

文章编号:1001-1609(2003)01-0022-03

# 考虑火花放电等效半径的输电线路杆塔伸长 接地体的冲击接地计算

赵 灵<sup>1</sup>, 王建国<sup>2</sup>, 夏长征<sup>2</sup>, 陈慈萱<sup>2</sup>, 张元芳<sup>2</sup>

(1.深圳供电分公司, 广东 深圳 518003; 2.武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

## IMPULSE GROUNDING COMPUTATION ON EXTENDED ELECTRODE OF TRANSMISSION LINE TOWER BASED ON SPARK DISCHARGE EQUIVALENT RADIUS

ZHAO Ling<sup>1</sup>, WANG Jian-guo<sup>2</sup>, XIA Chang-zheng<sup>2</sup>, CHEN Ci-xuan<sup>2</sup>, ZHANG Yuan-fang<sup>2</sup>

(1.Shenzhen Electric Power Corporation, Shenzhen 518003, China; 2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**摘要:** 提出了考虑火花放电等效半径的输电线路杆塔水平伸长接地体冲击接地的数值计算模型。应用该模型进行了火花半径、接地体冲击地电位分布、电流波形及冲击接地电阻的计算。

**关键词:** 火花放电; 冲击接地; 数值计算

**中图分类号:** TM75

**文献标识码:** A

**Abstract:** An impulse grounding mathematical model based on spark discharge equivalent radius of extended electrode of transmission line tower is presented. Computation of spark discharge radius, impulse grounding potential distribution, current waveform and impulse grounding resistance is conducted by using this model.

**Key words:** spark discharge; impulse grounding; computation

## 1 引言

当幅值很大的雷电流流过输电线路杆塔接地装置时,接地体的电位将急剧升高,当接地体周围土壤中的电场强度超过土壤的击穿场强时,接地体周围土壤中会产生强烈的火花放电。试验表明,当单根水平接地体的电位为 1 000 kV 时,火花放电区域的直径可达 70 cm<sup>[1]</sup>,这将使接地体的冲击接地电阻比工频接地电阻大大减小。目前杆塔的冲击接地电阻是以工频接地电阻为基础乘以冲击系数得出的,而冲击系数多是依靠少量现场试验及缩小尺寸的模拟试验确定的<sup>[2]</sup>,有一定的局限性。目前在冲击接地电阻的数值计算中基本没有考虑火花效应<sup>[2,3]</sup>,或将火花放电半径人为地均匀扩大为一个倍数<sup>[4]</sup>,没有很好地解决雷电流下接地体尺寸增大的问题。笔者提出了以接地体的火花区边界作为接地体的等值半径的

计算方法,考虑了雷电流下输电杆塔伸长接地体的物理特性,并以单根水平伸长接地体为例计算分析了火花效应对杆塔冲击接地数值计算的影响。

## 2 考虑火花放电的物理模型

如图 1 所示,幅值很大的雷电流流过接地体时,在接地体附近产生放电的过程为<sup>[1]</sup>:紧邻接地体附近的土壤形成激烈的电弧放电区。随着电流向外扩散电流密度逐渐减小,集中在几个电弧通道内的电流逐渐扩散趋于均匀分布而过渡为火花放电区,该区域的范围为电流密度减小到所产生的电场强度不足以击穿土壤时为限,因此,火花区的边界处有  $E = E_j$  的关系。随着电流继续向外扩散,该处的电场强度已不能再使土壤击穿,其场强对土壤所呈现的电导值有影响,类似于电解质在电场中的特性,称为电解质传导区。当电流继续向外扩散,减小到基本上不再影响土壤电阻率  $\rho$  的改变时,就称为恒定电导区。

接地体表面强烈的火花放电效应犹如接地体有效尺寸增大了。雷电流流过接地体时,由于接地体的电感及波传播过程中衰减等原因,沿接地体各点电位、电流与火花放电程度各不相同,即各点的等值半径是不相同的。前苏联直流研究所的研究表明:电弧

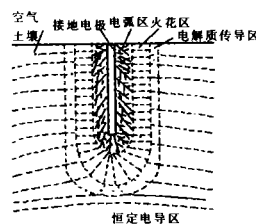


图 1 考虑火花放电的物理模型

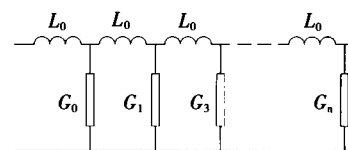


图 2 考虑火花放电的接地体等值回路

收稿日期:2002-09-16; 修回日期:2002-11-12

基金论文:教育部博士点基金资助项目(98049304)

区的电压降落很小,可以忽略不计,火花区域中的单个火花通道的直径虽然较细,但并联的火花路数很多,其电压降也可忽略不计。由于电弧区和火花区的电压降落很小,因此在进行计算时,可把火花区的边界视为雷电流通过时伸长接地体的等值半径  $r_d$ ,在这个边界外是电阻率为  $\rho$  的均匀分布区域。

### 3 数值计算模型

考虑火花放电后的伸长接地体单位长度导体的泄漏电导  $G$  不再是常数,而是与电压、电流和与注入点之间距离等诸多因素有关的函数,采用非均匀分布参数的有损导线等值回路来计算接地体的冲击接地电阻。由于接地体为良导体,接地体本身的电阻  $R_0$  忽略不计。在土壤电阻率较低的地区,电容  $C$  也可忽略不计。如图2,  $G_1, G_2 \dots$  是各单位长度接地体的对地泄漏电导,  $L_0$  是单位长度接地体的电感。

考虑雷击时钢接地体中磁饱和,忽略接地体内自感  $L_0$ , 电感公式简化为:

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} (\ln \frac{2l}{r_d} - 1) \quad (1)$$

式中:  $\mu_0$  为真空的导磁系数,  $r_d$  为接地体半径,  $l$  为接地体长度。伸长接地体对地电导公式为:

$$G_i = \frac{2\pi}{\rho (\ln \frac{l_i^2}{2hr_d} - 0.61)} \quad (2)$$

式中:  $G_i$  为第  $i$  点对地电导,  $l_i$  为接地体第  $i$  段的长度,  $\rho$  为土壤电阻率,  $h$  为接地体埋深,  $r_d$  为第  $i$  段的等值半径。因此,基本方程式简化为:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \quad (3)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = G(x, t, i \dots) u \quad (4)$$

采用有限差分法(网格法)求解,整理并改写为:

$$i_j^{n+1} = \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2 \cdot L_0 \cdot G_j^n} i_{j-1}^n + \left[ 1 - \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2 \cdot L_0 \cdot G_j^n} - \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2 \cdot L_0 \cdot G_{j+1}^n} \right] \cdot i_j^n + \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2 \cdot L_0 \cdot G_{j+1}^n} i_{j+1}^n \quad (5)$$

$$\left[ \frac{(\Delta x)^2 \cdot L_0}{\Delta t} + \frac{1}{G_j^{n+1}} + \frac{1}{G_{j+1}^{n+1}} \right] \cdot i_j^{n+1} = \frac{1}{G_j^{n+1}} i_{j-1}^{n+1} + \frac{1}{G_{j+1}^{n+1}} i_{j+1}^{n+1} + \frac{(\Delta x)^2 \cdot L_0}{\Delta t} i_j^n \quad (6)$$

给出边界条件并离散化:  $i(0, t) = i(t), i(l, t) = 0, i(x, 0) = 0 (x \neq 0)$ , 即可计算出接地体各点各时刻的电压和电流值,并得出  $n$  时刻接地体的冲击接地电

阻  $R_{ch}^n$ , 即接地体首端电压和电流的比值:  $R_{ch}^n = u_0^n / i_0^n$ 。

为检验计算方法及计算程序,将计算结果与文[2]进行了比较。计算中所用的参数:  $t = 2.6 \mu s$ , 电流  $i = \alpha t$  的斜率为  $\alpha = 150 \text{ kA}/\mu s$ , 接地体的埋深  $h = 0.5 \text{ m}$ , 半径  $r = 5 \text{ mm}$ , 土壤击穿场强  $E_j = 8.5 \text{ kV/cm}$ 。图3结果表明,该计算程序在不考虑火花放电(即在程序中将沿接地体各点的对地泄漏电导  $G$  固定)的情况下算出的冲击接地电阻  $R(t = 2.6 \mu s)$  和文[2]中解析解基本上是一致的。考虑火花放电后,程序结果比文[2]中解析解小。

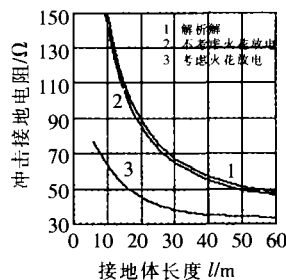


图3  $R(t=2.6 \mu s)$  与  $l$  的关系曲线 ( $\rho=1000 \Omega \cdot m$ )

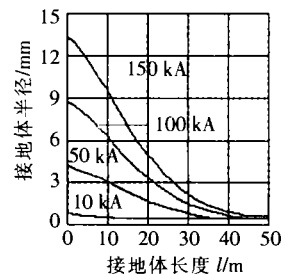


图4 不同幅值的雷电流作用下接地体各点半径变化曲线

计算表明,当土壤电阻率较大时,火花效应使冲击接地电阻降低的效果比土壤电阻率较小时明显。可见,在高土壤电阻率地区杆塔下埋设伸长接地体能够更有效地降低冲击接地电阻。计算还表明,对同一种土壤选择不同的击穿场强,最后的计算值相差不大。如对于  $\rho = 100 \Omega \cdot m$  的土壤,在注入电流为  $150 \text{ kA}$ , 接地体长度为  $20 \text{ m}$ , 埋深为  $1 \text{ m}$  时,取  $E_j = 8.5 \text{ kV/cm}$  和  $E_j = 30 \text{ kV/cm}$ , 计算结果相差  $14.1\%$ 。

计算中取  $E_j = 8.5 \text{ kV/cm}^2, \rho = 100 \Omega \cdot m$ , 接地体埋深  $h = 1 \text{ m}$ , 雷电流波形为  $2.6/40 \mu s$ 。

### 4 考虑火花效应时的线路杆塔伸长接地体冲击接地计算

#### 4.1 不同幅值雷电流作用下沿接地体长度方向上火花半径的变化

取接地体的长度为  $50 \text{ m}$ , 计算结果见图4。可以看出,当注入接地体的电流幅值比较小 ( $10 \text{ kA}$ ) 时,接地体周围的土壤基本上没有发生火花放电,接地体半径基本不变;随着注入电流幅值的增加,火花放电增强,等值半径也相应增大。由于接地体的散流作用,电流沿接地体流动时,电流幅值不断减小,离端点越远的地方,幅值愈小,火花放电程度愈小,等值半径也不断变小,在接地体末端周围土壤中的电场强度已不能引起土壤击穿,接地体等值半径不变。流过接地体的电流幅值越大,火花效应越明显,冲击接地电阻越小,这与火花效应对冲击接地影响的物

理机制是一致的。

#### 4.2 火花效应对沿接地体电位分布的影响

以接地体各点电压与始端电压之比  $U_x/U_0$  来表示沿接地体的电位分布。从图 5 可以看出,注入接地体的雷电流不同,火花放电程度不同,当注入接地体的电流幅值较小( $I=5$  kA)时,沿接地体的电位分布比注入电流幅值较大( $I=150$  kA)时的电位分布要均匀些。比较图 5(a),(b)可以看出,接地体越长,不均匀程度越严重。

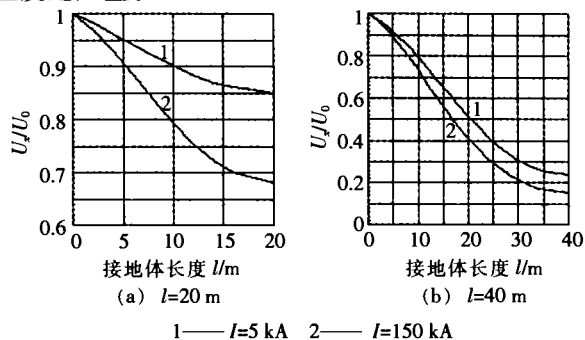


图 5 火花效应对沿接地体电位分布的影响

#### 4.3 火花效应对接地体各点电流波形的影响

沿接地体长度方向上的电流及电位的分布与很多接地问题,尤其是地理电缆的防雷安全问题等是密切相关的。取接地体的长度为 50 m,计算接地体各点的电流波形见图 6。比较图 6(a),(b)可以看出,对于接地体上相同的点,接地体发生火花放电时( $I=150$  kA)幅值的减小比没有火花放电时( $I=5$  kA)略快,波头比没有发生火花放电时略长,但差别较小。可以认为,火花放电对沿接地体上流动的雷电流波形的影响较小。

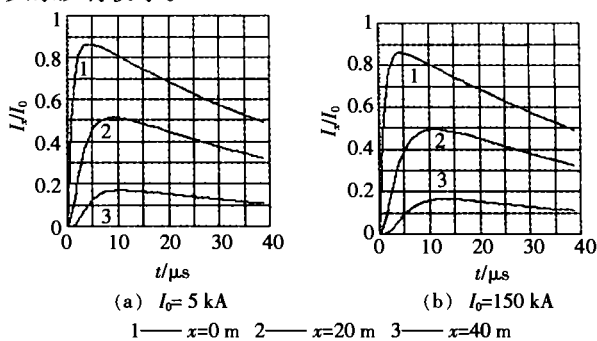


图 6 接地体上距端点不同距离的各点电流波形

#### 4.4 火花效应对接地体冲击接地电阻的影响

改变注入雷电流的幅值,计算  $t=2.6 \mu\text{s}$  时的冲击接地电阻  $R_{ch}$ ,结果见图 7。可以看出,随着冲击电流幅值的不断增加, $R_{ch}=f(t)$  的曲线越低,这是因为电流幅值越大,接地体周围土壤的放电越强烈,接地体的等值半径越大, $R_{ch}$  也就越小。图中在起始的

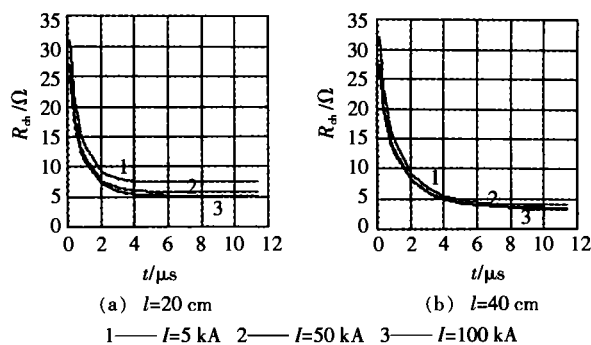


图 7 幅值不同的雷电流作用下  $R_{ch}$  随时间的变化曲线

一段时刻内,长度  $l=20$  cm 时的冲击接地电阻比长度  $l=40$  cm 时的冲击接地电阻要大,这反映了接地体长度的影响。

在图 7(a)中,当  $t=11.44 \mu\text{s}$ ,输入电流为 5 kA 时, $R_{ch}$  为  $7.48 \Omega$ ,当输入电流增大为 50 kA, $R_{ch}$  为  $5.86 \Omega$ ,下降了 17.1%;在图 7(b)中,当  $t=11.44 \mu\text{s}$ ,输入电流为 5 kA 时, $R_{ch}$  为  $4.0 \Omega$ ,当输入电流增大为 50 kA, $R_{ch}$  为  $3.5 \Omega$ ,下降仅为 12.5%。由以上分析可知,随着接地体长度  $l$  的增加,冲击电流的幅值对  $R_{ch}=f(t)$  的影响减小,而仅在曲线的起始部分具有大电流作用下曲线迅速下降的特征。

## 5 结论

(1) 计算输电杆塔冲击接地电阻应考虑火花效应的影响,因为火花效应增大了接地体的直径,从而降低了接地体的冲击接地电阻。笔者提出了一种考虑火花放电的影响时将火花区的边界视为伸长接地体的等效半径  $r_d$  的新方法。

(2) 计算结果表明,在雷电流作用下注入接地体的电流幅值越大,火花效应越明显,接地体等值半径越大,沿接地体的电压分布越不均匀。火花放电对沿接地体上流动的电流波形影响较小。随着接地体长度  $l$  的增加,冲击电流的幅值对冲击接地电阻的影响减小。在采纳输电线路杆塔伸长接地体的冲击接地电阻或冲击系数时应该计及火花效应的影响。

## 参考文献:

- [1] 汤善臣. 伸长接地体的研究[D]. 北京电力学院, 1964.
- [2] 解广润. 电力系统接地技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [3] A P Meliopoulos, M G Moharam. Transient Analysis of Grounding System[J]. IEEE Trans. PAS, 1983, 102(2): 389-399.
- [4] Carlo Mazzetti, M Veca Giuseppe. Impulse Behavior of Ground Electrodes[J]. IEEE Trans. PAS, 1983, 102(9): 3 148-3 156.

作者简介:赵 灵(1973-),女,硕士,工程师,现从事高压试验技术工作。电话:0755-5625245。