

基于 EMTP 的水平接地体冲击时-频特性分析

杨琳¹ 吴广宁¹ 田晓菲²

(1. 西南交通大学电气工程学院 成都 610031 2. 四川电力物流集团公司 成都 610041)

摘要 提出了一种基于 EMTP 的接地体冲击电流作用下时-频特性分析方法,建立了考虑土壤火花放电的水平接地体时域传输线模型,利用该模型对水平接地体冲击特性进行了时域分析。通过对接地体注入电流、电压波形进行傅里叶变换,于频域内计算接地体不同频率响应下频域阻抗,详细分析了接地体冲击电流作用下的频域特性,并以此计算了接地体等效长度,分析了雷电流不同波头时间,幅值对接地体阻抗的影响。

关键词: 火花放电 水平接地体 频率阻抗 传输线

中图分类号: TM72

Analysis of Impulse Characteristic Grounding Electrode in Frequency and Time Domain Based on EMTP

Yang Lin¹ Wu Guangning¹ Tian Xiaofei²

(1. Southwest Jiaotong University Chengdu 610031 China 2. Sichuan Electric Power Logistics Group Corporation Chengdu 610041 China)

Abstract In this paper, an analytical method of the Time-Frequency characteristics of horizontal electrode under lightning strike is presented based on EMTP, a transmission line model of horizontal electrode with the consideration of soil ionization is designed. It is easy to analysis the time-domain characteristic of horizontal electrode by using this model. Moreover, the impulse current and voltage are transformed by FFT analysis, then, the frequency impedance and effective length of horizontal electrode can be calculated, furthermore, the relationship of the magnitude and rise time of lightning with the frequency impedance can be gained.

Keywords: Soil ionization, horizontal electrode, frequency domain impedance, transmission line

1 引言

在输电线路经过土壤电阻率较高地区时,杆塔接地体通常采用单根水平或多根射线型的水平接地体来降低接地电阻。雷击杆塔时,雷电流经接地体不能有效散流是造成输电线路雷击跳闸的主要因素,因此,精确计算杆塔接地体冲击接地阻抗,分析其

对接地体冲击特性研究已有大量文献报道,并提出了接地体有效长度,冲击接地阻抗等概念。Sunde 的传输线理论分析水平接地体已为众多学者所认可,文献 [1]提出了利用等效半径变量模拟火花放电效应并辅以动态边界条件来计算伸长接地体冲击电阻的方法,文献 [2-3]在此基础上对水平接地体有效长度进行定义,计算出不同土壤电阻率,不同波头时间情况下水平接地体有效长度。但上述作者均以冲击系数或以瞬时阻抗方式表示接地体冲击阻抗,掩盖了其频域特性。此外,采用等效半径的概念虽然形象地解释了火花放电现象,但其值无论通过试验还是数值计算都难以确定。文献 [4]讨论了

收稿日期 2009-08-18 改稿日期 2010-02-21

冲击散流特性对于电力系统的安全运行有着重要意义。

EMTP 算法计算接地体传输线模型的可行性, 提出以土壤电阻率为变量的土壤击穿电压函数, 以此建立考虑火花放电的接地体 EMTP 模型, 并计算了接地体周围电场分布。文献 [5-6]在此基础上采用 FDTD 分析方法进行了工程应用研究。文献 [7-8]认为土壤火花放电可由接地体冲击电流作用下其电压、电流比值非线性变化表示, 并采用试验证明土壤电阻率与土壤击穿电压之间并无必然联系, 仅与土壤含水量关系较大。

随着土壤火花放电试验研究的深入 [10-12], 本文基于文献[4,9]思想, 采用文献[10]实测单位伸长接地体冲击伏安特性模拟接地体火花放电效应, 建立基于传输线理论的水平接地体 EMTP 差分电路模型, 分析了冲击电流沿接地体传播动态时变特性。于频域内计算接地体不同频率响应下频域阻抗, 详细分析了接地体冲击电流作用下的频域特性, 并以此计算了接地体等效长度, 分析了雷电流不同波头时间、幅值对接地体阻抗的影响, 取得了理想的效果。

2 水平接地体冲击特性

高土壤电阻率地区, 输电杆塔水平接地体长达数十至数百米, 当雷击输电线路时, 强大的雷电流将沿接地装置流散入地, 其冲击特性分析不仅要考虑火花放电引起的非线性特征, 还应考虑电磁波沿接地体传播时的波过程。因此, 模拟火花放电及波过程作用是分析计算接地装置冲击特性的前提。

2.1 火花放电效应

当幅值极高的冲击电流级接地体向周围土壤散流时, 接地体周围土壤将产生极强的暂态电磁场, 其暂态电场可表示为

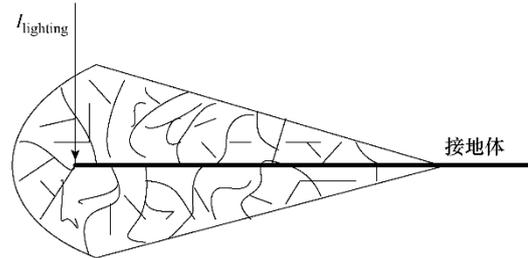
$$E = \rho J \quad (1)$$

式中, E 为电场强度; J 为电流密度; ρ 为土壤电阻率。火花放电发生始于 E 超过土壤临界击穿场强 E_c (由土壤电阻率及湿度等因素决定) 处, 终止于 E 随放电降落至低于 E_c 处, 如图 1a 所示。接地体土壤周围放电击穿后, 冲击电流将沿放电通道向四周流散。一般认为其放电通道电位降为零, 即视其为良导体, 因此可将火花放电效应等效为接地导体等效半径的增大, 文献 [2-3]以火花放电等效半径为变量, 采用递归算法加边界条件的方法计算冲击接地阻抗。但火花放电半径是由土壤电阻率、湿度、接地体几何模型等多因素决定的值, 计算时难以确

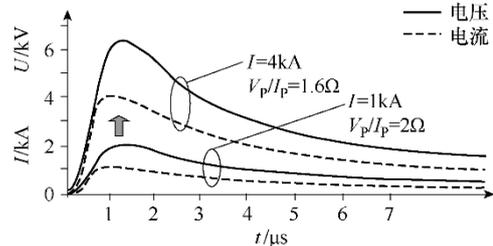
定。另一种对火花放电现象的定义为, 火花放电造成接地体上由冲击电流激发的冲击电压之间的比值增大, 即火花放电区电导增大, 其增大趋势由试验统计得出 [9], 如图 1b 所示。

2.2 波传播效应

由于用非线性电阻代替火花放电作用, 雷电流沿水平接地体传播时, 接地体仍可视有损均匀传



(a) 火花放电等效半径



(b) 接地体冲击电压电流比

图 1 接地体火花放电示意图

Fig.1 Aspect of ionization process

输线, 其电压、电流传播特性满足电报方程。将其等效差分后, 水平接地体可表示为由多个 π 型二端口网络顺序连接而成的网络, 加入火花放电因素, 则可将水平接地体表示为如图 2 所示等效电路。

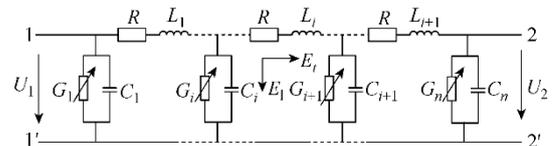


图 2 水平接地体等效集总参数差分电路

Fig.2 Horizontal electrode lumped parameter non-uniform circuit

图中 R 、 L 为单位长度水平接地体电阻及电感, 不受火花放电影响, 其值为常量; 对地电容 C_i 受火花放电影响较小, 可视为常量; 考虑镜像效果后, 可分别由以下公式确定 [2-3,6]。 G_i 为单位长度接地体对地电导, 其值为变量, 由试验结果确定。

$$R = \frac{\rho_c l}{\pi r^2} \quad (2)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 \right) \quad (3)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_s l}{\ln \frac{2l}{r} - 1 + \frac{\epsilon_s - \epsilon_a}{\epsilon_s + \epsilon_a} \left(\ln \frac{2l}{2h} - 1 \right)} \quad (4)$$

式中， ρ_c 为导体电阻率； ϵ_s 、 ϵ_a 分别为土壤与空气介电常数； h 、 l 、 r 分别为接地体埋深、长度、导体半径。每个节点电压、电流分别由电报方程式 (5) 和式 (6) 解出。

$$-\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = RI(x,t) + L(x,t) \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \quad (5)$$

$$-\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = G(x,t)V(x,t) + C(x,t) \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} \quad (6)$$

3 水平接地体时域分析

3.1 水平接地体 EMTP 建模

电磁暂态计算软件 EMTP 以节点法及差分法为计算基础，对水平接地体分布参数差分电路模型完全适用。水平接地体单位长度 EMTP 模型如图 3 所示。

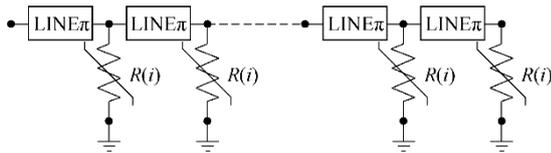


图3 水平接地体 EMTP 模型

Fig.3 EMTP model of horizontal electrode

火花放电效应采用非线性电阻模拟。其伏安特性数据选用单位伸长接地体真型试验结果 [7]，单位接地体 R 、 L 、 C 参数由式 (2) ~ 式 (4) 计算得出，采用 LINE- π 型元件表示。埋地深度 $h=0.45\text{m}$ ，导体半径 $r=0.5\text{cm}$ ，土壤电阻率 $\rho=1236\Omega/\text{m}$ ，土壤相对介电常数 $\epsilon_r=9$ ，雷电流波形选用双指数 $8/40\mu\text{s}$ 波形模拟，幅值为 40kA 。100m 长水平接地体单端雷击时，沿线电压、电流波形如图 4 所示。

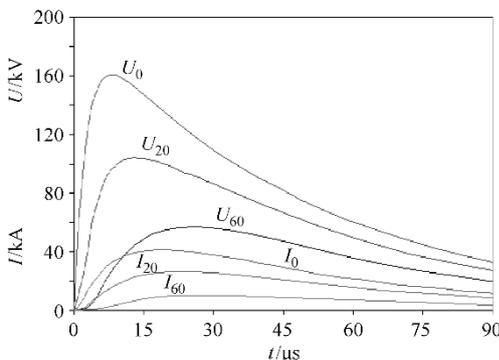


图4 水平接地体各点电压、电流波形

Fig.4 Current and voltage waveforms at different points of horizontal electrode

由图 4 可知，电压、电流波形沿水平接地体传播时幅值不断衰减，由于雷电波中高频分量的作用，不同频率分量正弦波沿接地体传播速度不同，其衰减快慢亦不同。此外，随着波向前传播，波形产生畸变，波前陡度减小。

火花放电将使雷电流沿接地体传播方向向周围土壤散流不均匀，图 5 为水平接地体离雷电流注入端不同距离泄漏电流波形，图中 I_{n-g} 表示由距首端 n (0m, 10m, 20m, 40m) 远处接地体向土壤泄漏电流，非线性电阻较好地模拟了接地体火花放电效应。

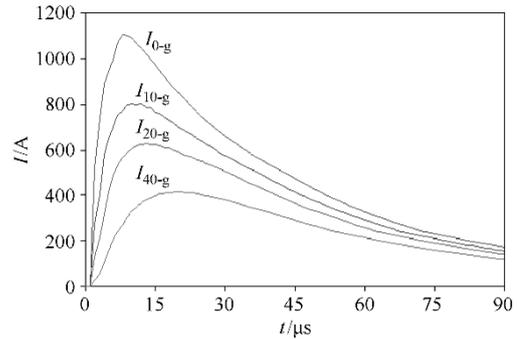


图5 水平接地体沿线各点泄漏电流波形

Fig.5 Leakage current waveforms of different points of horizontal electrode

3.2 水平接地体频域分析

工程上计算冲击接地电阻采用工频接地电阻乘以冲击系数（由试验测得）的方法，也有学者采用瞬时阻抗的方法 $Z(t) = U(t) / I(t)$ 。上述两种方法均不能反映雷电高频分量接地体电抗（主要为电感）作用。本文采用频域算法，即分别将接地体首端电压、电流波形经傅里叶变换至频域后，分别计算电压、电流频域内幅值比，得出频域阻抗

$$Z(k\omega) = U(k\omega) / I(k\omega) [13].$$

3.2.1 波头时间对水平接地体冲击阻抗的影响

雷电波波头时间决定的其频带宽度，将直接影响接地体冲击接地阻抗，50m 长接地体，导体半径 $r=0.6\text{m}$ ，埋深 $h=0.5\text{m}$ ，土壤电阻率 $\rho=1236\Omega/\text{m}$ ，电流波头时间分别为 $1\mu\text{s}$, $2\mu\text{s}$, $3\mu\text{s}$, $4\mu\text{s}$, $5\mu\text{s}$ 时，频域阻抗如图 6 所示，随着波头时间的增加，接地体低频阻抗不变，高频阻抗变化较大，在进行冲击接地阻抗测试时，应注意调整冲击电流发生器波头时

间, 否则测试结果中, 高频阻抗部分误差将很大。

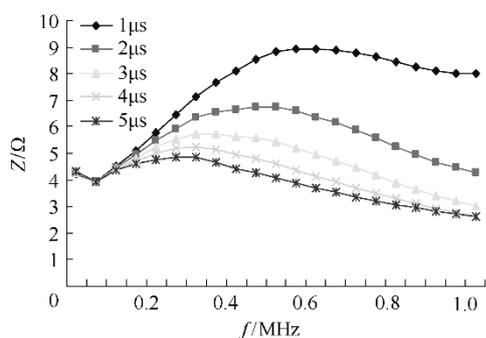


图 6 水平接地体频域阻抗与雷电波头时间关系

Fig.6 Relationship of lightning rise time with frequency impedance of horizontal electrode

3.2.2 水平接地体的有效长度

在高电阻率地区, 常采用增加水平接地体长度的方式降低接地电阻。此方法可有效降低工频接地电阻, 但就防雷保护而言, 当接地体长度达到一定值后再继续增加长度, 冲击接地阻抗将不再显著降低, 这一长度称为水平接地体有效长度。此时, 降低冲击接地阻抗的方法应采用多根放射型布置以增加泄流支路, 但距离不应过近, 否则屏蔽效应将影响泄流效果。图 7 为不同长度水平接地体频域阻抗 (参数条件同 3.2.1)。

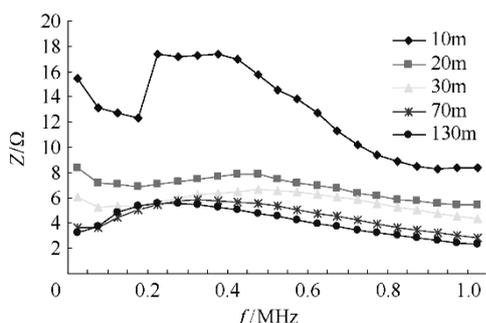


图 7 水平接地体长度与频率、阻抗的关系

Fig.7 Relationship between length and frequency impedance of horizontal electrode

由图 7 可知, 随着接地体长度的增加, 接地体阻抗呈下降趋势, 但当增加至一定长度后, 如本文接地体长 70m 时, 即使再增加 60m, 其接地阻抗仍无显著变化。此外, 随着接地体长度增加, 低频阻抗 (曲线首部) 先显著降低, 然后趋缓, 高频阻抗 (曲线尾部) 降低较慢, 这是因为频域阻抗可表示为

$Z(k\omega) = |R + jk\omega X|$, 随着接地体长度增加, 受火花放电影响, 泄漏电流集中在高场强区 (电流注入端附近), 所以刚开始增大接地体长度时, R 减小得

很快, 当超过接地体有效长度时, 接地体远端电场强度已有效降低, 泄散电流将变得很有限, R 不再显著降低。由于电感不受火花放电影响为常量, 电感引起的高频阻抗部分亦为常量 (曲线尾部变化不大)。因此, 接地体有效长度受土壤电阻率影响较大, 接地体电感主要起阻碍雷电波高频分量向接地体后方传播作用, 频域阻抗主要随 R 变化而变化。

3.2.3 雷电流幅值对水平接地体冲击阻抗的影响

雷电流幅值的大小决定了火花放电区域的大小, 100m 接地体在不同幅值雷电流作用下频域阻抗曲线如图 8 所示 (参数条件同第 3.2.1 节)。接地体雷电流作用下高频阻抗基本无变化, 低频频率阻抗随雷电流幅值增加而减小, 但减小的趋势不大, 此变化趋势仅与土壤火花放电伏安特性有关。

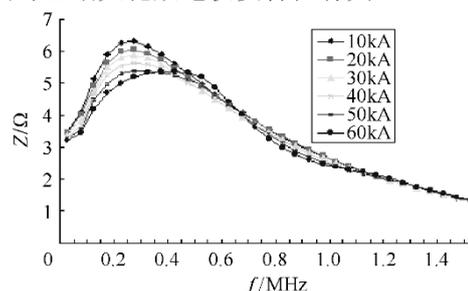


图 8 水平接地体频率阻抗与雷电流幅值关系

Fig.8 Relationship between horizontal electrode frequency impedance and magnitude of lightning

4 结论

接地体冲击暂态特性研究重点在于准确模拟冲击电流作用下接地体周围土壤火花放电现象及雷电流波沿接地体传播过程的波过程。本文分析了接地体冲击电流作用下时-频特性的方法, 分析了水平接地体冲击电流作用下时-频特性, 得到结论如下:

- (1) 雷电波头时间对接地体低频阻抗无影响, 对高频阻抗影响较大, 接地体电感主要起阻碍雷电波高频分量向接地体后方传播作用。
- (2) 接地体有效长度主要受土壤电阻率, 冲击波头时间影响, 土壤电阻率越低、冲击波头时间越短, 有效长度越短。
- (3) 雷电流幅值对接地阻抗影响不大, 接地阻抗随雷电流幅值增大而呈降低趋势。

参考文献

- [1] 夏长征, 陈慈萱, 文习山, 等. 伸长接地体冲击接地电阻计算[J]. 高电压技术, 2001, 27(5): 59-63.

- Xia Changzheng, Chen Cixuan, Wen Xishan, et al. Computation of impulse grounding resistance of extended grounding electrode[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(5): 59-63.
- [2] He Jinliang, Gao Yanqing, Zeng Rong, et al. Effective length of counterpoise wire under lightning current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1585-1591.
- [3] Zeng Rong, Gong Xuehai, He Jinliang, et al. Lightning impulse performances of grounding grids for substations considering soil ionization[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 667-674.
- [4] Frank E Menter, Leonid Grecev. EMTP-based model for grounding system analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(4): 1838-1849.
- [5] Liu Yaqing, Nelson Theethayi, Rajeev Thottappillil. An engineering model for transient analysis of grounding system under lightning strikes: non-uniform transmission-line approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 722-730.
- [6] Masanobu Tsumura, Yoshihiro Baba, Naoto Nagaoka. FDTD simulation of a horizontal grounding electrode and modeling of its equivalent circuit[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2006, 48(4): 817-824.
- [7] Mousa A M. The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes[J]. IEEE Transactions Power Delivery, 1994, 9(3): 1669-1677.
- [8] Tu Youping, He Jinliang, Zeng Rong. Lightning impulse performances of grounding devices covered with low-resistivity materials[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1706-1712.
- [9] Silverio Visacro. A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 381-386.
- [10] 夏长征, 陈慈萱. 单位长度伸长接地体冲击特性的真型试验[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 34-35.
- Xia Changzheng, Chen Cixuan. Impulse experiment for real extended grounding electrode in unit length[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3): 34-35.
- [11] 张宝平, 何金良, 康鹏, 等. 冻土冲击特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 143-147
- Zhang Baoping, He Jinliang, Kang Peng, et al. Experimental study on impulse characteristics of frozen soil[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 143-147.
- [12] Stojkovic Z, Savic M S, Nahman J M. Sensitivity analysis of experimentally determined grounding grid impulse characteristics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1136-1142.
- [13] 杨琳, 李建明. 冲击接地电阻测量装置的研制 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 93-96.
- Yang Lin, Li Jianming. Development of impulse grounding resistance measurement apparatus[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 93-96.

作者简介: 杨琳 男, 1983年生, 博士研究生, 从事过电压及防雷接地技术方面研究。吴广宁 男, 1969年生, 教授, 博士生导师, 从事高压绝缘技术与电气化铁路方面教学与研究。