



# 基于IEEE Std.80-2000变电所接地网设计简析

刘纯, 唐苇苇

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 详细介绍了基于IEEE Std.80-2000变电所接地网设计的步骤, 简要分析并总结了相关设计经验。结合某工程进行计算举例, 同时用ETAP软件仿真, 验证计算结果。最后针对IEEE Std.80-2000和ETAP软件在工程中的实际应用给出了使用建议。

**关键词:** IEEE Std.80-2000; 变电所接地网; ETAP

中图分类号: U 653.95

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)10-0051-05

## Grounding grid design of AC substation based on IEEE Std. 80-2000

LIU Chun, TANG Wei-wei

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** The design procedures of the grounding grid of AC substation based on IEEE Std.80-2000 are expounded including engineering design experience summary. The specific example is provided in reference to one project. A grounding grid model is also defined and established in ETAP for calculation and verification of the equation outputs. Finally, technical recommendations are given for the engineering practice.

**Key words:** IEEE Std.80-2000; AC substation grounding grid; ETAP

变电所内集中了最重要的电气设备, 如发电机、变压器、开关设备等, 需要有良好的接地装置。变电所的接地装置一方面为了确保正常或者故障情况下变电所内电气设备不超过额定限值使用, 从而保证变电所持续稳定的运行; 另一方面为了保护设备周边的工作人员不会因电击而受到伤害, 发生人身事故。目前普遍采用的变电所接地装置就是变电所接地网。

2011年底国家相关部门在DL/T 621—1997《交流电气装置的接地》的基础上, 参考美国电气电子工程师学会变电站委员会(IEEE substations committee) 2000年1月发布的IEEE Std.80-2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding《交流变电站接地安全导则》(简称IEEE Std.80-2000)重新修订并出版了GB 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》。尽管如此, IEEE Std.80-2000

在数据分析、公式选择及解析上对于设计、施工等仍然具有较大的指导意义和参考价值, 在国际工程中的应用也更为广泛。

### 1 适用范围

IEEE Std.80-2000是用于指导实施交流变电所接地安全措施的标准, 提出了变电所接地网设计与计算的方法, 主要适用于常规户外或气体绝缘变电所、输电或配电变电所, 所涉及的计算方法也适用于变电所室内以及室内变电所的相关设计。但是, 不适用于直流变电所以及雷电冲击效应的分析。

### 2 设计步骤

#### 2.1 土壤电阻率的测量

结合变电所的位置以及周围环境的情况, 选

收稿日期: 2013-08-10

作者简介: 刘纯(1983—), 男, 工程师, 从事港口电气工程设计工作。

择合适的测量点并进行土壤电阻率的测量。根据土壤电阻特性，慎重选择进行下一步计算的土壤模型——单一型，还是双层型，甚至多层型。

### 2.2 接地装置导体的选择

接地导体的材料和截面选择除了满足机械强度和耐腐蚀的相关要求之外，还应当按照以下公式<sup>[1]</sup>满足热稳定检验要求：

$$A = I \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r}{(TCAP \times 10^{-4}) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (1)$$

式中： $A$ 为导体截面积（ $\text{mm}^2$ ）； $I$ 为流经接地装置导体的电流有效值（ $\text{kA}$ ，在进行接地网设计时，即等于接地网最大入地电流的有效值 $I_G$ ）； $K_0$ 为 $1/a_0$ 或 $1/a_r - T_r$ （ $^\circ\text{C}$ ）； $T_m$ 为最高允许温度（ $^\circ\text{C}$ ）； $T_a$ 为环境温度（ $^\circ\text{C}$ ）； $T_r$ 为材料常数的参考温度（ $^\circ\text{C}$ ）； $\alpha_0$ 为 $0^\circ\text{C}$ 时的热阻系数； $\alpha_r$ 为参考温度 $T_r$ 时的热阻系数； $\rho_r$ 为参考温度 $T_r$ 时接地导体的电阻率； $t_c$ 为电流持续时间（ $\text{s}$ ）； $TCAP$ 为单位热容量 $[\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})]$ 。

此外，为了简化计算过程，更多地使用以下简化公式<sup>[1]</sup>：

$$A = IK_f \sqrt{t_c} \quad (2)$$

式中： $K_f$ 为不同材料的接地装置导体的热稳定系数，见表1<sup>[1]</sup>。

表1 材料系数（ $K_f$ ）

| 材料     | 电导率 /% | 最高允许温度/ $^\circ\text{C}$ | $K_f$ |
|--------|--------|--------------------------|-------|
| 冷拉铜    | 100.0  | 1 083                    | 7.00  |
| 硬拉铜    | 97.0   | 1 084                    | 7.06  |
| 硬拉铜    | 97.0   | 250                      | 11.78 |
| 铜包钢棒   | 20.0   | 1 084                    | 14.64 |
| 不锈钢包钢棒 | 9.8    | 1 400                    | 14.72 |
| 镀锌钢棒   | 8.6    | 419                      | 28.96 |

### 2.3 允许的接触电压和跨步电压

对于体质量分别为50 kg和70 kg的人体，允许的接触电压和跨步电压分别是<sup>[1]</sup>：

$$E_{\text{touch}50} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

$$E_{\text{touch}70} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (4)$$

$$E_{\text{step}50} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (5)$$

$$E_{\text{step}70} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (6)$$

式中： $E_{\text{touch}}$ 为接触电压（ $\text{V}$ ）； $E_{\text{step}}$ 为跨步电压（ $\text{V}$ ）； $\rho_s$ 为表层土壤电阻率（ $\Omega \cdot \text{m}$ ）； $\rho$ 为下层土壤电阻率（ $\Omega \cdot \text{m}$ ）； $h_s$ 为表层土壤厚度（ $\text{m}$ ）； $t_s$ 为接地故障电流持续时间，与接地装置热稳定校验的接地故障等效持续时间（ $t_c$ ）取相同值； $C_s$ 为表层衰减系数，工程中可近似用下式进行计算<sup>[1]</sup>：

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0.09} \quad (7)$$

### 2.4 初步设计

根据之前得出的一些数据，对整个变电所接地导体回路开始设计并进行平面布置，包括考虑方便电气设备接地用的导体等，并估算接地网导体间距和接地极位置。

典型的变电所接地网建议如下：接地网导体采用4/0 AWG（ $107.2 \text{ mm}^2$ ）裸铜导体，埋深在地坪以下0.3~2.5 m，相邻导体间距3~7 m，接地网的长宽比例范围为1：1~1：3。

### 2.5 接地网电阻值（ $R_g$ ）

在假定为单一型土壤模型（土壤电阻率为唯一值）的前提下，接地网电阻值（ $R_g$ ）可以在以下3个公式<sup>[1]</sup>中选取一个进行计算：

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (8)$$

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A} + \frac{\rho}{L_T}} \quad (9)$$

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (10)$$

式中： $\rho$ 为土壤电阻率（ $\Omega \cdot \text{m}$ ）； $A$ 为接地网总面积（ $\text{m}^2$ ）； $L_T$ 为埋地导体的总长度（ $\text{m}$ ）； $h$ 为接地网的埋地深度（ $\text{m}$ ）。

实际应用中以上公式只适合在初步设计或者较早阶段对变电所接地网电阻值进行估算，计算值通常大于实际值。

以下情况之一时，需要考虑采用双层土壤模型（接地导体所处的上层和下层土壤层分别采用不同的土壤电阻率），甚至多层土壤模型进行分析；需要对电阻做更精确的计算；接地网面积较大或者接地网形状特殊；土壤电阻率明显分布不均匀。

其中，工程经验表明，在土壤电阻率分布并

不均匀的情况下仅仅利用单一型土壤模型下的接地电阻公式和典型接触/跨步电位差的计算公式进行设计时, 结果大多是实测的接地参数与设计不符, 此后追加的补救措施往往也是盲目的, 既可能造成投资的浪费, 也可能带来极大的安全隐患。因此必要时, 需要应用一些通用的专业设计软件进行土壤模型的建模分析。

## 2.6 接地网最大入地电流 ( $I_G$ )

### 2.6.1 接地故障对称电流 ( $I_f$ )

IEEE Std. 80-2000对于变电所的接地故障类型进行了分析, 提出以下观点: 尽管有些故障类型产生的对地短路电流可能更大, 但是在实际工程应用中发生的概率比较低, 因此通常仅考虑单相接地短路和两相接地短路两种接地故障。

在忽略变电所电阻的前提下, 接地故障对称电流 ( $I_f$ ) 由以下公式可得:  $I_f \approx 3I_0$  (11)  
式中:  $I_0$ 为接地故障的零序电流有效值。同时, 两相接地短路故障时,

$$I_0 = \frac{EX_2}{X_1(X_0 + X_2) + X_0X_2} \quad (12)$$

$$\text{单相接地短路故障时, } I_0 = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0} \quad (13)$$

式中:  $E$ 为相电压(V);  $X_1$ 为系统正序阻抗( $\Omega$ );  $X_2$ 为系统负序阻抗( $\Omega$ );  $X_0$ 为系统零序阻抗( $\Omega$ )。且当 $X_0X_1 > X_2^2$ 时, 单相接地短路的零序电流有效值较大;  $X_0X_1 < X_2^2$ 时, 两相接地短路的零序电流有效值较大。

### 2.6.2 接地网入地对称电流 ( $I_g$ )

设计接地网时, 应该按照接地网最大的入地电流进行设计, 同时接地故障对称电流 ( $I_f$ ) 经过分流后, 剩余部分通过接地网流入大地, 接地网入地对称电流 ( $I_g$ ) 由以下公式<sup>[1]</sup>可得:

$$I_g = S_f I_f \quad (14)$$

式中:  $S_f$ 为故障电流分流系数, 并假定 $S_f$ 在整个故障过程中是不变的。

### 2.6.3 接地网最大入地电流的有效值 ( $I_G$ )

不同的故障情况下, 根据不同的故障持续时间 ( $t_f$ ), 计算衰减系数 ( $D_f$ ), 接地网最大入地电流的有效值 ( $I_G$ ) 由以下公式<sup>[1]</sup>可得:

$$I_G = D_f I_g \quad (15)$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} (1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}})} \quad (16)$$

$$T_a = X / (\omega R) \quad (17)$$

$$60 \text{ Hz时, } T_a = X / (120 \pi R) \quad (18)$$

$$50 \text{ Hz时, } T_a = X / (100 \pi R) \quad (19)$$

式中:  $T_a$ 为直流时间常数(s);  $t_f$ 为故障持续时间(s)。这里的 $X/R$ 是给定故障类型的条件下, 故障点的阻抗比, 通常用系统次暂态阻抗来计算。在50 Hz和60 Hz下, 典型衰减系数的选取参见表2<sup>[1]</sup>。

表2 典型衰减系数

| 频率 /Hz | 故障持续时间 $t_f$ /s | 周期/s | 衰减系数 $D_f$ |       |       |       |
|--------|-----------------|------|------------|-------|-------|-------|
| 60     | 0.008 33        | 0.5  | 1.576      | 1.648 | 1.675 | 1.688 |
|        | 0.05            | 3    | 1.232      | 1.378 | 1.462 | 1.515 |
|        | 0.10            | 6    | 1.125      | 1.232 | 1.316 | 1.378 |
|        | 0.20            | 12   | 1.064      | 1.125 | 1.181 | 1.232 |
|        | 0.30            | 18   | 1.043      | 1.085 | 1.125 | 1.163 |
|        | 0.40            | 24   | 1.033      | 1.064 | 1.095 | 1.125 |
|        | 0.50            | 30   | 1.026      | 1.052 | 1.077 | 1.101 |
|        | 0.75            | 45   | 1.018      | 1.035 | 1.052 | 1.068 |
|        | 1.00            | 60   | 1.013      | 1.026 | 1.039 | 1.052 |
|        | 50              | 0.05 | 2.5        | 1.266 | 1.417 | 1.497 |
| 0.10   |                 | 5    | 1.148      | 1.269 | 1.356 | 1.417 |
| 0.20   |                 | 10   | 1.077      | 1.148 | 1.213 | 1.269 |
| 0.30   |                 | 15   | 1.052      | 1.101 | 1.148 | 1.192 |
| 0.40   |                 | 20   | 1.039      | 1.077 | 1.113 | 1.148 |
| 0.50   |                 | 25   | 1.031      | 1.062 | 1.091 | 1.120 |
| 0.75   |                 | 37.5 | 1.021      | 1.042 | 1.062 | 1.082 |
| 1.00   |                 | 50   | 1.016      | 1.031 | 1.047 | 1.062 |

## 2.7 接地电位升 ( $GPR$ )

通过以上分析之后, 由以下公式<sup>[1]</sup>计算地电位 ( $GPR$ ):  $GPR = I_G R_g$  (20)

如果计算出来的接地电位升 $GPR$ 小于允许的接触电压值 $E_{touch}$ , 则除了增加部分必要的设备接地之外, 初步设计阶段的接地网即可直接进入完善设计阶段。

## 2.8 接地网网孔电压<sup>[2]</sup> ( $E_m$ ) 和跨步电压 ( $E_s$ )

### 2.8.1 接地网网孔电压 ( $E_m$ )

接地网网孔电压是变电所内可能出现最严重的接触电压的地方, 并将依此作为进一步修改初步设计的重要基础。对于相邻导体间距相等的接地网, 网孔电压会沿接地网的中心区域向四角增

加。增加的速度取决于接地网的大小、接地极的数量和位置、平行导线的间距、土壤电阻率的分布等诸多因素。因此大多数情况下,四角网孔电压通常要高于中心区域网孔电压。接地网的网孔电压可按照以下公式<sup>[1]</sup>计算:

$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M} \quad (21)$$

其中

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (22)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[ \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[ \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right\} \quad (23)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (24)$$

式中:  $h_0$ 为接地网参考深度,一般取1 m。

对于在接地网四周有接地极的接地网,以及接地网四角上有接地极的接地网 $K_{ii}=1$ ,接地网有效长度(网孔电压)为

$$L_M = L_C + [1.55 + 1.22(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}})]L_R \quad (25)$$

对于没有接地极的接地网,或者接地极较少且没有分布在接地网四角和周围的接触的接地网

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{1}{2}}} \quad (26)$$

接地网有效长度(网孔电压)为:

$$L_M = L_C + L_R \quad (27)$$

式中:  $L_r$ 为单根接地极的长度(m);  $L_R$ 为所有接地极的总长度(m);  $L_C$ 为水平接地网中接地导体的总长度(m);  $L_M$ 为接地网的有效长度(网孔电压)(m);  $L_p$ 为接地网的周长(m);  $A$ 为接地网的面积(m<sup>2</sup>);  $L_x$ 为X轴方向上接地网的最长距离(m);  $L_y$ 为Y轴方向上接地网的最长距离(m);  $D_m$ 为接地网上任意两点的最长距离(m);  $D$ 为平行导体的间距(m);  $h$ 为接地网导体的埋深(m);  $d$ 为接地导体的直径(m);  $n$ 为形状系数,且

$$n = n_a n_b n_c n_d \quad (28)$$

$$n_a = \frac{2L_C}{L_p} \quad (29)$$

式中:  $n_b=1$ (正方形接地网);  $n_c=1$ (正方形或者长方形接地网);  $n_d=1$ (正方形、长方形或者L形接地网); 否则:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad (30)$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x L_y}{A} \right]^{\frac{0.74}{L_x L_y}} \quad (31)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (32)$$

### 2.8.2 跨步电压 ( $E_s$ )

跨步电压一般不是变电所内可能出现最严重的接触电压的地方,但是将决定覆盖在接地网上的高电阻率的材料,即变电所周边路面尤其是人行路面所采用的材料类型。

接地网的跨步电压可按照以下公式<sup>[1]</sup>计算:

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L_s} \quad (33)$$

其中,接地网的有效长度(跨步电压)为:

$$L_s = 0.75L_c + 0.85L_R \quad (34)$$

对于通常埋深( $h$ )在0.25 m <  $h$  < 2.5 m时,

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{(D+h)} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (35)$$

### 2.9 完善设计

如果前面步骤计算出来的接地网网孔电压( $E_m$ )和跨步电压( $E_s$ )均分别小于允许的接触电压( $E_{touch}$ )和跨步电压( $E_{step}$ ),则仅需再考虑增设部分设备专用接地线,变电所接地网设计完成,否则进入修改设计阶段。

### 2.10 修改设计

如果前面步骤计算出来的接地网网孔电压( $E_m$ )和跨步电压( $E_s$ )中任何一个大于允许的限值,需要对接地网进行修改。修改的方法包括:进一步降低整个接地网的电阻、减少导体间距、采取分流措施、限制短路故障电流的大小等,包括对特定区域采取限制进出的措施。

### 2.11 增补接地极、接地导体及其他措施

在满足了跨步电压和接触电压的限制要求之后,变电所接地网的设计基本完成。但是对于附近没有接地导体的电气设备,需要另外增加接地导体;部分避雷器、变压器中性点等接地处需要增设专门的接地极等。此外,变电所围栏、扶手、进出户管道以及电缆的绝缘层等处,仍需采取专门的接地措施,以最大限度地保证变电所运行稳定和工作人员的人身安全。



### 3 设计举例

中美洲某115 kV变电所接地网=70 m×70 m (投影面积为4 900 m<sup>2</sup>), 埋深0.5 m, 水平接地导体(4/0 AWG裸铜导体, 冷拉铜)采用等间距(7 m)布置, 20根7.5 m的接地极(铜包钢, 直径 $d=0.013$  m)分布在接地网四周。

经过土壤电阻率的现场测量, 可采用土壤电阻率 $\rho=400 \Omega \cdot \text{m}$ 均匀分布的单一型土壤模型。接地网表层采用高电阻率的碎石层(厚度0.1 m), 其电阻率值根据样品测试结果为 $\rho_s=2 500 \Omega \cdot \text{m}$ 。表层衰减系数 $C_s$ 为0.74。

通常选取体质量70 kg的人体作为允许接触电压和跨步电压的基准值, 允许的接触电压和跨步电压、接地网电阻以及接地网电位升GPR值见表3。

表3 允许接地网数据

| $R_g$<br>接地电阻/ $\Omega$ | GPR<br>接地电位升/V | 接触电压<br>允许值/V | 跨步电压<br>允许值/V |
|-------------------------|----------------|---------------|---------------|
| 2.75                    | 5 274          | 838.2         | 2 686.6       |

表5 变电所接地网总结报告

| $R_g$<br>接地电阻/ $\Omega$ | GPR<br>接地电位升/V | 接触电压  |       | 计算值<br>允许值 /% | 跨步电压    |       | 计算值<br>允许值 /% |
|-------------------------|----------------|-------|-------|---------------|---------|-------|---------------|
|                         |                | 允许值/V | 计算值/V |               | 允许值/V   | 计算值/V |               |
| 2.753                   | 4 008.3        | 837.6 | 553.4 | 66.1          | 2 684.3 | 419.1 | 15.6          |

从表5可以看出: 1) 接触电压、跨步电压的允许值与计算结果保持了较小的差别, 说明ETAP软件中的设定公式与IEEE Std.80-2000保持一致。2) 接地网接地电阻值与计算结果基本一致, 说明在单一型土壤模型中, ETAP软件较好地验证了IEEE Std.80-2000的计算结果。3) 其它数据与IEEE Std.80-2000计算结果有差异, 但并未影响最终设计, 这样的结果在工程应用中是可以接受的。

### 5 结论

总之, 对于单一型土壤模型, 通过IEEE Std.80-2000的计算公式得出的结果和ETAP接地网分析模块仿真出来的结果都较为准确, 并可以用来互相验证, 这在工程实际应用中也得到了证实。因此, 按照IEEE Std.80-2000中的设计步骤进行变电所接地网设计后, 并通过ETAP或者其它同类型的软件进行仿真分析并验证, 如能完全满足接触电压和跨步电压的要求, 则可以被认为是满

足了变电所接地安全的要求。由表3可见, 接地网电位升GPR大于接触电压的允许值, 因此要进一步校验接地网网孔电压(或接触电压计算值)和跨步电压值(表4)。

表4 校验接地网数据

| 电压   | 允许值/V   | 计算值/V | 计算值/允许值/% |
|------|---------|-------|-----------|
| 接触电压 | 838.2   | 708.6 | 84.5      |
| 跨步电压 | 2 686.6 | 548.9 | 20.4      |

由表4可见, 接地网网孔电压和跨步电压计算值均分别小于允许值, 设计校验完成。

### 4 仿真计算(ETAP)

ETAP是国际上公认功能较为全面的综合型电力及电气分析计算软件, 其接地网系统模块可以较为简便地搭建变电所接地网模型(包括建立单一型和双层型土壤模型)并进行验算分析, 对于设计过程具有较强的指导意义和实用价值。利用ETAP对以上设计举例进行建模仿真得出的总结报告见表5。

足了变电所接地安全的要求。

但对于双层型及多层型土壤模型, IEEE Std.80-2000并没有给出较为具有操作性的公式计算方法, ETAP软件目前也最多能分析双层型土壤模型下的变电所接地网。对于实际工程前期的设计来说, 只能依靠ETAP或者其它同类型的软件进行仿真分析, 在工程实施过程中进一步探索、验证, 针对特别重要的场所, 需要多次实测的结果进行修正。

### 参考文献:

- [1] IEEE Std. 80-2000, Guide for safety in AC substation grounding[S].
- [2] GB/T 50065-2011交流电气装置的接地设计规范[S].
- [3] 中国航空工业规划设计研究院.工业与民用配电设计手册[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2005.