

DOI: 10.7652/xjtuxb201704008

雷电流对杆塔接地装置冲击特性 影响规律的研究

成林¹, 孔志战², 王森¹, 李志忠¹, 张波³, 刘凌⁴

(1. 国家电网陕西省电力公司电力科学研究院, 710054, 西安; 2. 国家电网陕西省电力公司, 710048, 西安;
3. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 100084, 北京; 4. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对由于雷击输电线路或杆塔所致的电力系统线路跳闸率较高的现象,建立了一种不同幅值雷电流作用下杆塔接地装置冲击系数模型,以用于雷电流对杆塔接地电阻影响的评估计算,提高冲击接地电阻的测量准确度。搭建了土壤火花放电 X 光拍摄平台,在不同雷电流作用下,得到土壤火花放电具有斑点状-球状-流注状-电弧通道的渐变过程规律,通过不同大小雷电流现场试验,得出不同冲击电流下电感效应对电流阻挡作用及火花效应的散流作用相互制衡关系,进一步通过电感效应与火花效应解耦的方法得到较准确的接地装置冲击电阻。试验结果表明,所建模型实现了通过小雷电流冲击测试得到大雷电流作用下接地装置冲击特性的目的,并可通过小型便携式冲击接地阻抗测试仪,对杆塔冲击接地阻抗进行测试,所计算阻抗与实际阻抗的误差在 3% 以内,可对输电线路防雷设计、评估、施工、改造等起到指导作用。

关键词: 雷电流;杆塔接地装置;X 光拍摄平台;火花放电;火花系数;电感系数

中图分类号: TM864 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)04-0053-06

Influence of Lightning Current on Impulse Characteristic of Ground Device of Pole and Tower

CHENG Lin¹, KONG Zhizhan², WANG Sen¹, LI Zhizhong¹, ZHANG Bo³, LIU Ling⁴

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China; 2. State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710048, China; 3. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
4. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: According to the phenomenon that higher line trip rate of power system is often caused by lightning strike, an impact coefficient model of ground device of pole and tower for different lightning current amplitude is established to evaluate the impact of lightning current on grounding resistance of the pole and tower, and improve impulse grounding resistance measurement accuracy. X-ray photograph platform is constructed to get the gradual change law of spark discharge in soil along spot-sphere-streamer-arc channel under lightning current. Via field test under different lightning current, the interaction of the effect of inductance effect on the current blocking action and the effect of the spark effect on flow are revealed. The impact resistance of the grounding device is obtained by decoupling the inductive effect and the spark effect. Experiment results show that with the proposed model the impulse characteristic of the ground device under large lightning current can be obtained via measurement under small lightning

收稿日期: 2016-10-08。 作者简介: 成林(1979—),男,博士,高级工程师;刘凌(通信作者),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家电网公司科技资助项目(5226SX15001Q);国家自然科学基金资助项目(51307130)。

网络出版时间: 2016-12-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161230.1736.010.html>

current. Hence, portable ground impedance tester can be adopted to measure impulse ground impedance, and the error between the calculated impedance and the actual one is less than 3%.

Keywords: lightning current; ground device of pole and tower; X-ray photograph platform; spark discharge; spark coefficient; inductance coefficient

目前,采用特定值的集中参数电阻来模拟接地装置进行输电线路防雷分析、测量的方法,是造成防雷分析结果与实际运行统计数据相差较大的主要原因之一^[1-2]。准确建立接地装置动态冲击特性参数模型,并准确测量线路接地装置冲击接地电阻是接地性能分析、设计及输电线路防雷的基础^[3-5]。

雷击杆塔引起的跳闸事故,是由接地装置电感效应和四周土壤火花放电效应综合作用的结果^[6-8]。高频雷电流通过接地装置的电感效应是符合电学规律、相对可预测的过程,而土壤火花放电效应是一个高频的、时变的、非常复杂的物理过程,由于测试手段的限制,目前它的过程模型仍不很清楚^[9-11]。

另外,随着电力电子技术的快速发展,目前应用于杆塔接地装置冲击电阻测试的小型便携式冲击阻抗测试仪呼之欲出^[12-13],但是用几百至几千安的小雷电流冲击测试得到的接地装置冲击阻抗与实际雷击过程几万甚至几十万安的大雷电流作用的冲击阻抗之间的等效关系仍然没有确切的模型,因为不同幅值雷电流在土壤中产生的火花放电过程还没有得到准确的规律,因此便携式冲击阻抗测试仪的测量结果还需进一步研究,这就大大限制了其推广和应用。

本文利用不同幅值雷电流冲击过程的模型,基于X光拍摄的土壤火花放电规律、火花效应和电感效应相互制衡规律、大小雷电流测试接地装置冲击阻抗的等效转换关系,研究不同雷电流对杆塔接地装置冲击特性的影响规律,为便携式冲击阻抗测试仪的应用提供了理论依据。

1 雷电流冲击系数模型

1.1 雷电流作用下接地火花放电计算模型

雷电流冲击下接地装置周围的土壤中是否发生火花放电,可以通过接地体散流时土壤中的场强是否超过临界击穿场强来判定,但火花放电范围非常复杂,用计算机仿真对火花放电建模,并进行接地装置冲击特性的仿真是一个难题^[14]。

火花放电区域的土壤电阻率远小于无火花的区域,可假设这一区域土壤电阻率很小,等效于接地导体的电阻率,因此相当于接地体或电极尺寸的增大。

另外,考虑到火花放电区域相对比较规则,可将火花放电区域认为是以导体轴心为中心的同轴圆锥体,端点处是半球状的放电区域,如图1所示。

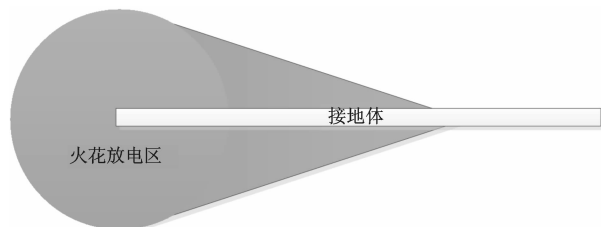


图1 接地导体周围的火花放电区域

将接地导体分段后,可把每一段导体的火花放电区域等效为圆柱,在导体分段足够小时,整个导体上的火花放电区域便近似于圆锥。每个导体段圆柱的边界可以由下式求得

$$\frac{E_c}{\rho} = J = \frac{I}{2\pi r^{eq} L} \quad (1)$$

$$r^{eq} = \frac{I\rho}{2\pi L E_c} \quad (2)$$

如果是导体端点,则半球的半径是

$$\frac{E_c}{\rho} = J = \frac{I}{2\pi (r^{eq})^2} \quad (3)$$

$$r^{eq} = \left(\frac{I\rho}{2\pi E_c} \right)^{1/2} \quad (4)$$

式中: E_c 是土壤的临界击穿场强; ρ 为土壤电阻率; J 为该导体的流散密度; r^{eq} 为导体周围火花放电区域边界的半径; L 为导体段的长度; I 为导体或者端点的泄露电流。

当火花放电时,虽然导体等效半径扩大,但轴向电流仍是在金属导体内流动,而不是在火花放电区域的土壤中流动,因为即使考虑导体的趋肤效应,金属导体电阻率仍远小于电离土壤的电阻率,轴向电流仍在金属导体内流动,而火花放电区域只有径向的泄露电流。所以,计算导体轴向电阻、自感和互感时,可按金属导体的半径来建模,实现准确预测。

1.2 不同幅值雷电流作用下接地装置冲击特性

考虑火花放电效应和电感效应的情况下,对不同幅值雷电流作用下接地装置冲击系数进行仿真。计算中土壤电阻率取为 $100 \Omega \cdot \text{m}$; 15 m 正方形塔基, 4 根 15 m 放射状水平射线, 埋于地下 0.8 m; 导

体材质为圆钢,半径均为 0.01 m,改变雷电流幅值,得出接地装置冲击系数随电流幅值变化的拟合曲线,如图 2 所示。该模型可用于雷电流对杆塔接地电阻影响评估计算,提高冲击接地电阻测量的准确度。

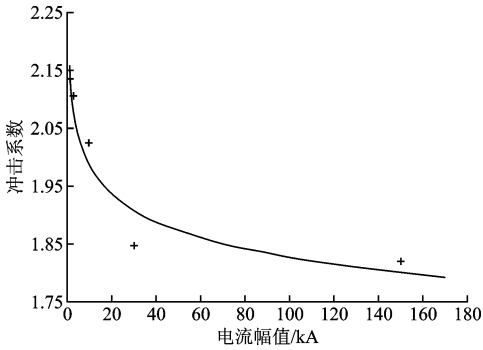


图 2 接地装置冲击系数随电流幅值变化的拟合曲线

图 2 中,冲击系数与电流幅值之间的关系比较符合幂函数,使用公式 $\alpha=bI-c$ 进行拟合,得出 $b=2.159\ 4, c=0.036\ 3$,所以 $\alpha=2.159\ 4I-0.036\ 3$ 。

2 平台建立及试验研究

由于接地装置电感效应可通过专业软件较准确地建模计算,因此本文主要对不同雷电流作用下土壤火花放电效应进行研究。

2.1 火花放电 X 光拍摄试验平台的搭建

为研究不同大小雷电流火花放电现象,研制了土壤火花放电 X 光拍摄平台,如图 3 所示。

该平台底部使用 4 个聚四氟滚轮,底盘使用钢架结构,上部试验腔为使用有机玻璃制成的长方形槽体,内部按实际情况填入土壤,试验平台外部整体由全遮光的塑料布帘包裹,并在外部使用胶带将边角勒紧密封。试验电极采用棒-板电极的方式,负极板埋入土中,竖直紧靠槽体内壁,接地导体垂直极板水平埋入土中。试验前,在暗室将接地导体和 X 光胶片按照预定方式埋入土壤中,使用遮光布密封好后,推至试验大厅进行火花放电拍摄试验。试验后,将试验槽再推入暗室,将 X 光胶片取出,在红光环境冲洗照片,得到火花放电通道的 X 光显影照片。

2.2 不同幅值雷电流作用下接地装置火花放电试验

图 4 所示为接地棒体、X 光胶片及负极板的相对位置,其中棒电极使用直径为 3 cm 的铜棒,板电极使用厚度为 0.2 cm、长度为 43.5 cm、宽度为 21 cm 的铜板电极,胶片使用医用 X 光感光胶片。棒电极沿垂直板电极方向埋设,长 50 cm、埋深 11 cm,棒体与槽体下部距离 17 cm,棒电极端部距板电极



(a)平台整体图 (b)平台内部图
图 3 土壤火花放电 X 光拍摄平台

中心 20 cm。胶片与棒体轴向平行埋设,之间距离为 5 cm,试验中胶片数量和位置根据冲击电流幅值作调整,因为小电流情况,火花放电范围小,只需在棒电极端部埋设 1 个胶片;大电流情况,火花放电范围大,需在棒电极端部埋设 3 个胶片。试验中的土壤电阻率为 $1\ 492\ \Omega\cdot m$,冲击雷电流波形设置为 $8/20\ \mu s$ 。试验中的大雷电流使用 100 kA 雷电流发生器,小电流使用 1 kA 便携式雷电流发生器。

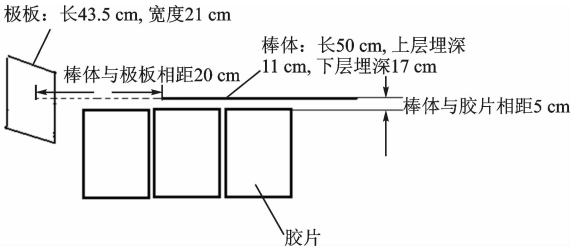
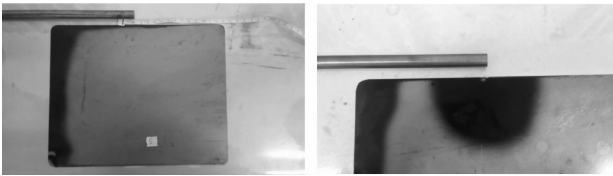
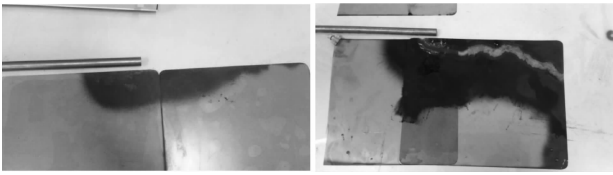


图 4 接地棒体、X 光胶片及极板的相对位置

图 5 为通过 X 光胶片拍摄到的不同幅值雷电流作用下土壤中火花放电通道。其中,图 5a 为雷电流在 1 kA 时,靠近电极端部土壤中出现斑点状微凸起的火花放电,胶片左侧曝光部分为洗胶片时操作失误曝光;图 5b 为雷电流在 8 kA 时,在电极端部周围出现圆形火花放电区,火花放电以电极端部



(a)1 kA (b)8 kA



(c)10 kA (d)16 kA

图 5 不同幅值雷电流作用下土壤火花放电通道

为中心向四周扩散;图 5c 为雷电流在 10 kA 时,火花放电通道从棒电极端部以流注状向负极板延伸;图 5d 为雷电流在 16 kA 时,棒电极与板电极之间间隙被击穿,形成电弧放电通道。从图中可见,由于电弧能量大,胶片电弧通道部分被烧焦。

由试验可得,不同幅值雷电流作用下,土壤中的火花放电具有斑点状-球状-流注状-电弧通道的过程规律,与图 1 模型一致。因此,可通过建立模型,建立起小雷电流与大雷电流作用下火花放电效应之间的等效关系。

2.3 雷电流接地试验研究

试验场地选在新疆吐鲁番,试验原理如图 6 所示。冲击电源选用 30 kA 冲击电流发生器,中间虚线部分为埋设的“十”字形接地装置,如图 7 所示。该接地装置材质为扁钢,射线长度为 30 m,埋设在 0.6 m 的地下,连接冲击电源正极。沿着接地装置外边沿向外 5 m 处均匀打下回流电流极,所有回流极由扁铜裸线连接,接至电源负极。由于土壤中雷电冲击火花放电随距离减小较快,根据经验,试验中选择距离回流极 10 m 以外的点设置参考电极,作为电压参考点。试验电压波形是由分压器降压后,由示波器采集;电流波形直接由套在冲击电源负极端的罗氏线圈采集,并由示波器显示。

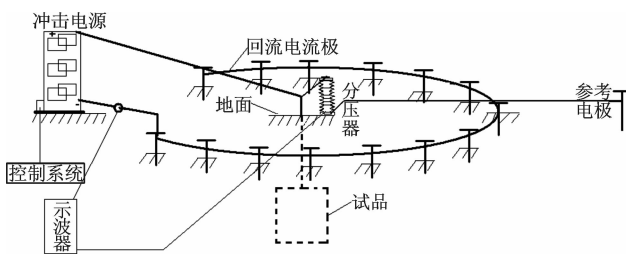


图 6 雷电流接地试验原理

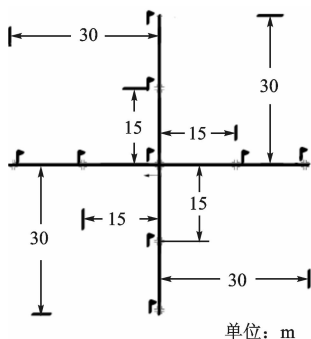


图 7 接地棒体、X 光胶片及极板的相对位置

试验中,极间距 1 m 时的土壤电阻率为 $6\ 033\ \Omega \cdot \text{m}$,平均土壤电阻率为 $1\ 523\ \Omega \cdot \text{m}$,试验测量得到的工频接地电阻为 $28.3\ \Omega$ 。冲击电流峰值与冲

击系数之间的试验曲线如图 8 所示。

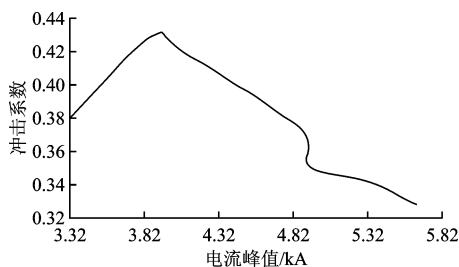


图 8 冲击电流峰值与冲击系数之间的试验曲线

从图 8 中可以看出,随着冲击电流峰值的增加,冲击系数先有一个升高的过程,在 3.9 kA 时形成拐点,然后再逐渐减小。该现象说明冲击电流在 3.9 kA 之前,接地装置的电感效应对电流的阻碍作用大于火花放电效应形成通道对电流的导通作用,从而使冲击系数逐渐增大。在拐点之后,接地装置四周土壤中火花放电现象逐渐增强,土壤中火花放电通道大量增多,火花放电散流的作用大于接地装置自身的电感感抗作用,因此冲击系数又逐渐减小。

对比图 8 与图 2,图 2 中冲击系数随冲击电流幅值的增加呈指数方式递减,这是由于图 2 仿真中电流为 0~100 kA,范围较大,幅值远超出电感效应的作用区间。随着冲击电流的持续增大,从图 5c、图 5d 可以看出,火花放电愈加剧烈,散流作用越来越强,火花效应远大于电感效应的作用,因此冲击系数随雷电流增加逐渐减小。

3 雷电流接地装置冲击特性参数等效转换关系

3.1 冲击系数解耦

在实际现场测量中,工频接地电阻易于测量,因此现有的接地装置冲击接地电阻主要是通过冲击系数校正得到^[15-17]。交流电气装置的接地规程^[18]中的冲击系数是通过在沙池的模拟试验中得到的,即通过将实际的接地装置按照一定比例缩小做成模型,施加冲击雷电流,通过测量电流和电压波形来研究接地装置的冲击特性规律。沙池测得冲击系数的方法能够有效模拟火花效应,但是对与接地装置尺寸相关的电感效应没办法模拟,这正是实测过程中冲击电阻误差的根本来源。

因此,可将电感效应与火花效应进行解耦,用下式来表示冲击接地电阻与工频接地电阻的关系

$$R_1 = K_1 K_2 R_2 \quad (5)$$

$$R_1 = K_1 R_3 \quad (6)$$

式中: K_1 和 K_2 分别表示火花校正系数与电感校正

系数; R_1 和 R_2 分别表示大电流下冲击接地电阻与工频接地电阻; $R_3 = K_2 R_2$ 表示小电流下的接地装置冲击电阻值。

因此,不同大小雷电流作用下接地装置冲击电阻转换关系可通过电感效应和火花效应解耦的方法得到,即通过CDEGS等专业软件按照雷电流参数及接地装置大小、形状和材质等参数进行仿真计算,得到接地装置的电感校正系数;配合规程公式或实验室模拟试验得到火花校正系数,代入式(5),得到相对准确的冲击大电流作用下接地装置的冲击电阻值。另外,改变仿真参数和规程中参数,并进行比较,即可得到不同大小雷电流作用下的接地装置冲击电阻转换关系。

3.2 试验验证

选用如图7所示的接地装置,试验中注入4.02 kA、8/20 μ s波形雷电流,实测得该雷电流下的冲击接地电阻为11.993 5 Ω 。

根据规程,注入电流幅值为4.02 kA,射线总长为120 m,土壤电阻率为6 033 $\Omega \cdot \text{m}$,推荐采用规程公式 $\alpha = 1.16\rho^{-0.4} (7.1 + L^{1/2}) [0.78 - \exp(-2.3I_i^{-0.2})]$ 计算火花校正系数,计算得到的火花校正系数 K_1 为0.387 4。

在CDEGS软件中设置接地装置模型及土壤电阻率参数,对该接地装置在此土壤条件下的电感校正系数进行计算。计算时,电流波头参数按实际测量的数据设为8 μ s,计算得到的冲击接地电阻为30 Ω ,故电感校正系数为

$$K_2 = 30/28.3 = 1.06 \quad (7)$$

利用式(5)可计算出冲击接地电阻 $R_c = K_1 K_2 R_g = 0.387 4 \times 1.06 \times 28.3 \Omega = 11.62 \Omega$,与实际冲击接地电阻误差为3%。这证明了通过电感效应与火花效应解耦的方法可得到较准确的接地装置冲击阻抗,并可将该阻抗应用于计算不同大小雷电流作用下的接地装置冲击电阻转换中。

3.3 现场作业方法的改进

目前,输电线路杆塔接地效果的测试只靠工频接地电阻的测量结果和冲击系数反映是不完整的,还需要考虑接地装置的电感系数。因此,建议在线路防雷评估过程,对雷电故障较少的线路首先使用专业接地软件对接地装置的电感系数进行计算,再用电感系数乘以按照现有规程方式测量、计算得到的冲击电阻,得到改进后冲击电阻。对于多雷区线路,或接地装置存在缺陷、严重腐蚀的情况,建议先根据现场接地装置实际情况计算得到电感系数,再

使用便携式冲击电流发生器进行包含火花系数的冲击电阻实际测试,两者相乘即得到较为准确的杆塔冲击接地电阻。

4 结 论

本文通过建模和试验,研究了大小雷电流冲击作用下接地装置火花放电效应和电感效应规律,得到以下结论。

(1)建立了不同幅值雷电流作用下接地装置冲击系数模型,可用于雷电流对杆塔接地电阻影响评估计算,提高冲击接地电阻的测量准确度。

(2)研制了X光拍摄接地装置四周土壤火花放电测试平台,并通过试验得到不同雷电流作用下,接地装置四周土壤火花放电按照雷电流大小具有斑点状-球状-流注状-电弧通道的过程规律。

(3)进行了不同雷电流现场试验,得出接地装置冲击系数在小冲击电流作用下,电感效应对电流的阻挡作用较火花效应的散流作用大;在大冲击电流作用下,火花效应的散流作用远大于电感效应的阻挡作用。

(4)通过理论和试验验证了由电感效应与火花效应解耦的方法可得到较准确的接地装置冲击电阻,并可应用于不同雷电流作用下的接地装置冲击电阻转换计算,还提出了实际现场作业线路杆塔冲击电阻测试的方法。

参考文献:

- [1] 何金良,曾嵘. 电力系统接地技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 16-25.
- [2] 张颖,高亚栋,杜斌,等. 输电线路防雷计算中的新杆塔模型 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(4): 365-368.
ZHANG Yin, GAO Yadong, DU Bin, et al. New tower model in calculation of lightning protection on transmission line [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(4): 365-368.
- [3] MELIPOULOS A P, MOHARAM M G. Transient analysis of grounding systems [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(2): 389-399.
- [4] SHARMA C. Modeling of an island grid [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 971-978.
- [5] 夏长征,陈慈萱. 伸长接地体上冲击电流和电压分布特性的研究 [J]. 高电压技术, 2002, 28(5): 24-25.
XIA Changzheng, CHEN Cixuan. The research for impulse current and voltage distribution of extended

- grounding electrode [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(5): 24-25.
- [6] MAZZETTI CARLO, VECA GIUSEPPE M. Impulse behavior of ground electrodes [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983(9): 3148-3156.
- [7] 邓长征, 周文俊, 魏绍东, 等. 电感效应与火花效应对接地体及其周围土壤雷电冲击特性的影响分析 [J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 56-62.
DENG Changzheng, ZHOU Wenjun, WEI Shaodong, et al. Influence analysis of inductance effect and spark effect on lightning impulse characteristics of grounding conductors and its ambient soil [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 56-62.
- [8] 索南加乐, 薛晓辉, 高峰, 等. 小电流接地系统单相接地故障选线的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(4): 471-475.
SUONAN Jiale, XUE Xiaohui, GAO Feng, et al. Fault line selection in non-solid earthed network [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(4): 471-475.
- [9] PAPALEXOPOULOS A D, MELIOPOULOS A P. Frequency dependent characteristics of grounding system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(4): 1073-1081.
- [10] GRCEV L D. Computer analysis of transient voltages in large grounding systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 815-823.
- [11] NEKHOUL B, GUERIN C, LABIE P, et al. A finite element method for calculating the electromagnetic fields generated by substation grounding systems [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(3): 2150-2153.
- [12] GERI A, VECA G M, GARBAGNATI E, et al. Non-linear behaviour of ground electrodes under lightning surge currents: computer modelling and comparison with experimental results [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28(2): 1442-1445.
- [13] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠. 中性点非直接接地电网单相接地故障暂态特征分析 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(2): 195-199.
XUE Yongduan, FENG Zuren, XU Bingyin. Analysis of transient characteristics of signals phase earth fault in non-solidly earthed network [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(2): 195-199.
- [14] 孙晋茹, 姚学玲, 许雯璐, 等. 非破坏雷电流 A 分量作用下碳纤维复合材料的动态特性 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(6): 35-41.
SUN Jinru, YAO Xueling, XU Wenjun, et al. Dynamic characteristics of carbon fiber reinforced polymer under non-destructive lightning current a component [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(6): 35-41.
- [15] SEKIOKA S, LORENTZOU M I, PHILIPPAKOU M P, et al. Current-dependent grounding resistance model based on energy balance of soil ionization [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 194-201.
- [16] 何金良, 孙为民. 输电线路杆塔接地装置冲击系数及其拟合计算公式 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(5): 9-12.
HE Jinliang, SUN Weimin. Characteristics and fitting formula of impulse coefficient of grounding device of transmission-line [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1999, 39(5): 9-12.
- [17] 邓长征, 周文俊, 杨迎建, 等. 杆塔接地冲击特性的模拟试验研究 [J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2917-2922.
DENG Changzheng, ZHOU Wenjun, YANG Yingjian, et al. Simulation test study of grounding impulse characteristics of transmission line tower [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2917-2922.
- [18] 中华人民共和国电力工业部. 交流电气装置的接地: DL/T 621—1997 [S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.

[本刊相关文献链接]

- 孙晋茹, 姚学玲, 许雯璐, 等. 非破坏雷电流 A 分量作用下碳纤维复合材料的动态特性. 2016, 50(6): 130-135. [doi: 10.7652/xjtuxb201606020]
- 徐海洋, 宋国兵, 樊占峰, 等. 行波波头的参数识别方法在高压直流输电系统中的应用. 2016, 50(2): 85-90. [doi: 10.7652/xjtuxb201602015]
- 刘英, 曹晓琰. 直流电压下交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝的生长特性研究. 2014, 48(4): 41-46 + 126. [doi: 10.7652/xjtuxb201404008]
- 梁振锋, 索南加乐, 康小宁, 等. 利用最小二乘拟合算法的三相重合闸永久性故障判别. 2013, 47(6): 85-89. [doi: 10.7652/xjtuxb201306015]
- 张英娇, 罗先觉, 牛涛, 等. 基于约束总体最小二乘算法的接地网故障诊断新模型. 2010, 44(10): 110-115. [doi: 10.7652/xjtuxb201010021]

(编辑 杜秀杰)