

输电线路杆塔接地电阻的简化计算

厉天威, 何民, 卢本初, 程思勇

(广西电力工业勘察设计研究院, 广西壮族自治区 南宁市 530023)

Simplified Calculation for Grounding Resistance of Transmission Tower

LI Tianwei, HE Min, LU Benchu, CHENG Siyong

(Guangxi Electric Power Industry Investigation Design and Research Institute, Nanning 530023,
Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

ABSTRACT: In the grounding design of high voltage transmission line the empirical formula is often used to calculate the grounding resistance of transmission tower, so the calculation accuracy is just passable. Considering the non-uniformity of the current dispersed from the grounding electrode, a grounding electrode is divided into sections to calculate their self-resistance coefficients and mutual resistance coefficients, thus the grounding resistance of grounding electrode is solved. The number of conductor sections is dependent upon the requirement to computation accuracy, the more the number of the sections, the higher the computational accuracy. Finally, the grounding resistances of grounding electrode usually used for transmission tower, such as radial grounding electrode and double-ring grounding electrode, under different soil resistivity, conductor radii and depths of burying are analyzed.

KEY WORDS: transmission line; grounding resistance; transmission tower

摘要: 输电线路杆塔接地设计中, 通常应用经验公式计算杆塔接地电阻, 计算精度有限。为此, 考虑到接地导体扩散电流的不均匀性, 对接地导体进行分段处理, 计算各分段导体的自电阻系数和互电阻系数, 进而求得接地导体的接地电阻。可根据精度要求确定分段数量, 分段数量越多, 计算精度越高。最后分析了输电线路杆塔常用的射线接地体、双环形接地体分别在不同土壤电阻率、导体半径、埋设深度等条件下的接地电阻, 可为接地体优化设计和型式选择提供参考。

关键词: 输电线路; 接地电阻; 杆塔

0 引言

架空输电线路杆塔接地对电力系统的安全稳定运行至关重要, 降低杆塔接地电阻是提高线路耐雷水平、减少线路雷击跳闸率的主要措施。由于塔位处地形及地质条件多样, 且杆塔接地设计要求越来越高, 原有接地型式已难以满足现行输电线路杆

塔接地设计要求, 因此有必要对原有接地型式进行优化设计。

目前国内杆塔接地设计均以文献[1-2]规定的工频接地电阻作为参考。工频接地电阻计算目前已有不少经验公式可以使用^[3-4], 但该类公式不能准确计算稍复杂的不规则接地网及接地型式复杂杆塔的接地电阻。文献[5-6]利用有限元法对接地电网进行分析, 计算结果比较令人满意, 但所建模型比较复杂。为此, 本文将文献[8-17]为理论基础, 并考虑导体扩散电流的不均匀性, 对接地导体进行分段处理, 推导出简单的接地电阻计算方法, 为杆塔接地型式优化设计提供参考。

1 接地电阻

1.1 简单接地体接地电阻

简单垂直接地体如图 1 所示, 土壤电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$, 接地体直径 d 为 10 mm , 接地体长度 l 取 $1 \sim 200 \text{ m}$ 。

经验公式^[1]与权威接地电阻计算软件^[18-19]CDEGS (Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis)的接地电阻计算结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 2 种计算方法所得结果基本一致, 因而对于单一接地体, 采用经验公式所得结果是可靠的。

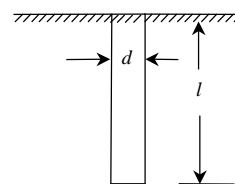


图 1 简单垂直接地体

Fig. 1 Simple vertical grounding electrode

表 1 简单垂直接地体接地电阻的计算结果
Tab. 1 Calculation results of grounding resistance of simple vertical grounding electrode

接地体长度/m	接地电阻/ Ω	
	经验公式	CDEGS
1	90.473	90.640
10	12.712	12.705
50	3.055	3.048
100	1.638	1.634
200	0.874	0.872

1.2 复合接地体接地电阻

复合接地体如图 2 所示，正方形方框边长为 12m，土壤电阻率为 1k Ω ·m，接地体直径为 10mm，接地体埋深为 0.8 m，射线长度取 40~100 m。复合接地体的接地电阻计算结果如表 2 所示。

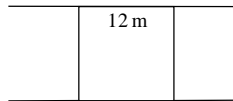


图 2 复合接地体
Fig. 2 Complex grounding body

表 2 复合接地体接地电阻的计算结果
Tab. 2 Calculation results of grounding resistance of complex grounding electrode

接地体长度/m	接地电阻/ Ω		相对误差/%
	经验公式	CDEGS	
40	17.498 7	14.163 0	23.55
60	13.274 6	10.768 0	23.28
80	10.976 3	8.764 4	25.24
100	9.313 8	7.430 2	25.35

注：相对误差=(经验公式计算结果-CDEGS 计算结果)/CDEGS 计算结果 $\times 100\%$ 。

由表 2 可知，经验公式计算结果与 CDEGS 计算结果相差较大，相对误差达到 20% 以上。

利用经验公式计算复合接地体的接地电阻时，以各导体交叉的自然节点进行导体分段，分段未得到细化，当假设该分段上电流均匀时，计算结果误差较大。

1.3 电流分布不均匀性分析

电流在接地体中流动时，若认为接地体由许多细小分段构成，则每个分段扩散到土壤中的电流是不完全相同的，即电流分布存在不均匀性。接地体 AB 及其分段如图 3 所示。

图 3(a)中， ρ 为土壤电阻率， l 为接地体 AB 的长度， I 为注入电流， dx 为导体分段， r 为导体分段到点 P 之间的距离。图 3(b)(c)中，AB 平均分为 5 个分段， $r_n(n=1, 2, 3, 4, 5)$ 为各导体分段中点到点 P_1 或 P_3 之间的距离，其中 P_1 、 P_3 分别为分段 1、3 的中点。

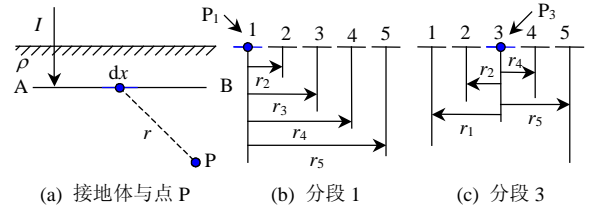


图 3 接地体 AB 及其分段
Fig. 3 Grounding body AB and its segments

本文采用反证法验证电流在导体中的不均匀分布特性。假设电流在导体 AB 上均匀分布，接地体 AB 埋深合适，则 dx 分段上的电流为 $I dx/l$ ，其在 P 点产生的电位升为

$$U_P = \frac{\rho I dx}{4\pi l r} \quad (1)$$

因此，各分段在 P_k 点产生的电位升为

$$U_{P_k} = \frac{\rho I}{4\pi l} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^5 \frac{dx}{r_n} \quad (2)$$

各分段在 P_1 、 P_3 点产生的电位升可表示为

$$U_{P_1} = \frac{\rho I}{4\pi l} \sum_{n=2}^5 \frac{dx}{r_n} = \frac{\rho I}{4\pi l} \sum_{n=2}^5 \frac{1}{r_n} = \frac{\rho I}{4\pi l} \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} \right) \frac{5}{l} \quad (3)$$

$$U_{P_3} = \frac{\rho I}{4\pi l} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq 3}}^5 \frac{dx}{r_n} = \frac{\rho I}{4\pi l} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq 3}}^5 \frac{1}{r_n} = \frac{\rho I}{4\pi l} \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) \frac{5}{l} \quad (4)$$

如果忽略导体的内阻和电感，则可将整个导体看作等位体，即导体上任意一点的电位是相等的，则 $U_{P_1} = U_{P_3}$ 。但由式(3)(4)可知， $U_{P_1} \neq U_{P_3}$ 。因此电流均匀分布的假设不成立，一般情况下，导体末端的扩散电流比中间部分的扩散电流要大。

为了准确计算接地体的接地电阻，可对导体进行细小分段处理，分段处理后每段导体的扩散电流系数不同，并假设各分段电流分布均匀。计算接地电阻时分段数越多，计算结果就越准确，同时计算量也会增大。适当增大分段数，使前后 2 次计算结果相对误差小于 1% 一般即可满足要求。

2 简化计算方法

对于分段后的各段导体，为了求解其自电阻，假设其处于电阻率为 ρ 的无限大均匀介质中，如图 4 所示。接地导体长度为 l ，半径为 a ，经过该导体扩散到介质中的电流为 I_0 。 $l \gg a$ 时，接地电阻近似计算中可忽略端部效应，即认为扩散到介质中的电流沿导体均匀分布，且集中在导体的轴线上，则沿导体轴线流散的电流密度为 $\delta = I_0/l$ 。

由图 4 可知，以圆柱坐标表示的空间任意一点 $N(r_N, 0, z_N)$ 的电位为

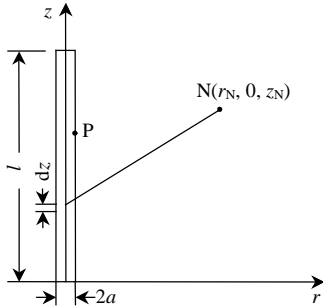


图 4 无限大均匀媒质中的接地体

Fig. 4 Grounding electrode in the infinite uniform medium

$$U_N = \frac{\rho}{4\pi} \int_0^l \frac{\delta dz}{\sqrt{(z_N - z)^2 + r_N^2}} = \frac{\rho\delta}{4\pi} (\operatorname{arsh} \frac{z_N}{r_N} - \operatorname{arsh} \frac{z_N - l}{r_N}) \quad (5)$$

为了提高计算精度，当导体分段数足够多时，假定电流沿各段导体均匀分布，可用该段导体各点电位的平均值作为该段导体的电位。令 r_N 为导体半径 a ， z_N 为图 4 中的 z 轴方向变量，积分得到图 4 导体的平均电位为

$$U = \frac{\rho\delta}{4\pi l} \int_0^l (\operatorname{arsh} \frac{z}{a} - \operatorname{arsh} \frac{z-l}{a}) dz = \frac{\rho I_0}{2\pi l} [\frac{a}{l} + \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + a^2}}{a} - \sqrt{1 + (\frac{a}{l})^2}] \quad (6)$$

则图 4 中分段导体的自电阻系数为

$$R_{ii} = \frac{U}{I_0} = \frac{\rho}{2\pi l} [\frac{a}{l} + \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + a^2}}{a} - \sqrt{1 + (\frac{a}{l})^2}] \quad (7)$$

接地体中任意直接或非直接连接的两导体分段 i 和 j 间互电阻系数用 R_{ij} 表示。在计算第 j 分段上电流 I_j 在第 i 分段上产生的平均电位时，要考虑大地界面的影响，因此要建立第 j 分段的镜像 j' ，如图 5 所示，并把 j 和 j' 在 i 分段上产生的电位求和，得到电流 I_j 在第 i 分段上产生的电位。根据式(5)可

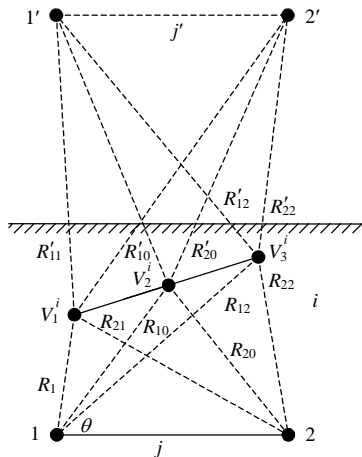


图 5 互电阻系数计算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of mutual resistance coefficient calculation

分别求得分段 j 和其镜像 j' 在 i 段上的两端点和中心点产生的电位 U_1^i 、 U_3^i 和 U_2^i ，3 电位值的平均值作为 R_{ij} 的近似值。由于对称性， $R_{ij} = R_{ji}$ 。

$$R_{ij} = (U_1^i + U_2^i + U_3^i) / 3I_j \quad (8)$$

式(8)已能满足一般的工程精度要求，如果需要进一步提高精度，则还可以增加 i 段的取点数。

假设注入电流为 I_{sum} ，忽略接地体自身的内阻和电感，接地网的地电位升为 U_{sum} ，各分段电流分别为 I_1, I_2, \dots, I_n ，对于规则接地网和放射型接地网，其电位系数矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} & -1 \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} & -1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & -1 \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} & -1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ U_{sum} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I_{sum} \end{bmatrix} \quad (9)$$

I_{sum} 为已知量，根据式(7)(8)可求得各导体分段的自电阻系数 R_{ii} 和互电阻系数 R_{ij} ，则由式(9)可求得 I_1, I_2, \dots, I_n 及 U_{sum} ，进而可求得接地电阻 $R = U_{sum} / I_{sum}$ 。

3 实例分析

3.1 矩形接地网接地电阻

水平布置的矩形接地网如图 6 所示，小网格尺寸为 $50\text{ m} \times 30\text{ m}$ ，导体直径为 10 mm ，注入电流为 1 kA ，接地网埋深 0.8 m 。根据第 2 节可得各分段上的电流 I_1, I_2, \dots, I_n ，图 6 给出了该接地网各分段的电流分布情况，电流单位为 A 。由于接地体之间存在屏蔽作用，接地网外围分段上的扩散电流较接地网中间各分段电流要大。土壤电阻率为 $500\ \Omega \cdot \text{m}$ 时，由第 2 节方法可得接地电阻 R 为 $6.1\ \Omega$ 。

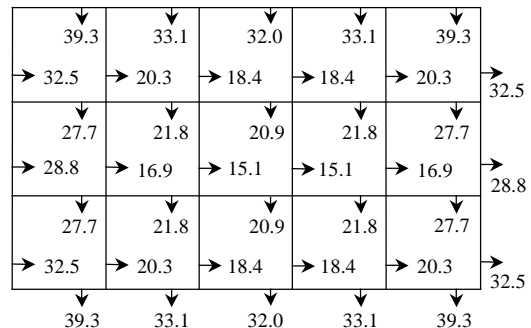


图 6 矩形接地网电流分布

Fig. 6 Current distribution in rectangle grounding grid

3.2 射线接地体接地电阻

输电线路杆塔通常采用射线接地体，8 射线接地体如图 7 所示，带接地小环(边长 3 m)的 8 射线接地体如图 8 所示。图 7、8 中，正方形方框边长为

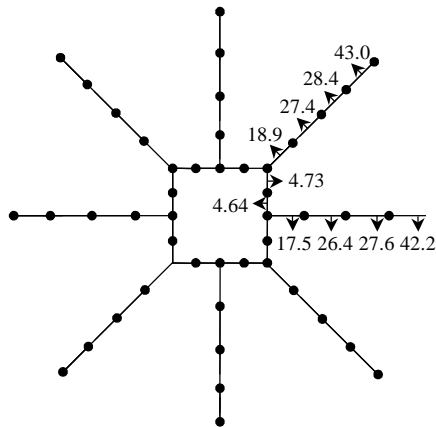


图 7 8 射线接地体及其电流分布
Fig. 7 Grounding electrode with 8 rays and its current distribution

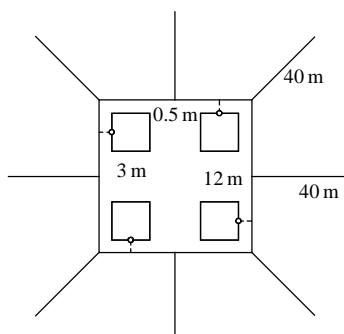


图 8 带接地小环的 8 射线接地体
Fig. 8 Grounding electrode with 8 rays and the ground ringlet

12m, 射线长度为 40m, 埋深为 0.8m。

对于图 7 接地体, 先对其进行分段处理。注入电流为 1kA 时, 计算接地体各分段电流分布情况, 图 7 给出了部分分段导体的电流分布情况, 分段导体电流单位为 A, 根据接地体对称性, 可推算出其他各分段的电流分布情况。

对于图 7 射线接地体, 本节将研究土壤电阻率、接地体半径、接地体埋深、射线长度、是否有接地小环等因素对其接地电阻的影响。具体内容如下:

1) 土壤电阻率对接地电阻的影响。

接地网埋深为 0.8m, 接地导体半径为 10mm, 根据第 2 节方法, 土壤电阻率不同时的接地体接地电阻如表 3 所示, 并给出了 CDEGS 的计算结果。由表 3 可知, 本文方法所得结果与 CDEGS 计算结

表 3 土壤电阻率不同时的接地电阻

Tab. 3 The ground resistance with different soil resistivity

土壤电阻率/(m·Ω)	接地电阻/Ω	
	CDEGS	本文方法
100	0.97	0.99
500	4.85	4.96
1 000	9.69	9.92
2 000	19.39	19.83
3 000	29.08	29.75

果吻合较好, 同时接地电阻会随着土壤电阻率的增大逐渐增大。

2) 接地体半径对接地电阻的影响。

土壤电阻率为 2.3kΩ·m, 接地体埋深为 0.8m, 根据第 2 节方法, 接地体半径不同时的接地电阻如表 4 所示, 并给出了 CDEGS 的计算结果。由表 4 可知, 本文方法所得结果与 CDEGS 计算结果吻合较好, 接地电阻随接地体半径的增大而减小。

表 4 接地体半径不同时的接地电阻

Tab. 4 The ground resistance with different radius

接地体半径/mm	接地电阻/Ω	
	CDEGS	本文方法
5	23.05	23.80
6	22.84	23.54
10	22.30	22.81
20	21.55	21.82
30	21.12	21.24

3) 接地体埋深对接地电阻的影响。

土壤电阻率为 2.3kΩ·m, 接地体半径为 10mm, 根据第 2 节方法, 埋深不同时的接地体接地电阻如表 5 所示, 并给出了 CDEGS 的计算结果。由表 5 可知, 本文方法所得结果与 CDEGS 计算结果吻合较好, 接地体接地电阻随着接地体埋深的增加逐渐减小。

表 5 埋深不同时的接地电阻

Tab. 5 The ground resistance with different buried depth

埋设深度/m	接地电阻/Ω	
	CDEGS	本文方法
0.5	22.80	23.31
0.6	22.61	23.12
0.7	22.44	22.95
0.8	22.30	22.81
1.0	22.0	22.57

4) 接地体射线长度的影响。

土壤电阻率为 2.3kΩ·m, 接地体埋深为 0.8m, 接地体半径为 10mm, 接地方框边长为 12m, 接地体射线长度不同时的接地电阻如表 6 所示, 并给出了 CDEGS 的计算结果。由表 6 可知, 本文方法所得结果与 CDEGS 计算结果吻合较好, 接地电阻随着射线长度的增加逐渐减小。

表 6 射线长度不同时的接地电阻

Tab. 6 The ground resistance with different ray length

射线长度/m	接地电阻/Ω	
	CDEGS	本文方法
30	27.58	28.27
40	22.30	22.81
60	16.22	16.56
80	12.81	13.07
100	10.62	10.78

5) 接地小环对接地电阻的影响。

由于地形等限制，接地射线的长度不可能无限伸长，在图 7 接地型式的基础上加上接地小环后(见图 8)，其接地电阻如表 7 所示，并给出了 CDEGS 的计算结果，其中，接地小环埋深为 2.8 m，加上接地小环后接地体总长增加了 44m。由表 7 可知，本文方法所得结果与 CDEGS 计算结果吻合较好，增加接地小环后，接地电阻有所降低，但效果不是很明显。

表 7 加上接地小环后的接地电阻

Tab. 7 The ground resistance with ground ringlet

土壤 电阻率/(m·Ω)	接地电阻/Ω			
	CDEGS		本文方法	
	无接地小环	有接地小环	无接地小环	有接地小环
100	0.97	0.96	0.99	0.98
500	4.85	4.78	4.96	4.88
1 000	9.69	9.56	9.92	9.77
2 000	19.39	19.12	19.83	19.54
3 000	29.08	28.77	29.75	29.30

6) 接地材料对接地电阻的影响。

不同材料接地体在不同土壤电阻率下的接地电阻如表 8 所示，并给出了 CDEGS 的计算结果。由表 8 可知，本文方法所得结果与 CDEGS 计算结果吻合较好，工频下接地体的内阻抗可忽略不记，因此材料不同对工频接地电阻没有影响。

表 8 材料不同时的接地电阻

Tab. 8 The ground resistance with different material

土壤 电阻率/(m·Ω)	接地电阻/Ω			
	CDEGS		本文方法	
	钢材	铜材	钢材	铜材
100	0.97	0.97	0.99	0.99
500	4.85	4.85	4.96	4.96
1 000	9.69	9.69	9.92	9.92
2 000	19.39	19.39	19.83	19.83
3 000	29.08	29.08	29.75	29.75

3.3 双环接地体接地电阻

双环接地体如图 9 所示。内、外圆环的直径分别为 ϕ_1 、 ϕ_2 ，2 圆环均由直径为 10 mm 的圆导体构成。双环接地体扩散到土壤中的总电流为 I_{sum} 。由

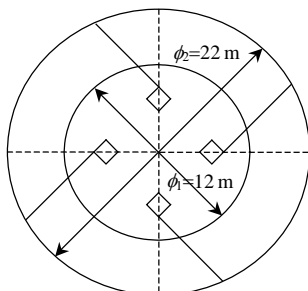


图 9 双环接地体

Fig. 9 The double-ring grounding electrode

于圆环的对称性，电流必然沿各圆环的周长方向均匀流散。当 ϕ_1 、 $\phi_2 \geq d$ 时，可假设电流集中由圆导体轴线散出，因此沿各圆环轴线流散的电流密度分别为 $\delta_1 = I_1 / \pi \phi_1$ 、 $\delta_2 = I_2 / \pi \phi_2$ ，其中 $I_{sum} = I_1 + I_2 + I_3$ ， I_3 为圆环间连接导体扩散的电流。

双环形可以看做由无穷多个小分段组成，第 2 节方法同样适用于求解双环接地体接地电阻。考虑到椭圆积分的复杂性，本文将圆环等效为正多边形，各分段以直线形式来求解，只要多边形边长足够多，计算精度会满足要求。

双环形接地型式内外环的半径分别为 6、11 m，接地体埋深为 0.8 m，接地体直径为 10 mm。在不同土壤电阻率下的双环形接地体接地电阻如表 9 所示，并给出了 CDEGS 的计算结果。由表 9 可知，本文方法所得结果与 CDEGS 计算结果吻合较好；若要使接地电阻小于 $20\Omega^{[20]}$ ，则该接地体尺寸适用于土壤电阻率为 $100\sim 750\Omega\cdot\text{m}$ 的环境；若土壤电阻率大于 $750\Omega\cdot\text{m}$ ，则需要增大双环半径来减小接地电阻。

表 9 双环形接地体接地电阻

Tab. 9 The ground resistance of double rings grounding body

土壤电阻率/(m·Ω)	接地电阻/Ω	
	CDEGS	本文方法
100	2.55	2.64
200	5.10	5.28
500	12.74	13.21
750	19.31	19.82
1 000	25.88	26.42

4 结论

本文根据接地体中扩散电流的不均匀性，对接地体进行了分段处理，并假设每分段导体的电流分布是均匀的，只要导体分段数足够多，则计算结果就会满足精度要求。本文方法计算结果与权威接地计算软件 CDEGS 计算结果相吻合，可应用于工程实际。工频接地电阻的计算结果可为接地体设计提供参考，杆塔冲击接地阻抗是提高线路耐雷水平的决定因素，因而下一步将对杆塔冲击电阻进行分析。

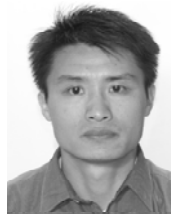
致谢

本文得到了广西电力工业勘察设计研究院“基于广西地质情况的输电杆塔接地的研究与设计(PB08002)”项目的资助，特此致谢!

参考文献

[1] 国家电网公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册

- [M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2002: 136-144.
- [2] IEEE Power Engineering Society. IEEE guide for generating station grounding[S]. New York: IEEE Power Engineering Society, 1995.
- [3] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 28-44.
- [4] 解广润. 电力系统接地技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996: 4-7.
- [5] Trlep M, Hamler A, Hribernik B. The analysis of complex grounding systems by FEM[J]. IEEE Trans on Magnetics, 1998, 34(5): 2521-2524.
- [6] 甘艳, 阮江军, 陈允平. 一维有限元与三维有限元耦合法在接地网特性分析中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 62-66.
Gan Yan, Ruan Jiangjun, Chen Yunping. Application of unidimensional finite element method(FEM) coupled with three dimensional FEM in characteristics analysis of grounding mesh property[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 62-66(in Chinese).
- [7] 张曾, 文习山. 任意块状结构土壤中接地的边界元法分析[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 170-174.
Zhang Zeng, Wen Xishan. Boundary element analysis on grounding systems in soil with arbitrary massive texture[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 170-174(in Chinese)
- [8] Dawalibi F, Mukhedkar D. Multi-step analysis of interconnected grounding electrodes[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(1): 114-119.
- [9] Dawalibi F, Mukhedkar D. Resistance calculation of interconnected grounding electrodes[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(1): 59-65.
- [10] Dawalibi F, Mukhedkar D, Bensted D. Measured and computed current densities in buried ground conductors[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(8): 4083-4091.
- [11] Dawalibi F, Mukhedkar D. Optimum design of substation grounding in a two layer earth structure part 3-study of grounding grids performance and new electrodes configuration[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(2): 267-272.
- [12] Nagar R P, Velazquez R, Loeloeian M, et al. Review of analytical methods for calculating the performance of large grounding electrodes part I: theoretical considerations[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(11): 3124-3133.
- [13] Loeloeian M, Velazquez R, Mukhedkar D. Review of analytical methods for calculating the performance of large grounding electrodes part II: numerical results[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(11): 3134-3141.
- [14] 鲁志伟, 文习山, 史艳玲, 等. 大型变电站接地网工频接地参数数值计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 89-93.
Lu Zhiwei, Wen Xishan, Shi Yanling, et al. Numerical calculation of large substation grounding grids in industry frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 89-93(in Chinese).
- [15] 苏杰, 吴广宁, 周炜明, 等. 异质土壤对地网接地电阻的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 166-169.
Su Jie, Wu Guangning, Zhou Weiming, et al. Effects of heterogeneous soil on grounding resistance of grounding mesh[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 166-169(in Chinese).
- [16] 胡登宇, 陈彩屏. 二层土壤中矩形复合接地网基础接地电阻计算[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 21-25.
Hu Dengyu, Chen Caiping. Calculation of foundation grounding resistance of rectangular compound grounding network in two layer soil[J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 21-25(in Chinese).
- [17] 常湧, 王明磊, 许崇武, 等. 接地网网内电位差的均衡优化[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 98-102.
Chang Yong, Wang Minglei, Xu Chongwu, et al. Equilibrium optimization of potential differences within grounding mesh[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 98-102(in Chinese).
- [18] 司马文霞, 李晓丽, 袁涛. 考虑土壤非线性特性的接地网冲击特性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 127-132.
Sima Wenxia, Li Xiaoli, Yuan Tao. Analysis of grounding grid impulse characteristics in frequency domain in consideration of soil non-linear characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 127-132(in Chinese).
- [19] 张波, 崔翔, 赵志斌, 等. 大型变电站接地网的频域分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 59-63.
Zhang Bo, Cui Xiang, Zhao Zhibin, et al. Analysis of grounding grids at large scale substations in frequency domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 59-63(in Chinese).
- [20] 中国南方电网有限责任公司. 110 kV~500 kV 架空输电线路设计技术规定[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 19-20.



厉天威

收稿日期: 2011-04-06.

作者简介:

厉天威(1980), 男, 博士, 工程师, 主要从事高压输电线路等方面研究, E-mail: ll_tt_ww@163.com;
何民(1976), 男, 高级工程师, 从事输电线路方面研究;

卢本初(1979), 男, 硕士, 从事高压输电线路方面研究;

程思勇(1979), 男, 硕士, 从事输电线路防雷、接地等方面研究。

(编辑 徐梅)