

# 一种新的单根垂直接地极冲击特性计算方法

李世作<sup>1</sup>, 卢勇<sup>2</sup>

(1. 广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西电力职业技术学院, 广西 南宁 530007)

**摘要:** 基于电磁场积分方程和插值方法, 建立反映接地极上固定节点传导电流变化的状态方程组, 用欧拉方法得出状态方程的数值解, 进而计算冲击阻抗变化曲线和地面电位的分布情况, 提出分析单根垂直接地极冲击特性的新方法。

**关键词:** 冲击特性; 插值; 状态方程; 接地极

**中图分类号:** TM86

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2007)05-0089-03

## On New Calculating Method for Impulse Performance of Single Vertical Grounding Electrode

Li Shizuo<sup>1</sup>, Lu Yong<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Electric Power Institute of Vocational Training, Nanning 530007, China)

**Abstract:** A new method on calculate the impulse performance of single vertical grounding electrode is presented. Firstly based on the integral equation of electromagnetic field and the interpolation, state equations reflect the change of the conductive currents on the grounding electrode can be derived, then Euler method is used to get the numerical solution of the state equation, and the impulse impedance curve and the distribution of potential on the ground can be calculated. Finally, example shows that this method can analyze the impulse performance of grounding electrode accurately.

**Key words:** impulse performance; interpolation; state equations; grounding electrode

许多电气设备的接地极(如避雷器和避雷针)通常是一根独立的垂直接地极。目前,分析接地系统暂态过程的方法主要有2种:1)基于传输线理论的时域电路方法<sup>[1-5]</sup>,这种方法主要对长水平接地线有效,不适于垂直接地极和任意连接的地网;2)频域方法<sup>[6-12]</sup>,这种方法严格基于电磁理论,因而误差较小,但过于复杂,且不能考虑土壤的电离效应。

### 1 单根垂直接地极冲击特性分析

本文提出的方法是一种时域方法,基于积分方程和插值方法,建立和求解以节点传导电流为变量的状

态方程,从而确定地面电位分布和冲击阻抗。这种方法比时域电路法精确,而比频域法更简单。

#### 1.1 积分方程

图1示雷电流 $I_0$ 通过垂直接地极入地。

设接地极长度为 $L$ ,接地极上的传导电流为 $I_c(z)$ ,则从导体往土壤扩散的电流密度为:

$$J_s(z) = -\frac{\partial I_c(z)}{\partial z}, \quad (1)$$

根据静电比拟和镜像法,电极上的电位为:

$$\varphi(z) = \frac{\rho}{4\pi} \int_0^L \left( \frac{J_s(z')}{|z-z'|} + \frac{J_s(z')}{z+z'} \right) dz', \quad (2)$$

收稿日期: 2007-08-18

作者简介: 李世作(1969-),男,广西南宁人,广西大学电气工程学院副教授,硕士,主要从事电工技术,高电压技术的教学和研究。

忽略扩散电流的效应，沿电极的矢量磁位为：

$$A(z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^L \frac{I_c(z')}{|z-z'|} dz', \quad (3)$$

由麦克斯韦理论，得：

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{z_1}^{z_2} A(z) dz = \varphi(z_1) - \varphi(z_2). \quad (4)$$

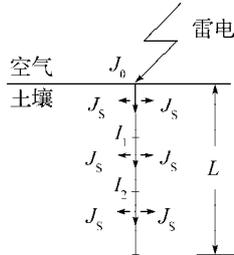


图1 单根垂直接地极

Fig. 1 Single vertical grounding electrode

1.2 离散化和插值

把电极等分为3段，每段长度为L/3。第一个节点的电流为入地雷电流I<sub>0</sub>，最后一个节点的电流为零，中

间2个节点的电流分别为I<sub>1</sub>和I<sub>2</sub>，电极上每一点的电流可以通过插值来确定：

$$I_c(z) = \frac{\left(z - \frac{L}{3}\right)\left(z - \frac{2L}{3}\right)(z-L)}{\left(-\frac{L}{3}\right)\left(-\frac{2L}{3}\right)(-L)} I_0 + \frac{z\left(z - \frac{2L}{3}\right)(z-L)}{\frac{L}{3}\left(\frac{L}{3} - \frac{2L}{3}\right)\left(\frac{L}{3} - L\right)} I_1 + \frac{z\left(z - \frac{L}{3}\right)(z-L)}{\frac{2L}{3}\left(\frac{2L}{3} - \frac{L}{3}\right)\left(\frac{2L}{3} - L\right)} I_2. \quad (5)$$

式(4)中的积分上下限z<sub>1</sub>和z<sub>2</sub>在第一段取0和L/3，第二段取L/3和2L/3，然后把式(1)~(3)、(5)代入式(4)，得到以导体上传导电流I<sub>1</sub>和I<sub>2</sub>为变量的状态方程：

$$M \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} + P I_0 + Q \frac{dI_0}{dt}, \quad (6)$$

其中：

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \begin{bmatrix} \int_0^{\frac{L}{3}} \int_0^L \frac{9z' \left(z' - \frac{2L}{3}\right) (z' - L)}{2L^3 |z - z'|} dz' dz & \int_0^{\frac{L}{3}} \int_0^L \frac{9z' \left(z' - \frac{L}{3}\right) (z' - L)}{-2L^3 |z - z'|} dz' dz \\ \int_{\frac{L}{3}}^{\frac{2L}{3}} \int_0^L \frac{9z' \left(z' - \frac{2L}{3}\right) (z' - L)}{2L^3 |z - z'|} dz' dz & \int_{\frac{L}{3}}^{\frac{2L}{3}} \int_0^L \frac{9z' \left(z' - \frac{L}{3}\right) (z' - L)}{-2L^3 |z - z'|} dz' dz \end{bmatrix};$$

$$N = \frac{9\rho}{4\pi} \begin{bmatrix} \int_0^L \frac{3z^2 - \frac{10L}{3}z + \frac{2L^2}{3}}{-L^3 z} dz & \int_0^L \frac{3z^2 - \frac{8L}{3}z + \frac{L^2}{3}}{L^3 z} dz \\ \int_0^L \left( \frac{3z^2 - \frac{10L}{3}z + \frac{2L^2}{3}}{-2L^3 |z - L/3|} + \frac{3z^2 - \frac{10L}{3}z + \frac{2L^2}{3}}{-2L^3 |z + L/3|} \right) dz & \int_0^L \left( \frac{3z^2 - \frac{8L}{3}z + \frac{L^2}{3}}{2L^3 |z - L/3|} + \frac{3z^2 - \frac{8L}{3}z + \frac{L^2}{3}}{2L^3 |z + L/3|} \right) dz \\ \int_0^L \left( \frac{3z^2 - \frac{10L}{3}z + \frac{2L^2}{3}}{-2L^3 |z - 2L/3|} + \frac{3z^2 - \frac{10L}{3}z + \frac{2L^2}{3}}{-2L^3 |z + 2L/3|} \right) dz & \int_0^L \left( \frac{3z^2 - \frac{8L}{3}z + \frac{L^2}{3}}{2L^3 |z - 2L/3|} + \frac{3z^2 - \frac{8L}{3}z + \frac{L^2}{3}}{2L^3 |z + 2L/3|} \right) dz \end{bmatrix};$$

$$P = \frac{9\rho}{4\pi} \begin{bmatrix} \int_0^L \frac{3z^2 - 4Lz + \frac{11L^2}{9}}{L^3 z} dz \\ \int_0^L \frac{3z^2 - 4Lz + \frac{11L^2}{9}}{2L^3 |z - L/3|} dz + \int_0^L \frac{3z^2 - 4Lz + \frac{11L^2}{9}}{2L^3 |z + L/3|} dz \\ \int_0^L \frac{3z^2 - 4Lz + \frac{11L^2}{9}}{2L^3 |z - 2L/3|} dz + \int_0^L \frac{3z^2 - 4Lz + \frac{11L^2}{9}}{2L^3 |z + 2L/3|} dz \end{bmatrix};$$

$$Q = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \int_0^{\frac{L}{3}} \int_0^L \frac{9 \left( z' - \frac{L}{3} \right) \left( z' - \frac{2L}{3} \right) (z' - L)}{2L^3 |z - z'|} dz' dz + \int_{\frac{L}{3}}^{\frac{2L}{3}} \int_0^L \frac{9 \left( z' - \frac{L}{3} \right) \left( z' - \frac{2L}{3} \right) (z' - L)}{2L^3 |z - z'|} dz' dz \right]$$

1.3 状态方程求解

利用数值积分方法计算矩阵  $M$ 、 $N$ 、 $P$ 、 $Q$  中的系数, 然后令电流  $I_1$  和  $I_2$  的初始值  $I_1^{(0)}$  和  $I_2^{(0)}$  为零, 采用如式 (7) 欧拉公式向前迭代计算电流  $I_1$  和  $I_2$ 。

$$\begin{bmatrix} I_1^{(k+1)} \\ I_2^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^{(k)} \\ I_2^{(k)} \end{bmatrix} + hM^{-1} \left( N \begin{bmatrix} I_1^{(k)} \\ I_2^{(k)} \end{bmatrix} + PI_0 + Q \frac{dI_0}{dt} \right), \quad (7)$$

式中  $h$  为时间步长。

2 举例

取冲击入地电流  $I_0$  为双指数模型, 上升沿为  $2.6 \mu s$ , 下降沿  $57 \mu s$ 。

$$\text{当 } 0 \leq t \leq 2.6 \mu s \text{ 时, } I_0 = 40000 \left( 1 - e^{-\frac{5000000}{2.6} t} \right);$$

$$\text{当 } t \geq 2.6 \mu s \text{ 时, } I_0 = 40000 \left( 1 - e^{-5} \right) e^{-\frac{1000000}{57} (t - 0.0000026)}.$$

取土壤电阻率  $\rho = 100 \Omega \cdot m$ , 长度分别为  $5 m$  和  $10 m$  的 2 种接地极为例子来计算。图 2 为接地极的对地冲击阻抗曲线, 图 3 为接地极长度为  $5 m$  时方圆半径  $10 m$  内地面电位随时间变化分布曲面。

从图 2 可以看出, 冲击阻抗在雷电流的上升沿很大, 然后下降, 最后趋向工频接地电阻。

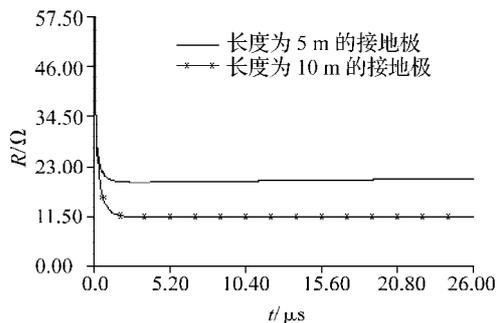


图 2 冲击阻抗曲线

Fig. 2 Curve of impactive impedance

3 结语

本文严格基于麦克斯韦理论和积分方程, 通过将接地极离散成 3 段, 利用 3 次插值来表示接地极上的传导电流, 得到以传导电流为变量的状态方程, 最后利用欧拉公式来进行计算, 算法不仅比时域电路法精

确, 而且比频域法简单, 为接地极冲击特性的研究提供了一种新的计算方法。

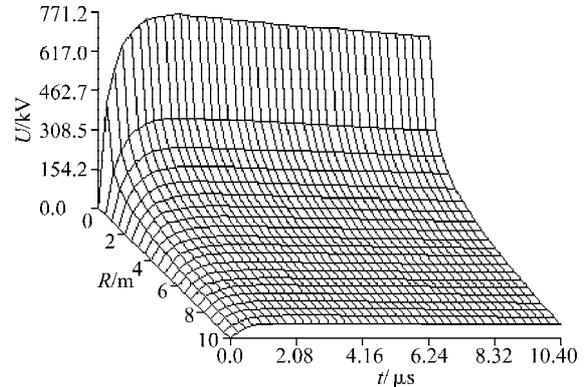


图 3 地面电位随时间变化分布曲面

Fig. 3 Surface distribution of potential on ground

参考文献:

- [1] 高延庆, 何金良, 曾 嵘. 接地网络的雷电冲击特性[J]. 电工技术杂志, 2002 ( 12 ): 9-12.
- [2] 夏长征, 陈慈萱, 文习山. 伸长接地体冲击特性的研究[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2003 ( 2 ): 54-58.
- [3] 陈先禄. 输电线路杆塔接地装置的冲击接地电阻计算公式 [J]. 电网技术, 1996 ( 6 ): 9-12.
- [4] 王保山. 长接地棒 / 极的冲击电流分布特性[J]. 高电压技术, 1995 ( 1 ): 70-73.
- [5] 叶海峰, 刘 浔. 基于 ATP-EMTP 的水平接地电极的冲击特性研究[J]. 电工技术, 2006 ( 11 ): 35-36.
- [6] Grcev L, Dawalibi F. An electromagnetic model for transients in grounding systems[J]. IEEE PD, 1990, 5 ( 4 ): 1773-1779.
- [7] Meliopoulos A P, Moharam M G. Transient analysis of grounding systems[J]. IEEE PAS, 1983, 102 ( 2 ): 389-394.
- [8] Xiong W, Dawalibi F. Transient performance of substation grounding systems subjected to lightning and similar surge currents[J]. IEEE PD, 1994, 9 ( 3 ): 1421-1427.
- [9] Geri A. Behavior of grounding system excited by high impulse currents: the model and its validation[J]. IEEE Trans on PWRD, 1999, 14 ( 3 ): 1008-1013.
- [10] Leonid D G, Markus H. Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12 ( 1 ): 172-178.
- [11] Dawalibi F, Xiong W. Transient performance of substation structures and associated grounding systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31 ( 5 ): 520-527.
- [12] Otero A F, Chdras J, Alamo J I. Frequency-dependent grounding system calculation by meal's of a conventional nodal analysis technique[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14 ( 3 ): 873-878.