

单根水平接地体冲击特性仿真研究

冲击接地电阻与输电线路杆塔耐雷水平紧密相关, 正确模拟杆塔接地体在雷电流下的冲击特性对线路防雷设计具有重要意义。在对冲击机理的理解基础上结合电磁暂态分析软件ATPDraw及理论公式得出了冲击特性的建模思路; 利用其控制功能可以很好地模拟雷电流流过接地体时的电感效应和火花效应, 完善了冲击条件下接地体仿真模型。为了验证该模型及计算方法的正确性, 建立了实际单根水平接地体模型, 研究了其电感效应随长度的变化和火花效应随电流幅值的变化规律, 并将结论与模拟试验结果进行了对比。

路永玲¹ 周文俊² 喻剑辉² 刘 洋¹ 陶风波²/1. 江苏省电力公司电力科学研究院 2. 武汉大学电气工程学院



路永玲/工程师

关键词/Keywords

接地体 ·
冲击特性 ·
电感效应 ·
火花效应 ·
ATPDraw ·

雷击杆塔的耐雷水平与杆塔冲击接地电阻的大小紧密相关^[1], 降低杆塔冲击接地电阻是提高输电线路耐雷水平, 保证输电线路安全运行的重要措施。由于雷电流的等效频率高, 幅值大, 接地体的冲击特性与低频时有很大不同, 试验结果表明, 冲击接地电阻的大小除了和接地电极的几何尺寸及形状有关外, 还和大地的结构、土壤电阻率以及流经接地电极的冲击电流的幅值和波形有关^[2]。国内外学者对接地体冲击特性的研究主要包括试验研究和理论推导。现场真型试验法所需的冲击发生器在容量上很难满足实际要求而且操作极不方便, 该方法很难普及推广; 基于相似原理^[3], 用缩小的接地体尺寸和小冲击电流可以在实验室条件下进行模拟试验, 但还是与实际情况有所差异。

目前对冲击特性的理论研究主要体现在4个方面: 传输线理论^[4]、电磁场理论^[5]、有限元方法^[6]和电路理论^[7]。前两种方法没有考虑土壤在雷电冲击电流作

用下产生的非线性电击穿效应; 有限元法近似地认为接地体周围土壤的火花放电是均匀的, 但实际上火花效应的强弱是随冲击电流的瞬时大小而变化的。基于电路理论的方法, 是将接地极等效为一个分布参数电路, 具体是将接地极细化为很多段, 每一段有 R 、 L 、 C 和 G 4个参数, 该方法可以直接有效地研究接地体的暂态特性, 能较好地反映雷电流的高频特性, 也可以考虑土壤的非线性电击穿现象、土壤电阻率、接地体尺寸和冲击电流幅值等因素的影响。

本文以电路理论为基础, 研究了考虑非线性火花放电和电感效应的ATP-EMTP仿真模型的建模思路, 并由此建立具体接地体模型进行仿真, 将结果与模拟试验做了对比, 为更加准确地进行冲击特性研究奠定基础。

冲击特性计算模型

1. 电路理论

基于电路理论的方法是由集中参数 R 、 L 、 C 和 G 组成的 π 型等效电路来模拟计算接地体暂态特性的一种直接法。在冲击电流的作用下, 可以将接地体分成很多小段, 每一段接地体可以看成是由 $R-L-C-G$ 组成的等值电路, 如图1所示。

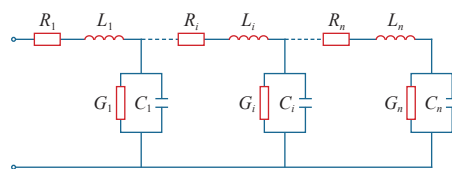


图1 接地体的分布参数电路

图1中, R_i 为各段接地体的自身电阻,可由具体的接地体尺寸和电阻率计算出来; C_i 、 G_i 分别为各段接地体的对地电容和泄漏电导; L_i 为各段接地体的电感,为了考虑接地体的电感效应, L_i 不可忽略,以下是各个参数的计算公式^[8]。

单位长度伸长接地体电感为

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

单位长度伸长接地体对地电导为

$$G_0 = \frac{2\pi}{\rho \left(\ln \frac{l^2}{2hr} - 0.61 \right)} \quad (2)$$

单位长度伸长接地体对地电容为

$$C_0 = \varepsilon \rho G_0 \quad (3)$$

式中, μ_0 为真空磁导率,在实用范围内取 $4\pi \times 10^{-7}$; r 为接地体半径; l 为接地体长度; h 为接地体埋深; ε 为土壤的介电系数,在实用范围内可取 $9 \times 8.86 \times 10^{-12}$ 。

雷电流相当于高频电流,这就会使接地体自身的电感呈现影响,阻止电流向接地体远方流动,对于越长的接地体这种影响越明显,导致接地体得不到充分利用,从而使接地体的冲击电阻值高于工频接地电阻,雷电流的这一特点称为电感效应。另外,雷电流的幅值很高,这会使地中电流密度增大,提高了电场强度;当电场强度超过土壤临界击穿场强时会发生局部火花放电,在电弧区内的电压降很小,可以忽略不计,其总体效果可视为接地体的尺寸增大了,从而使得 C_i 和 G_i 发生变化,其接地电阻要小于工频电流下的数值,这一特点称为火花效应。因此建立冲击特性的电路仿真模型不能忽略电感的作用,同时为了考虑火花效应,需要得出电流大小与等效半径的关系,使得 C_i 和 G_i 随着电流幅值的变化而瞬时变化。

2. 考虑火花效应时的建模思路

(1) 等效模型机理

在冲击电流的作用下,接地体周围产生瞬变电磁场,在土壤中产生的场强为

$$E = \rho J \quad (4)$$

随着冲击电流幅值的增加,则在靠近接地导

体区域的土壤中产生火花放电,土壤被击穿。在接地体的计算中通常略去火花放电的电压降,认为在火花放电区域的电阻率近似为零,接地体周围土壤火花放电区域的半径是接地体暂态过程中的等效半径。

为了考虑火花放电过程中参数的变化,需要确定火花效应的等效半径,为此运用文献[9]中提出土壤的起始击穿场强与电阻率的关系,见式(5),据此在土壤一定时,就可以确定 E_c ,即

$$E_c = 241 \rho^{0.125} \quad (5)$$

式中, E_c 的单位为 kV/m; ρ 的单位为 $\Omega \cdot m$; J 为电流密度。

另外,电感作用将阻碍冲击电流向接地体远端流动,接地体各点散流极不平衡,火花放电的程度亦不相同,即各点的等效半径不同,越靠近电流注入点接地体流散越多,这里的电流密度就越大,土壤的击穿区域也就越大,因此在接地极周围土壤的击穿区域形状呈锥形,而不是一般认为的圆柱形,如图2a所示^[10]。但为了仿真计算的简便,将接地极分为若干段,对每一个导体段采用圆柱形模型,如图2b所示,段数越多则越接近实际情况。图2b中, a 为导体自身半径; r_i 为第 i 段的等效半径。

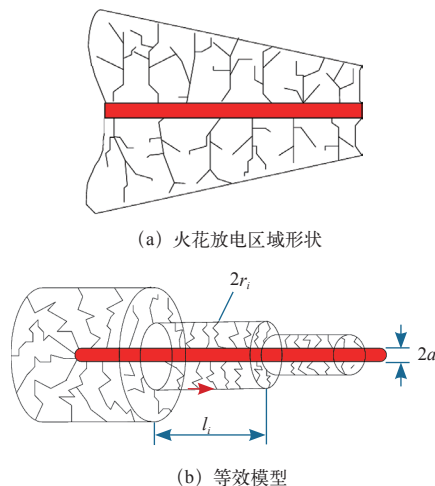


图2 火花放电区域形状和等效模型

接地体各段的自阻抗和互阻抗不随接地体的等效半径的变化而改变^[11-12],这是由于在接地导体与土壤的分界处可近似认为由导体向土壤中的散

流方向与导体表面垂直，与电流交链的磁链不随导体等效半径的变化而变化。同时，雷电流在导体中通过金属导体向后方传导，根据电感和电阻的物理定义，认为它们不随土壤中火花放电区域的变化而变化，所以考虑火花放电也就是考虑接地体对地电导和对地电容的变化，而对地电容的变化相比对地电导的变化要小很多，因此主要考虑对地电导的变化。

(2) 等效模型在ATPDraw中的实现

按照以上分段的思路，则有

$$J_c = \frac{E_c}{\rho} = \frac{I_i}{2\pi a l_i} \quad (6)$$

式中， E_c 为土壤临界击穿场强； J_c 为临界击穿时的电流密度； I_i 为通过第*i*段导体向大地流散的电流； l_i 为每*i*段长度。

再结合式(5)和式(6)求得第*i*段接地体产生火花放电的临界电流值为

$$I_c = \frac{482\,000\pi a l_i}{\rho^{0.785}} \quad (7)$$

即当 $I_i < I_c$ 时，不发生火花放电；反之，发生火花放电，且第*i*段火花放电的等效半径为

$$r_i = \frac{\rho I_i}{2\pi l_i E_c} \quad (8)$$

联立式(2)、式(5)和式(8)可得第*i*条支路的对地电阻随支路电流的变化关系为

$$R_i = a - b \ln I_i \quad (9)$$

式中， a 、 b 为待定系数，均大于0；由此可知，火花放电过程中电流和电阻成对数关系。

在ATPDraw中为了实现以上非线性关系，引入Models模型，用Models语言编写程序，使该段的对地电阻在临界电流之前为一固定值，即接地体的等效半径未变化时的电阻值；而在达到临界电流后按式(9)变化，从而实现对地电阻随支路电流的瞬时变化，将电感效应和火花效应同时考虑进去，其模型示意如图3所示。

图3中， G_i 随 I_i 的变化时刻在变化，只要采集到 I_i 的大小，通过Model模块改变对地电阻的大小，即可模拟火花放电效应在雷电流下的时变特性。

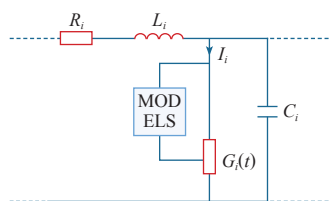


图3 火花效应的ATPDraw模型

计算实例

本次仿真取实际线路的圆柱形单根水平伸长接地体，半径 $r = 1\text{ cm}$ ，单位长度电阻为 $0.05\text{ }\Omega/\text{m}$ ，埋地深度 $h = 0.8\text{ m}$ ，土壤电阻率分别为 $\rho = 100\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 、 $500\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 和 $1\,000\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ，以 2 m 分段，冲击电流波形为 $2.6/50\text{ }\mu\text{s}$ 。

1. 电感效应仿真分析

若只考虑电感效应，根据式(1)、式(2)和式(3)计算不同长度不同电阻率下的单位长度参数，建立仿真模型，得到结果如图4所示。其中 R_{ch} 为冲击接地电阻值。

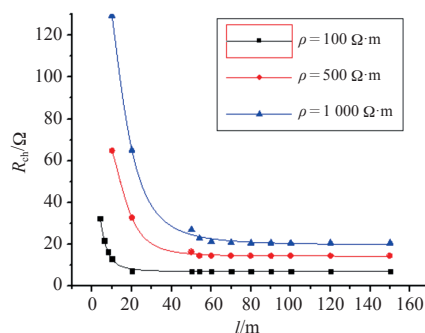


图4 接地电阻随长度的变化

随着接地体长度的增加，电极与土壤有效接触面积增大，更有利于散流，接地电阻值减小。但由于长度增加，接地体感抗增大，阻流作用增大，接地极得不到充分利用，使得冲击接地电阻具有饱和性。但当土壤电阻率增大时，阻碍电流向土壤中流散，冲击电流只能流向接地极末端，这样就增大了接地极的有效长度，仿真曲线恰好说明了这一点。

基于相似性理论，在实验室条件下将模拟比定为10进行了不同冲击电流下的接地体冲击试验，表1为在 ρ 一定时的小电流冲击作用下的试验数据，由表1可以看出，模拟试验的结论与仿真结论基本

一致。

表1 小电流冲击下的试验数据

l/m	充电电压/kV	实际电压/kV	实际电流/kA	R_{ch}/Ω
0.5	5.00	6.32	0.09	68.61
1.0	5.00	4.59	0.11	40.54
1.5	5.00	4.35	0.14	30.24

当冲击电流流经接地体时, 电流变化率 di/dt 很大, 则电感上的电压降很大, 电感的阻流作用使得接地体各段的电流大小不同, 离注入点远的部位没有起到很好的泄流作用, 图5显示了 $\rho=100\ \Omega\cdot\text{m}$, $l=10\ \text{m}$ 时接地体各部分的散流大小。由图5可知, 首端散流最多, 越靠近末端散流越少, 而且电感效应对波前时间常数影响显著。

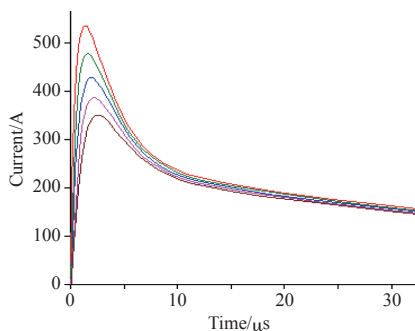


图5 距首端为0 m、2 m、4 m、6 m和8 m处散流波形

2. 火花效应仿真分析

在以上仿真条件下根据式(9)分别求得 $\rho=100\ \Omega\cdot\text{m}$ 、 $500\ \Omega\cdot\text{m}$ 和 $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 且 $l=10\ \text{m}$ 的非线性关系。例如, $\rho=100\ \Omega\cdot\text{m}$ 时有: $R_i=118.073-7.958\ln I_i$, 其临界电流为815.13 A。由此建立火花效应ATPDraw模型, 求得不同冲击电流幅值下的冲击接地电阻变化趋势如图6所示。

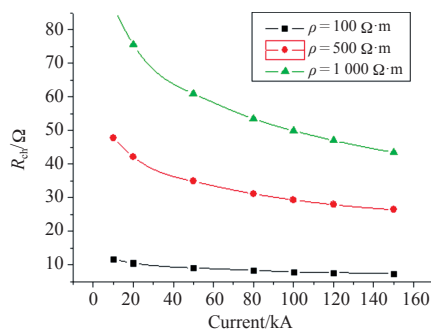


图6 接地电阻随冲击电流幅值的变化

大冲击电流下接地体的冲击特性与小电流下有显著的差异。具体体现在随着电流的增加, 接地体周围场强不断增大, 当接地体周围土壤中的场强超过土壤的临界击穿场强时, 在接地体周围将发生火花放电现象, 相当于接地导体的等效半径变大, 这就使得冲击接地电阻随着电流幅值的增大而变小。随着电流的继续增大, 这一现象趋于饱和, 这是由于单根伸长接地体的接地电阻与接地体半径是成对数关系变化的。以上结论与文献[13-14]及如表2所示的实验室模拟试验所得结论一致。

表2 1 m单根伸长接地体在大冲击电流下的接地电阻值

充电电压/kV	实际电压/kV	实际电流/kA	R_{ch}/Ω
5	4.59	0.11	40.54
10	9.18	0.24	38.58
15	13.48	0.40	34.08
20	17.59	0.62	28.46
25	22.66	0.88	25.89
30	27.14	1.15	23.56
35	32.21	1.48	21.79
40	36.68	1.79	20.54
45	40.85	2.17	18.83

3. 冲击接地系数的计算

对于单根水平伸长接地体有^[1]

$$R_g = \frac{\rho}{2\pi l} (\ln \frac{l^2}{2rh} - 0.6) \quad (10)$$

式中, R_g 为工频接地电阻; 由定义可知, 冲击系数 $\alpha=R_{\text{ch}}/R_g$, 计算结果如表3所示。

表3 冲击接地系数仿真值

$\rho/\Omega\cdot\text{m}$	不考虑火花效应	考虑火花效应
100	1.008 74	0.898 9
500	1.000 64	0.735 7
1 000	0.999 71	0.667 9

对于伸长接地体而言, 在小电流作用下, 由于电感效应较为强烈, α 略大于或等于1; 考虑火花效应情况下, α 小于1。

结束语

1) 通过对冲击机理的分析, 得出以电路理论

3) 引入计算实例, 搭建ATPDraw仿真模型进行计算, 研究接地体的电感效应随长度的变化和火花效应随电流幅值的变化情况, 并与实验室模拟试验结果进行对比, 验证了计算模型的准确性。

参考文献

- [1] 关根志. 高电压工程基础 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [2] Tu Youping, He Jinliang, Zeng Rong. Lightning impulse performances of grounding devices covered with low-resistively materials [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (3) : 1706-1713.
- [3] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] Heimbach M, Grcev L D. Grounding system analysis in transients program applying electromagnetic field approach [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12 (1) : 186-193.
- [5] 贺宏兵, 周璧华, 余同彬, 等. 不同接地体冲击接地阻抗的时域分析 [J]. 电波科学学报, 2007, 22 (1) : 166-169.
- [6] 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.

- [7] Ramamoorthy M, Narayannan M M B, Parameswaran S, et al. Transient performance of grounding grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4 (1) : 2053-2059.
- [8] 赵灵, 王建国, 夏长征, 等. 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 [J]. 高压电器, 2003, 39 (1) : 22-24.
- [9] Oettl E E. A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated earth electrodes [J]. IEEE T-PWRD, 1989, 3 (4) : 2020-2029.
- [10] Geri A, Garbagnati E, Veca G M, 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.
- [11] 徐伟. 考虑火花效应时杆塔接地装置冲击特性的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [12] 叶海峰. 雷电流流过接地电极时的冲击特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [13] 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, 36 (1) : 54-58.
- [14] 徐华, 吕金煌, 文习山, 等. 杆塔冲击接地电阻的计算 [J]. 高电压技术, 2006, 32 (3) : 93-95.

(收稿日期: 2015-03-10) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告