

文章编号:1671-6833(2016)04-0020-06

考虑土壤电离的接地装置冲击特性分析

李景丽¹,郭丽莹¹,武东亚²,王磊磊¹,李渊博¹

(1 郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001; 2 国网河南省电力公司河南电力调度控制中心,河南 郑州 450052)

摘要: 试验及实际运行经验表明,接地装置冲击特性是影响输电线路耐雷性能的重要因素.笔者以土壤电离过程中的动态、分布式土壤参数为基础,对典型接地装置建立冲击特性有限元模型;根据仿真计算结果与模拟试验结果从电磁场角度分析了典型接地装置的冲击散流机理及散流规律;同时定量计算了冲击电流作用下土壤参数及注入电流参数对土壤电离区域体积的影响规律,在此基础上分析了土壤电离对典型接地装置接地电阻、跨步电压、接触电压等接地参数的影响.结果表明,土壤电离现象对冲击散流特性和冲击接地参数的影响在高幅值注入电流、高电阻率地区更明显.该研究结果可为输电线路冲击接地降阻新措施的提出提供理论支持.

关键词: 接地装置;冲击特性;土壤电离;有限元分析

中图分类号: TM85 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.005

0 引言

随着电力系统的发展,输电线路运行的统计数据显示,线路防雷措施的设计目标与实际统计数据差异较大,这些差异说明目前对输电线路雷击事故的本质认识还不充分.

目前国内外学者对接地装置冲击特性的研究主要集中在以下 3 个方面:建立更加准确的计算接地装置冲击特性的数值计算模型^[1-3];采用模拟试验、真型试验的方法研究接地装置冲击特性、冲击散流规律^[3-5];土壤击穿机理^[6-7]、土壤临界击穿场强^[8]、土壤电离区域介电参数^[9-12]的理论和试验研究.其中,文献[4]考虑土壤电离过程对典型接地体冲击特性进行试验和仿真,研究表明:土壤动态电离现象在冲击散流过程中的影响不可忽视.文献[5]对典型接地体冲击散流规律的模拟试验研究认为:接地导体周围散流土壤中的电场强度由接地导体向无穷远处亦呈现不均匀分布特征,因此土壤中电离程度不同.

笔者建立可准确模拟冲击散流过程中土壤电参数的时变性和空间分布特征接地装置冲击特性

模型;基于此模型及模拟试验结果分析了典型接地装置动态冲击散流机理.同时定量计算了冲击电流作用下土壤参数及注入电流参数对土壤电离区域体积的影响规律;并对典型接地导体在不同地质和不同冲击注入电流下,土壤电离对冲击散流参数的影响程度进行了定性分析.

1 接地装置动态有限元模型

1.1 土壤火花放电特性模拟

雷电流经杆塔、接地装置流散入地的过程中,在土壤中产生瞬变电磁场.试验研究发现,当土壤电场强度超过一定值后,电压和电流不再是线性关系,呈现非线性电学现象^[9].文献[10]通过对大量的冲击特性试验数据详尽地分析认为:土壤火花放电区域的剩余土壤电阻率与原始土壤电阻率比值呈正态分布,可以采用其平均值 7% 进行等效.另外,文献[3,5]对典型接地体冲击散流规律的模拟试验认为:接地体分支间的电磁屏蔽效应、高频冲击电流下钢制接地导体的电感效应,使得冲击泄漏电流沿接地体的分布呈现不均匀形态.

收稿日期:2015-08-25;**修订日期:**2015-12-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307152)

作者简介:李景丽(1983—),女,河南周口人,郑州大学副教授,博士,主要从事电力系统防雷与接地技术研究,E-mail:lijingli1022@zzu.edu.cn.

由上述分析可知,冲击电流沿接地导体流散过程中,由接地导体向外土壤中的电场强度呈现减小趋势,因此接地装置流散高幅值雷电流时,沿接地导体向外的土壤中依次存在.其中电弧放电区、火花放电区、半导体区及恒定电导区 4 个区域的土壤电离区域示意图如图 1 所示.

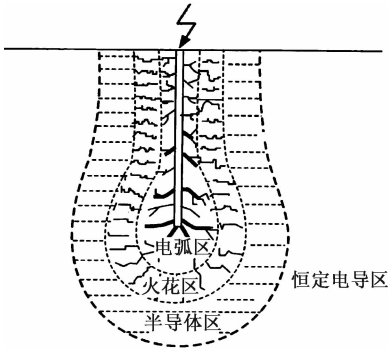


图 1 土壤电离区域示意图

Fig. 1 The soil ionization model under impulse current

综上所述,高幅值冲击电流散流过程中土壤电阻率为受瞬态电场控制的分布式时变参数,为此笔者在有限元模型中设定任一时刻离散土壤单元电阻率为上一时刻该单元电场强度的函数,准确模拟冲击散流过程中土壤电阻率随电场强度变化而变化的动态过程.

1.2 接地装置数学模型

冲击电流经接地装置流散将在土壤中产生瞬变电磁场,建立散流过程数值计算模型时位移电流不可忽略,接地体散流的动态物理过程可由以下时域拉普拉斯方程描述:

$$D(\varphi(x,y,z)) = \varepsilon \frac{\partial}{\partial t}(\nabla^2 \varphi) + \nabla \cdot (\gamma \nabla \varphi) = 0. \quad (1)$$

且控制方程需满足以下边界条件:

- a) 无穷远处为电位为零,即: $\varphi = 0, r \rightarrow \infty$.
- b) 地表面电绝缘,即:

$$\left(\gamma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) [n \cdot (\nabla \varphi)] = 0. \quad (2)$$

- c) 在注入电流的导体截面上,满足:

$$\int_s - \left(\gamma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla \varphi \cdot n ds = I. \quad (3)$$

- d) 不同参数的介质分界面上均满足:

$$\begin{cases} \varphi^+ = \varphi^-; \\ \left(\gamma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \cdot \nabla \varphi^+ \cdot n^+ = \left(\gamma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \cdot \nabla \varphi^- \cdot n^- \end{cases} \quad (4)$$

其次,有限元法适合于有限的求解空间,利用空间几何坐标变换法^[11]处理开域电磁场问题.

2 接地装置冲击散流特性

为分析接地装置冲击散流机理及其影响因素,采用考虑火花放电特性的接地装置冲击特性对中心引流的水平接地体、星型接地体、十字形接地体建立模型.冲击电流选用 8/20 μs 双指数雷电流波,其波形如图 2 所示,冲击电流幅值为 50 ~ 100 A 不等,土壤电阻率选为 115 和 1 000 $\Omega \cdot m$.

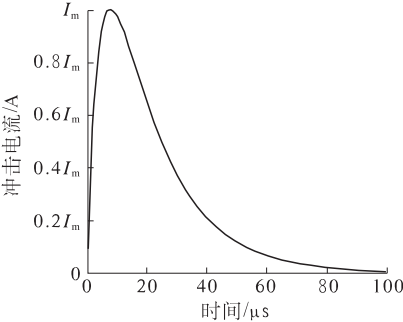


图 2 8/20 μs 冲击雷电流波形图

Fig. 2 The 8/20 μs impulse lightning current waveform

2.1 接地装置冲击散流机理

为分析土壤电离对散流规律的影响,图 3 分别列出注入电流峰值 $I_m = 100\text{ A}$ 、土壤电阻率 $\rho = 1\,000\ \Omega \cdot m$ 时,冲击电流峰值时刻距离十字形接地极 0.001 m 处土壤电场强度和导电率分布.由图 3(a)可知,电场强度沿接地导体分支的分布极不均匀,接地导体端部周围土壤中的电场强度较大,土壤在强电场作用下的火花效应使得接地导体端部土壤电阻率下降,冲击电流更偏向于沿电阻率较小的导体端部散流进入大地.散流比重的增加使导体端部的电场强度进一步加大,甚至产生强烈的电弧通道,加大了冲击电流的散流比重,使端部效应更明显.大冲击电流下的土壤动态电离使得接地导体周围土壤的电导率呈不均匀分布,如图 3(b)所示.由图 3 可知,土壤的最大导电率达到 0.013 S/m,即局部土壤电阻率最低达到 76.92 $\Omega \cdot m$,与原来的 1 000 $\Omega \cdot m$ 相比,降幅很大.

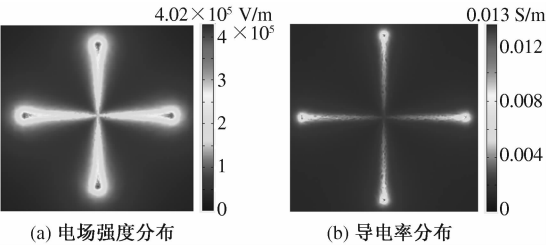


图 3 十字型接地极周围土壤电场强度和导电率分布

Fig. 3 Conductivity and electrical field distribution in the soil

2.2 接地装置冲击散流规律及其影响因素分析

为分析接地装置结构对冲击散流规律的影响,将接地导体分支从电流注入点到末端平均分成 5 段,依次记为 1~5 号,由导体散流的对称性,选取任一散流分支分析即可.根据仿真计算结果,图 4 绘出了土壤电阻率为 $115\ \Omega\cdot\text{m}$,冲击电流幅值为 $24\ \text{A}$ 时,3 种水平放射型接地装置冲击泄漏电流沿接地导体分支的分布规律.由图可知,3 种典型水平接地装置的各导体分支上相对漏电流的变化趋势基本相同,均呈现明显的端部效应,并且导体分支数越多,端部效应越明显.其中中心注入单根水平接地极末端导体段的相对漏电流是其首端的 1.5 倍;星型接地极末端导体段的相对漏电流是其首端的 2 倍;十字形接地极末端导体段的相对漏电流是其首端的 2.86 倍.因此,在接地装置优化设计时,应尽量降低注入点附近导体分支数,提升接地导体利用效率.

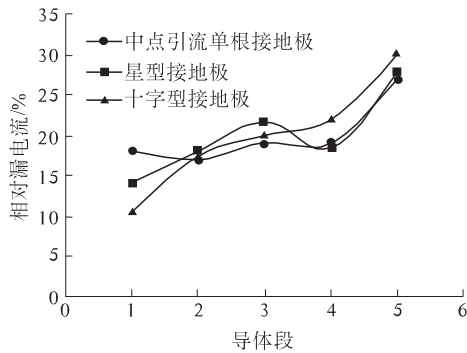


图 4 放射型水平接地极散流对比

Fig. 4 Relative leakage current distributions of horizontal radiating grounding rods

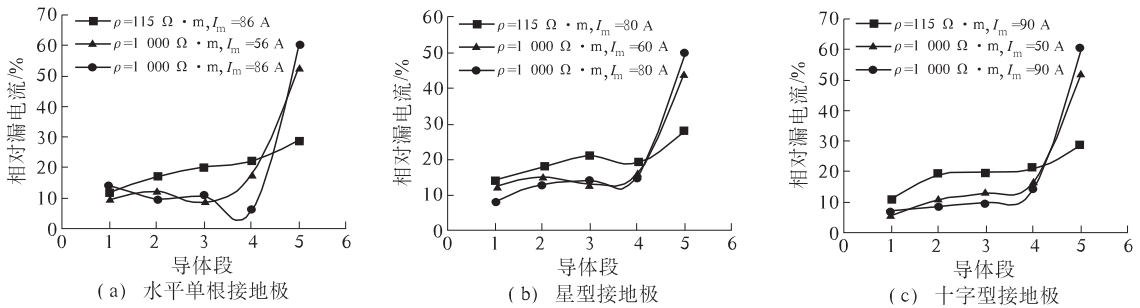


图 5 冲击电流峰值时刻水平接地体散流规律

Fig. 5 Relative leakage current of the horizontal grounding electrodes at peak of injection current

3 土壤电离对接地参数影响分析

3.1 土壤电离对冲击接地电阻的影响

为了定量分析土壤电离对冲击接地电阻的影响,图 6 绘出了不同冲击电流幅值和土壤电阻率下中心注入单根水平接地极的冲击接地电阻时域波形.另外,对土壤电离区域进行体积分得出土壤

为分析土壤电阻率、冲击电流幅值对冲击散流规律的影响,根据数值计算结果分别绘出了 3 种典型接地装置冲击散流分布情况,如图 5 所示.由图 5 可知:当土壤电阻率相同时,注入电流峰值越大,3 种接地装置中首末端导体段散流比重的不均匀程度均越明显.如星型接地极在电阻率为 $\rho = 1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 土壤中,冲击电流幅值 $I_m = 60\ \text{A}$ 时,末端导体段的相对漏电流是首端导体段的 3.67 倍;当冲击电流幅值 $I_m = 80\ \text{A}$ 时,末端导体段的相对漏电流为首端导体段的 6.25 倍.这是由于在相同接地体结构和土壤结构下,冲击电流幅值愈大,末端电场强度亦相对较大,土壤电离现象更加明显,而冲击电流更倾向于从电阻率更小的末段导体周围土壤中散流,进而加剧了导体分支泄漏电流的不均匀程度.

图 5 亦表明在相同注入电流下,土壤电阻率越高散流越不均匀,导体分支首末两端散流比重的差距越大.以十字形接地极为例,在注入冲击电流幅值 $I_m = 90\ \text{A}$ 下,土壤电阻率 $\rho = 115\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,导体分支末端导体段的相对漏电流是其首端的 2.64 倍;而土壤电阻率 $\rho = 1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,导体分支末端导体段的相对漏电流是其首端的 8.71 倍.这是因为当接地导体周围土壤的电阻率较大时,对于电阻率较大的土壤介质,冲击电流更趋向于沿着金属导体流向末端并在末端周围土壤集中散流,因此,接地导体分支末端土壤电离现象更加明显,从而加剧了导体分支散流的不均匀性.

电离区域体积的时域图,如图 7 所示.由图 6 可以看出,考虑土壤动态电离现象时,接地极的接地电阻不再是定值.接地电阻随着冲击电流的增大而逐渐减小,当达到冲击电流峰值时,接地电阻达到最小值.以中心注入单根水平接地极在冲击电流幅值 $I_m = 50\ \text{A}$ 、土壤电阻率 $\rho = 1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 为例,冲击接地电阻的降幅达到 42.54%.

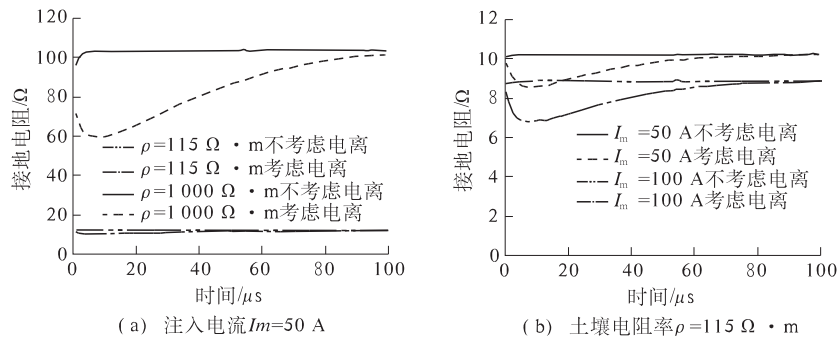


图 6 中心注入单根水平接地极接地电阻时域图

Fig.6 The electric resistance of the horizontal grounding

同时,由图 6 亦可看出,土壤动态电离使冲击接地电阻降低的现象在高土壤电阻率和高幅值冲击电流下更加明显.如图 6(a) 所示,当注入电流为 50 A 时,土壤电阻率 $\rho = 115 \Omega \cdot m$ 下的冲击接地电阻最小值较之不考虑土壤电离时降低了 16.17%,而土壤电阻率 $\rho = 1000 \Omega \cdot m$ 下的冲击接地电阻最小值较不考虑土壤电离时降低了 42.53%.这是由于高土壤电阻率下冲击电流沿接地导体分布的不均匀程度更明显,接地导体末端土壤电离现象更加剧烈,如图 7 所示,两种情况下冲击电流峰值时刻的土壤电离区域体积分别为 0.571 cm^3 和 30.218 cm^3 .由图 6(b) 可以看出,当土壤电阻率为 $115 \Omega \cdot m$ 时,注入的冲击电流幅值 $I_m = 50$ A 下的冲击接地电阻较不考虑土壤电离时减小了 16.17%;冲击电流幅值 $I_m = 100$ A 下的冲击接地电阻较之不考虑土壤电离时降低了 23.49%.这是由于在高幅值冲击电流作用下,泄漏电流沿接地导体分布的不均匀程度更明显,接地导体末端土壤电离现象更加剧烈,如图 7 所示,两种情况下冲击电流峰值时刻的土壤电离区域体积分别为 0.571 cm^3 和 7.159 cm^3 .

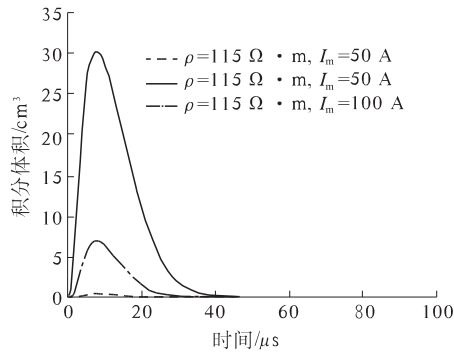


图 7 中心注入的单根水平接地极土壤电离区域面积
Fig.7 Transient ionization phenomenon area in the soil of the horizontal grounding

注入冲击电流峰值 $I_m = 100$ A 时,3 种水平接地装置冲击接地电阻的时域分布图.由图 8 可知,土壤电离使得单根水平接地极、星型接地极和十字形接地极冲击接地电阻分别降低了 20.47%、16.13% 和 14.99%.这是由于接地导体分支间的电磁屏蔽作用使得端部效应随接地导体分支数的增多而更加明显,从而星型和十字形接地导体土壤电离区域与单根水平接地极相比更加局限于导体最端部,限制了土壤电离区域的相对体积.根据数值计算结果对土壤电离区域进行体积分可得 3 种接地极结构的土壤电离区域体积分别为 6.775 、 4.628 和 3.58 cm^3 .

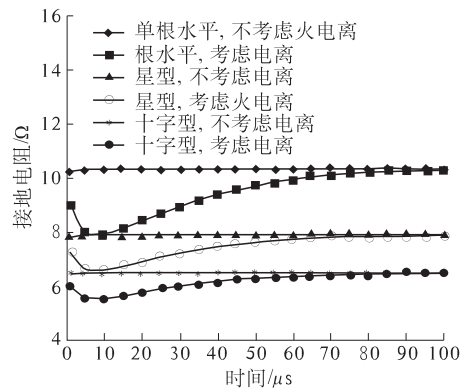


图 8 单点注入多方向散流接地极接地电阻对比
Fig.8 Comparing with the electric resistance of the horizontal grounding

3.2 土壤电离对接触电压和跨步电压的影响分析

为了分析土壤电离对接触电压和跨步电压的影响,图 9 和图 10 分别绘出了中心注入的单根水平接地极在垂直于接地导体方向上的接触电压相对值(以不考虑土壤电离时接触电压最大值为基准)和垂直于接地导体方向且距离接地极 0.6 m 处的跨步电压相对值(以不考虑土壤电离时跨步电压最大值为基准).由于土壤电离作用,与接地装置电位接近的区域整体向外延伸,同时

图 8 分别绘出了土壤电阻率 $\rho = 115 \Omega \cdot m$ 、

轴向上电压梯度减小,从而接触电压和跨步电压都有明显的降低;除此之外,接触电压和跨步电压降低的现象在高土壤电阻率和高幅值冲击电流下更加明显.如图 9(a),10(a)所示,当注入电流为 50 A 时,土壤电阻率 $\rho = 115 \Omega \cdot \text{m}$ 下的接触电压和跨步电压较之不考虑土壤电离分别降低了 30.3% 和 13.5%,而土壤电阻率 $\rho = 1\,000 \Omega \cdot \text{m}$ 下的接触电压和跨步电压较之不考虑土壤电离分

别降低了 67.9% 和 46.6%.由图 9(b)、10(b)所示,当土壤电阻率 $\rho = 115 \Omega \cdot \text{m}$ 时,注入的冲击电流幅值 $I_m = 50 \text{ A}$ 下的接触电压和跨步电压较不考虑土壤电离分别降低了 30.3% 和 13.5%,而冲击电流幅值 $I_m = 100 \text{ A}$ 下的接触电压和跨步电压较不考虑土壤电离时分别降低了 42.3% 和 21.6%.

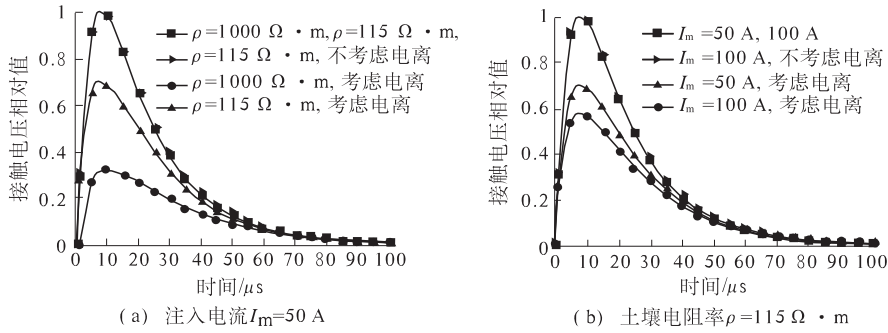


图 9 接地装置的接触电压
Fig. 9 Touch voltage of the horizontal grounding

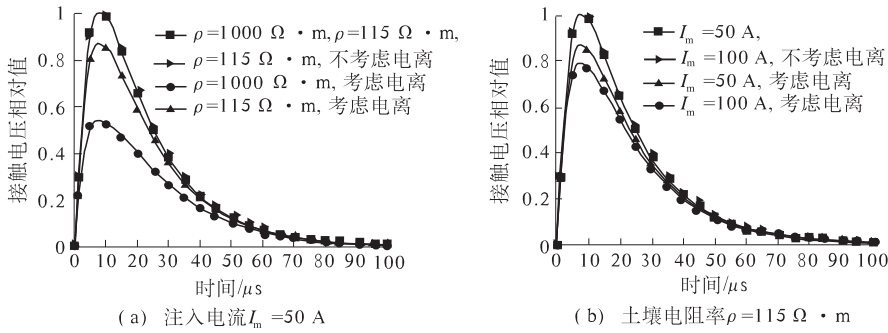


图 10 距离接地装置 0.6 m 处的跨步电压
Fig. 10 Step voltage of the point 0.6 m away from the horizontal grounding

4 结论

笔者基于有限元模型分析了典型接地结构的冲击散流机理及其影响因素,并详细分析了土壤动态电离现象对接地参数的影响,对实际接地设计有一定的参考价值.所得结论如下:

- (1) 冲击散流过程中泄漏电流沿接地导体的分布呈现明显的“端部效应”,注入点相连的分支数愈多、土壤电阻率愈大、冲击电流幅值愈高,泄漏电流分布的不均匀性愈强烈.
- (2) 土壤电离现象在高土壤电阻率和高幅值冲击电流条件下更加剧烈,因此,土壤电离引起的冲击接地电阻降低现象在高土壤电阻率和高幅值冲击电流下更加明显.
- (3) 土壤电离现象使得接地体附近地面的接触电压和跨步电压都有明显的降低.并且土壤电

离使接触电压和跨步电压降低的现象在高土壤电阻率和高幅值冲击电流下更加明显.

参考文献:

[1] ZENG R, GONG X H, HE J L, et al. Lightning impulse performances of grounding grids for substations considering soil ionization[J]. IEEE Trans on power delivery, 2008, 23(2):667-675.

[2] 朱时阳,袁涛. 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.

[3] LI J L, YUAN T, YANG Q, et al. Numerical and experimental investigation of grounding electrode impulse-current dispersal regularity considering the transient ionization phenomenon[J]. IEEE Trans on power delivery, 2011,26(4):2647-2658.

[4] 袁涛,李景丽,司马文霞,等. 土壤电离动态过程

- 对接地装置冲击散流的影响分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1606 – 1612.
- [5] 杨财伟,司马文霞,袁涛. 冲击电流下接地极屏蔽效应试验研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(12): 2609 – 2615.
- [6] FLANAGAN T M, MALLON C E, DENSON R, et al. Electrical breakdown characteristics of soil[J]. IEEE Trans on nuclear science, 1982, 29(6): 1887 – 1890.
- [7] SNOWDON D P, BEALE E S, VANLINT V A J. Effect of gaseous ambient on the initiation of breakdown in soil[J]. IEEE Trans on nuclear science, 1986, 33(6): 1669 – 1674.
- [8] OETTLE E E. A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated earth electrodes[J]. IEEE Trans on power delivery, 1989, 3(4): 2020 – 2029.
- [9] 何金良,曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [10] LIU Y Q. The residual resistivity in soil ionization region around grounding system for different experimental results[C]//IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. Boston, USA: IEEE Press, 2003: 794 – 799.
- [11] WANG J P, LIEW A C. Extension of dynamic model of impulse behavior of concentrated grounds at high currents[J]. IEEE Trans on power delivery, 2005, 20(3): 2160 – 2165.
- [12] VISACRO S, ALIPIO R. Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes[J]. IEEE Trans on power delivery, 2012, 27(2): 927 – 934.

Analysis of the Grounding Device's Impulse Characteristics Considering Transient Ionization Phenomenon of Soil

LI Jingli¹, GUO Liying¹, WU Dongya², WANG Leilei¹, LI Yuanbo¹

(1 School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2 Henan Electric Power Dispatching & Controlling Center, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The tests and actual operating experience show that the impact characteristics of grounding device characteristics are important factors about lightning protection performance of transmission lines. In this paper, based on the dynamic soil ionization process and distributed soil parameters, we established the finite element model of the impulse characteristics of grounding device. According to the simulation results and test results, we analyzed the mechanism and law of diffuser impact about typical grounding device from the electromagnetic field. And we calculated quantitatively the influence of the soil parameters and injection current parameters to the soil volume ionization region under the impact of current action. On the basis of these, we also analyzed soil ionization effect on typical ground resistance, step voltage, contact voltage and other parameters of the ground. The results show that the soil ionization phenomena has a great influence on the impulse diffuser characteristic and impulse grounding parameters, especially in the area of high resistivity and high injected current. the findings can provide theoretical support for new measures of reducing the impact grounding resistance.

Key words: grounding device; impact properly; transient ionization phenomenon of soil; finite element analysis