电流从接地体一端注入。

2)先不考虑火花效应,计算每段电导、电容、电阻计电感参数 L_i, R_i, G_i, C_i 。本案例 $L_i = 0.008\,4 \text{ mH}$, $R_i = 0.25 \Omega$, $G_i = 0.019\,3 \text{ S}$, $C_i = 0.000\,154 \mu\text{F}$ 。

3)建立如图 2 所示的水平接地体雷电冲击 ATP-Draw 仿真模型,并运行。

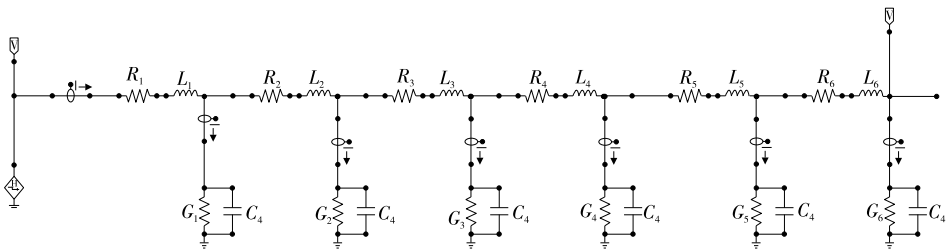


图 2 双层土壤结构下水平接地体的冲击散流特性 ATP 仿真模型

Figure 2 ATP simulation model of impulse current dispersing characteristics of horizontal grounding body under double-layer soil structure

运行结果各段散流如图 3 所示。电压波形最大值为 111.8 kV ,电流波形最大值为 10 kA ,冲击接地电阻为 11.18Ω ,冲击系数 1.29,表明接地体末端没有得到充分利用,电感效应明显。

4)考虑火花效应如图 4 所示,由各段散流 ΔI_i 、土壤临界击穿场强 E_c ,根据式(8)求得各段的等效半径 r_i ;再按式(1)计算各段的电导、电容参数代替模型中原来的参数 G_i, C_i ,如表 1 所示。

5)又一次运行并计算各段导体的 ΔI_i 。重复上述步骤,当相邻 2 次运行结果基本不再变化时,仿真模型即充分考虑了火花效应。

案例最终运行结果如表 2 所示,此时注入端的等效半径达到了 14 cm ,冲击接地电阻 $R_{ch} = U_m / I_m = 6.91 \Omega$,火花效应降低了冲击接地电阻,冲击系数为 $\beta = R_i / R_g = 6.91 / 8.62 = 0.8$ 。

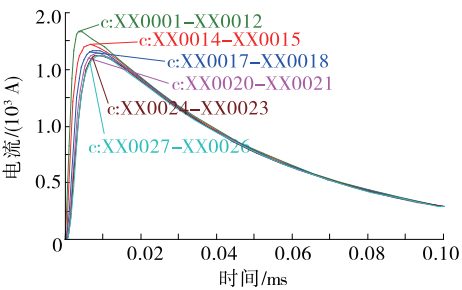


图 3 未考虑火花效应时的各段流散电流波形

Figure 3 Waveforms of current in each section without considering the spark effect

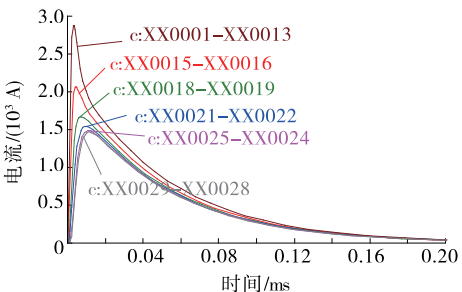


图 4 考虑火花效应后各段接地体的入地电流

Figure 4 The grounding current of each grounding body segment considering the spark effect

表 1 第 1 次仿真运行所得参数

Table 1 Parameters obtained from the first simulation run				
各段接地体	$\Delta I_i/\text{A}$	r_i/m	G_i/S	$C_i/\mu\text{F}$
1	1 864	0.009 15	0.038 6	0.000 307
2	1 715	0.008 42	0.038 2	0.000 304
3	1 670	0.008 20	0.038 1	0.000 303
4	1 643	0.008 06	0.037 9	0.000 302
5	1 626	0.007 97	0.037 9	0.000 302
6	1 618	0.007 94	0.037 9	0.000 301

表 2 第 4 次仿真运行所得参数

Table 2 Parameters obtained from the fourth simulation				
各段接地体	$\Delta I_i/\text{A}$	r_i/m	$C_i/\mu\text{F}$	G_i/S
1	2 878	0.141 0	0.000 461	0.057 9
2	2 065	0.101 0	0.000 435	0.054 6
3	1 674	0.081 8	0.000 421	0.052 9
4	1 545	0.075 6	0.000 417	0.052 2
5	1 487	0.072 7	0.000 413	0.051 9
6	1 466	0.071 7	0.000 412	0.051 8

3 双层土壤中垂直接地体雷电冲击散流特性仿真模型

对于双层土壤结构中的垂直接地体,同样采用链式分布参数电路建立 ATP-Draw 仿真模型,同样考虑火花效应^[18-21]。将垂直接地体分为 n 段,并设定每段内接地体向土壤均匀散流,由式(2)~(4),分别计算不同土壤层中模型的电导、电感等参数。

在先不考虑火花效应情况下,计算各段散流大小;再考虑火花效应,由土壤临界击穿场强及垂直接地体各段散流大小,计算各段接地体的等效半径,重新确定各段接地体的参数;运行仿真电路,测取各段散流大小。重复该步骤,直至前后 2 次运行结果基本不变,即为最终仿真结果。

3.1 均匀土壤中预制钢筒基础桩冲击散流 ATP-Draw 仿真

预制钢筒基础桩长 10 m,直径 1.4 m,壁厚 3 cm,筒内有回填土,底部有 3 根长为 3 m、半径为 2 cm 的锚栓。土壤电阻率 $\rho=2\,000\,\Omega\cdot\text{m}$ 。

将钢筒桩分为 2 段,每段 5 m,考虑其直径较大,在雷电流幅值为 10 kA 时,钢筒桩周边土壤不会发生电离,计算得到各段参数为 $L_1=0.002\,35\,\text{mH}$, $C_1=0.001\,07\,\mu\text{F}$, $G_1=1/150\,\text{S}$, $R_1=0.05\,\Omega$,底部的锚栓的参数为 $L_3=0.002\,82\,\text{mH}$, $C_3=0.000\,318\,\mu\text{F}$, $G_3=1/500\,\text{S}$, $R_3=0.15\,\Omega$ 。

建立仿真模型如图 5 所示,在埋深 0.8 m 处加装半径为 0.005 m 的水平接地体 50 m,考虑水平接地体的火花效应,仿真计算钢筒桩冲击接地电阻,得到仿真结果:不加装水平射线,钢筒桩冲击接地电阻为 51.8 Ω ;加装水平射线后,钢筒桩冲击接地电阻降为 23 Ω 。

3.2 双层土壤中预制钢筒基础桩冲击散流特性仿真

土壤结构为水平分层,上层土壤电阻率 $\rho_1=100\,\Omega\cdot\text{m}$,厚度 $s=5\,\text{m}$,下层土壤电阻率 $\rho_2=2\,000\,\Omega\cdot\text{m}$ 。预制钢筒桩基础的钢筒长, $l=10\,\text{m}$,半径 $r=0.7\,\text{m}$,底部锚栓长度 $l=3\,\text{m}$,半径 $r=0.02\,\text{m}$ 。

按式(3)、(4)分别计算下层土壤中钢筒的电路模型参数,锚栓的电导参数按式(4)计算。

仿真模型及各段电路参数如图 6 所示,仿真结果首端电压电流波形如图 7 所示,冲击接地电阻为 15.5 Ω ,与 CDEGS 软件计算结果一致。

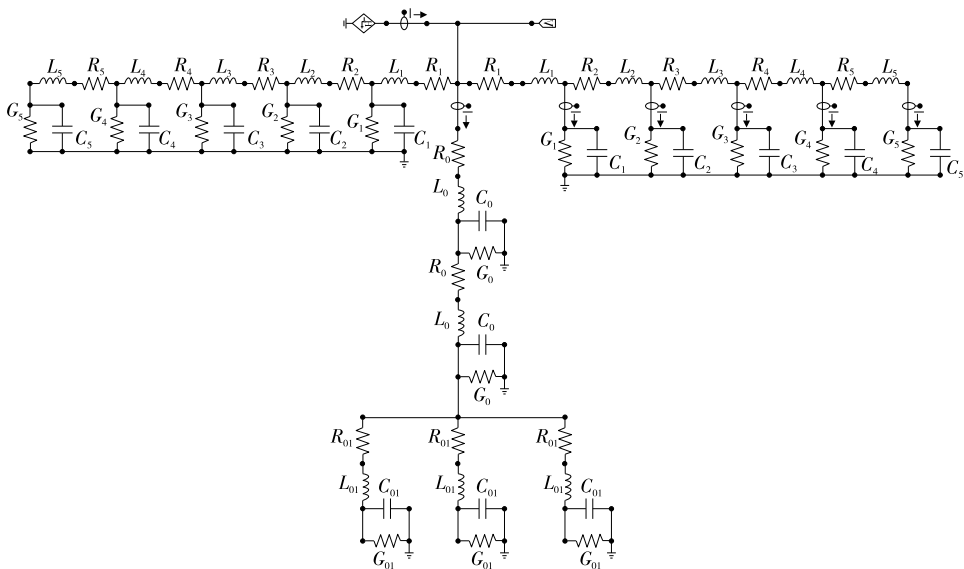


图 5 预制钢筒基础接地系统冲击散流仿真模型

Figure 5 Simulation model of impulse current dispersing of prefabricated steel cylinder grounding system

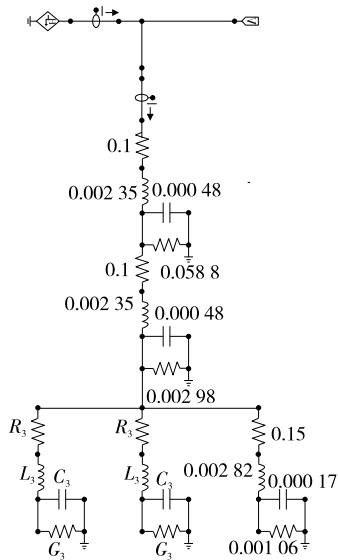


图 6 ATP 仿真模型

Figure 6 ATP simulation model

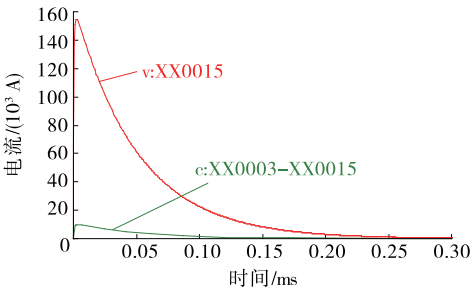


图 7 仿真结果

Figure 7 Simulation results

4 结语

1)研究了在双层土壤条件下接地体链式电路的数学模型,利用镜像法或拉普拉斯方法,通过 Matlab 仿真软件,计算在双层土壤中水平接地体和垂直接地体的电导与电容参数,得到了在双层土壤中水平接地体的接地电阻随着上层土壤厚度增加逐渐趋于单层土壤下的值。

2)提出了在双层土壤条件下考虑火花放电效应以及电感效应的接地体等效半径计算方法,以单根水平接地体,垂直接地体以及预制钢筒基础桩为例,建立了在双层土壤中冲击散流特性的 ATP-Draw 仿真模型,通过仿真计算验证了该方法的可行性。

3)仿真结果与 CDEGS 仿真软件仿真分析结果比较,表明采用土壤结构为水平分层的双层土壤模型,通过镜像法或拉普拉斯法,求解水平接地体、垂直接地体预制钢筒基础的冲击接地电阻,能够既较准确得到适合实际的计算结果,而又不会使计算原理和过程太过于复杂。

参考文献:

[1] 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]. Transactions of Electrotechnical society, 2020, 35(10): 2239-2247.
- [2] 高晓晶,胡元潮,周鑫,等.考虑火花放电效应的典型接地材料冲击特性研究[J].电瓷避雷器,2020(1):7-15.
- GAO Xiaojing, HU Yuanchao, ZHOU Li, et al. Study on the impact characteristics of the typical grounding material with spark discharge effect[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(1):7-15.
- [3] 洪书文,潘子仁,李悦,等.不同形状输电杆塔接地装置的研究[J].电瓷避雷器,2020(1):118-122.
- HONG Shuwen, PAN Ziren, LI Yue, et al. Research on different shapes of grounding devices for transmission towers[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(1):118-122.
- [4] 彭永晶,陆佳政,方针,等.10 kV 配电线路杆塔接地电阻对耐雷水平影响研究[J].电瓷避雷器,2019(4):176-181.
- PENG Yongjing, LU Jiazhen, FANG Zhen, et al. Study on the effects of grounding resistance of the tower for 10 kV distribution lines on lightning withstand level[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(4):176-181.
- [5] 王涛,胡显哲,萧威,等.考虑火花效应的杆塔接地体冲击特性仿真研究[J].电瓷避雷器,2019(4):29-34+43.
- WANG Tao, HU Xianzhe, XIAO Wei, et al. Simulation research on impulse characteristics of tower grounding bodies considering spark effect[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(4):29-34+43.
- [6] 朱鹏,夏向阳,李明德,等.基于能量比值分析的直流输电线路故障判别[J].中国电力,2020,53(8):85-90+99.
- ZHU Peng, XIA Xiangyang, LI Mingde, et al. Fault identification of DC transmission lines based on energy ratio analysis[J]. Electric Power, 2020, 53(8):85-90+99.
- [7] 解广润.电力系统接地技术[M].武汉:水利电力出版社,1991:47-53.
- [8] 朱时阳,袁涛,朱彬.分层土壤中接地装置冲击散流特性的有限元分析模型[J].电网技术,2014,38(8):2304-2309.
- ZHU Shiyang, YUAN Tao, ZHU Bin. Finite element model of impulse dispersing characteristics of grounding equipment in layered soil[J]. Power System Technology, 2014, 38(8):2304-2309.
- [9] 苏萌萌.接地装置的冲击特性及其改善措施[D].北京:北京交通大学,2019.
- [10] 杨潇,黄佳瑞,杨帅,等.典型杆塔接地体冲击特性模拟试验研究[J].武汉大学学报(工学版),2018,51(5):426-431.
- YANG Xiao, HUANG Jiarui, YANG Shuai, et al. Impulse grounding characteristics of typical towers based on simulation experiment[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(5):426-431.
- [11] 谭波,董晓辉,刘鸣亚,等.考虑土壤电阻率分布各向异性的高压直接地极均流电阻配置方法及试验验证[J].高压电器,2021,57(5):144-150.
- TAN Bo, DONG Xiaohui, LIU Mingya, et al. Configuration method and experimental verification of current-sharing resistance of HVDC grounding pole considering the anisotropy of soil resistivity distribution[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5):144-150.
- [12] 李光杰,胡元潮,李勋,等.基于柔性石墨接地体的塔基外敷降阻研究[J].智慧电力,2020,48(8):116-122.
- LI Guangjie, HU Yuanchao, LI Xun, et al. Tower foundation resistance reduction by external application based on flexible graphite grounding body[J]. Smart Power, 2020, 48(8):116-122.
- [13] 漆恩怡,赵洪峰.线路杆塔的放射形接地体防雷特性优化与设计[J].电网与清洁能源,2022,38(1):1-6.
- QI Siyi, ZHAO Hongfeng. Optimization and design of protection characteristics for radial grounding conductors of line towers[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1):1-6.
- [14] 王思捷,黄松,赵海龙.基于 ATP-EMTP 的杆塔接地装置冲击接地电阻仿真研究[J].计算机与数字工程,2020,48(5):1258-1263.
- WANG Sijie, HUANG Song, ZHAO Hailong. Simulation study on impulse grounding resistance of tower grounding device based on ATP-EMTP[J]. Computer & Digital Engineering, 2020, 48(5):1258-1263.
- [15] 齐飞,陈俊武,刘承胜,等.基于增强火花效应的集中接地装置冲击降阻试验研究[J].高压电器,2015,51(7):160-165.
- QI Fei, CHEN Junwu, LIU Chengsheng, et al. Experimental study on grounding resistance reduction by rai-

- sing impulse current leakage efficiency of concentrated grounding device[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7):160-165.
- [16] 袁涛,李彤鑫,司马文霞,等.冲击电流作用下土壤放电影像特征的分析[J].中国电机工程学报,2018,38(17):5266-5274+5324.
- YUAN Tao, LI Tongxin, SIMA Wenxia, et al. Analysis of soil discharge image characteristics under impulse currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17):5266-5274+5324.
- [17] 鲁海亮,冯志强,文习山,等.考虑土壤火花放电的接地装置暂态特性全时域电网络模型[J].中国电机工程学报,2017,37(23):7058-7065+7098.
- LU Hailiang, FENG Zhiqiang, WEN Xishan, et al. Full-time electrical network model of the transient characteristics of the grounding devices considering soil sparkover [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23):7058-7065+7098.
- [18] 吴田,曹志博,方玉群,等.基于最大信息系数的同塔双回输电线路感应电影响因素敏感性分析[J].电测与仪表,2021,58(7):74-80.
- WU Tian, CAO Zhibo, FANG Yuqun, et al. Sensitivity analysis of influencing factors of induced electricity based on MIC in double-circuit transmission line[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(7):74-80.
- [19] 齐祥和.输电线路杆塔雷电特性及接地装置降阻效果研究[D].北京:华北电力大学,2016.
- [20] 吴志祥,周凯,何珉.高压电缆交叉互联系统的 3 种优化接地方案[J].电力科学与技术学报,2020,35(3):135-140.
- WU Zhixiang, ZHOU Kai, HE Min. Research on three optimized grounding schemes of HV cable cross connection system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3):135-140.
- [21] 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.
-
- (上接第 180 页 Continued from page 180)
- [13] 刘清源,刘瑞佳,王健,等.基于边缘计算的泛在电力物联网群组密钥管理算法研究[J].电测与仪表,2022,59(7):48-56.
- LIU Qingyuan, LIU Ruijia, WANG Jian, et al. Research on group key management algorithm of ubiquitous power internet of things based on edge computing[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(7):48-56.
- [14] 吴汪兵,周强,龚行梁,等.容器技术在电力二次设备中的应用研究[J].工业控制计算机,2021,34(2):94-95+98.
- WU Wangbing, ZHOU Qiang, GONG Xingliang, et al. Application research of container technology in power secondary equipment[J]. Industrial Control Computer, 2021, 34(2):94-95+98.
- [15] 李兵.微服务在电力设备温度在线监测系统中的应用[J].工业控制计算机,2019,32(7):118-119+122.
- LI Bing. Microclotthing in on-line monitoring system of power equipment temperature [J]. Industrial Control Computer, 2019, 32(7):118-119+122.
- [16] 岑伯维,蔡泽祥,武志刚,等.电力物联网边缘计算终端的微服务建模与计算资源配置方法[J].电力系统自动化,2022,46(5):78-86.
- CEN Bowei, CAI Zexiang, WU Zhigang, et al. Microservice modeling and computing resource configuration method for edge computing terminal in electric Internet of Things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(5):78-86.
- [17] 岑伯维,蔡泽祥,胡凯强,等.电力物联网边缘计算终端业务时序逻辑与计算负荷建模方法[J].电力系统自动化,2021,45(9):107-114.
- CEN Bowei, CAI Zexiang, HU Kaiqiang, et al. Modeling method for business sequential logic and workload of edge computing terminal in electric Internet of Things [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9):107-114.