

变电工程设计电气专业主设人工作手册 专题报告

变电站接地设计

中国电力工程顾问集团

华北电力设计院工程有限公司变电电气室

2011 年 12 月

目 录

1 概述	1
1.1 接地系统设计的一般步骤：	1
1.2 评价接地系统性能的指标体系	2
2 土壤电阻率的测量和分析方法	4
2.1 勘测站址土壤结构	4
2.2 土壤电阻率的测量	6
3 变电站的入地电流计算	8
3.1 站内短路故障时分流系数 S_{fl} 的计算方法	9
3.2 故障电流衰减系数	11
4 接地电阻、接触电压、跨步电压的计算	11
4.1 均匀土壤中接地系统的计算	11
4.2 等间距布置接地网的接触电压和跨步电压的计算	11
4.3 小结	14
5 接地网的优化设计和降阻技术	14
5.1 接地网的均压优化布置	15
5.2 降低接地电阻的方法	17
5.3 不同降阻技术的适用范围	24

1 概述

变电站接地系统设计主要包括以下内容：

- 1) 分析接地网性能的各项指标；
- 2) 土壤电阻率的测量方法和分析方法；
- 3) 计算变电站入地电流；
- 4) 接地电阻、接触电势、跨步电压计算和分析；
- 5) 接地网的优化设计和降阻措施。

1.1 接地系统设计的一般步骤：

1) 掌握工程地点的地形地貌、土壤的种类和分层状况。实测站址土壤电阻率，搜集地层土壤电阻率分布资料和关于土壤腐蚀性能的数据。

2) 根据设计水平年和远景年最大运行方式下一次系统电气接线、母线连接的输电线路状况、故障时系统的电抗与电阻比值等，确定设计水平年在非对称接地故障情况下最大的不对称电流有效值。工程初期时，应根据电网实际的短路电流和所形成的接地系统，校核初期时的接触电位差、跨步电位差和转移电位。当上述参数不满足安全要求时，应采取临时措施，保证初期变电站安全运行。

3) 根据有关建筑物的布置、结构、钢筋配置情况，确定可利用作为接地网的自然接地极。

4) 计算确定流过设备外壳接地线的电流和流过接地网的最大入地电流；计算确定接触电位差和跨步电位差的限值。

5) 通过热稳定校验，确定不同材质接地线和接地极的热稳定最小截面。

6) 通过防腐蚀校验最终确定接地线和接地极的材质和相应的截面，以满足接地工程的寿命要求。

7) 根据站址土壤结构及其电阻率和要求的接地网的接地电阻值，初步拟定接地网的尺寸及结构，计算接地网的接地电阻值和地电位升高，将其值与要求的限值比较，并通过修正接地网设计来满足要求。

8) 宜通过计算获得地表面的接触电位差和跨步电位差分布，将其值与要求的限值比较，如不满足要求，则应采取降低措施或采取提高允许值的措施予以解决。

9) 根据接地装置实测结果校验设计方案，当不满足设计要求时，应采取降阻均压措施。

1.2 评价接地系统性能的指标体系

接地系统设计的基本要求有两方面：一是人身安全；二是设备安全。从保护人身安全的角度，规程规定的相应指标是接触电势和跨步电势，从保护设备的角度，规程规定的相应指标是接地电阻或地电位升。接地电阻为接地系统的地电位升与通过接地系统流入地中电流的比值，它与土壤特性及接地体的几何尺寸有关。如图 1.2-1 所示，IEEE Std 80-2000 将几种危害人体与设备的安全电压的概念定义如下：

1) 地电位升(Grounding Potential Rise)：以无穷远处为零电位点的接地系统上的电压升高，用 GPR 表示。

2) 跨步电压(step voltage)：在双脚没有接触任何接地体的情况下，地表上距离为 1m (“行标”称作跨步电压差，距离为 0.8m，国标“交流电气装置的接地设计规范”送审稿规定为 1m) 两脚间的电位差。

3) 接触电压(touch voltage)：身体接触到接地体时的 GPR 值与站立处的地表电位之间的差值。站立处离设备距离为 1m (“行标”称作接触电压差，距离为 0.8m，国标“交流电气装置的接地设计规范”送审稿规定为 1m)。一般情况下，接触电压就是一只手与脚之间的电位差。

4) 网孔电压(mesh voltage)：接地导体和网孔中心点之间的电位差。因为网孔电压是变电站内最严重的接触电压，网孔电压一般用作接地设

计时的最大接触电压。

因此，评价接地系统的主要性能指标为：接地电阻、地电位升、接触电压和跨步电压。

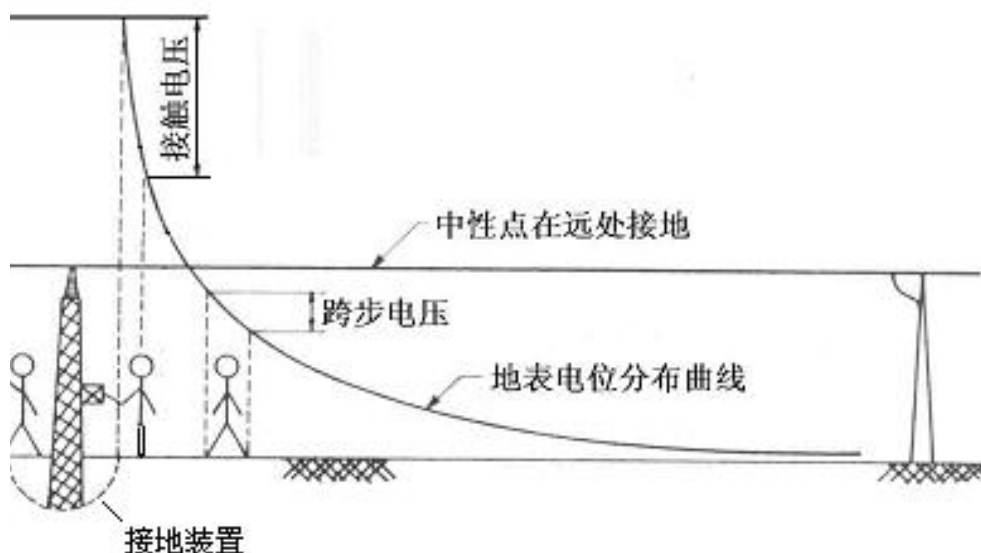


图 1.2-1 变电站接地系统几种安全电压的定义

1.2.1 接地装置的接地电阻

有效接地和低电阻接地系统中变电站的接地电阻一般应符合下式要求：

$$R \leq \frac{2000}{I_G} \quad (\text{式 1.2-1})$$

式中：

R ——考虑到季节变化的最大接地电阻， Ω ；

I_G ——接地故障电流中经接地网流入地中的电流最大值，包括对称的交流分量和单向的直流分量，A。

式中计算用的接地网最大入地电流，采用在接地装置内、外短路时，经接地装置流入地中并考虑直流分量的最大短路电流。该电流应按工程远景年的系统最大运行方式确定，并应考虑系统中各接地中性点间的短路电流分配，以及避雷线中分走的接地短路电流。

目前国标《交流电气装置的接地设计规范》处于报批阶段，其中对接地电阻规定 $R \leq 5000 / I_G$ 。

当接地装置的接地电阻不符合上式要求时，应逐项校验人身安全和设备安全相关要求。

1.2.2 接地网的均压要求

在 110kV 及以上有效接地系统和 6~35kV 低电阻接地系统发生单相接地或同点两相接地时，变电站接地网的接触电位差和跨步电位差不应超过由式(1.2-2)和 (1.2-3) 计算得到的数值：

$$U_t = \frac{174 + 0.17 \rho_s C_s}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{式 1.2-2})$$

$$U_s = \frac{174 + 0.7 \rho_s C_s}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{式 1.2-3})$$

式中：

U_t ——接触电位差允许值，V；

U_s ——跨步电位差允许值，V；

ρ_s ——地表面的电阻率， $\Omega \cdot m$ ；

C_s ——表层衰减系数；

t_s ——接地故障电流持续时间，s。

2 土壤电阻率的测量和分析方法

2.1 勘测站址土壤结构

大地的电阻率变化范围很广，影响土壤电阻率的主要因素有：土壤的类型、含水量及温度、土壤水溶解的盐的种类及含量、土壤的颗粒尺寸及其分布、松紧程度以及外加电场等。在接地工程中经常遇到电阻率为几十 $\Omega \cdot m$ 至数千 $\Omega \cdot m$ 的土壤。表 2.1-1 列出了常见地质条件的电阻率参考值。

表 2.1-1 土壤电阻率

类别	名 称	电阻率近似值 ($\Omega\cdot m$)	不同情况下电阻率的变化范围		
			较湿时(一般地区、多雨区)	较干时(少雨区、沙漠区)	地下水含盐碱时
土	陶粘土	10	5~20	10~100	3~10
	泥炭、泥灰岩、沼泽地	20	10~30	50~300	3~30
	捣碎の木炭	40	—	—	—
	黑土、园田土、陶土	50	30~100	50~300	10~30
	白垩土、粘土	60			
	砂质粘土	100	30~100	50~300	10~30
	黄土	200	100~200	250	30
	含砂粘土、砂土	300	100~1000	1000 以上	30~100
	河滩中的砂	—	300	—	—
	煤	—	350	—	—
	多石土壤	400	—	—	—
	上层红色风化粘土、下层红色页岩	500(30%湿度)	—	—	—
	表层土夹石、下层砾石	600(15%湿度)	—	—	—
砂	砂、砂砾	1000	250~1000	1000~2500	—
	砂层深度大于10m	1000	—	—	—
	地下水较深的草原				
	地面粘土深度不大于1.5m、底层多岩石				
岩石	砾石、碎石	5000	—	—	—
	多岩山地	5000	—	—	—

	花岗岩	200000	—	—	—
混凝土	在水中	40~55	—	—	—
	在湿土中	100~200	—	—	—
	在干土中	500~1300	—	—	—
	在干燥的大气中	12000~18000	—	—	—
矿	金属矿石	0.01~1	—	—	—

2.2 土壤电阻率的测量

在实际工程中很少有均匀的土壤,一般测量得到的是土壤等值电阻率或土壤视在电阻率。一般来说,土壤的结构可以分为近似的均匀土壤、水平分层和垂直分层土壤三种,水平分层和垂直分层的土壤结构如图 2.2-1 所示。

(a) 水平分层土壤

(b) 垂直分层土壤

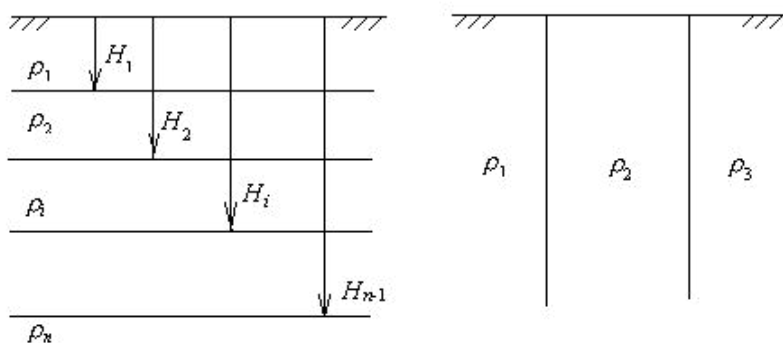


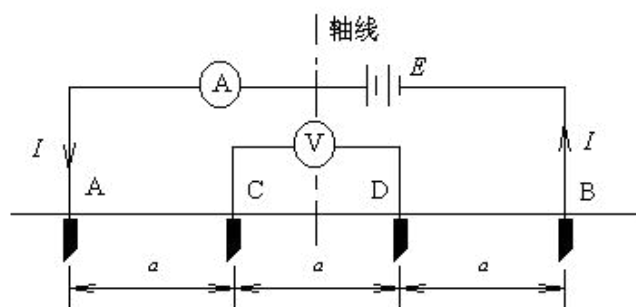
图 2.2-1 土壤的水平分层和垂直分层

土壤电阻率的传统测量方法有土壤试样分析法和电测深法。其中电测深法包括两极法、三级法和四极法。目前,我国接地电阻测量国家标准推荐采用的土壤电阻率测量方法是四极法。

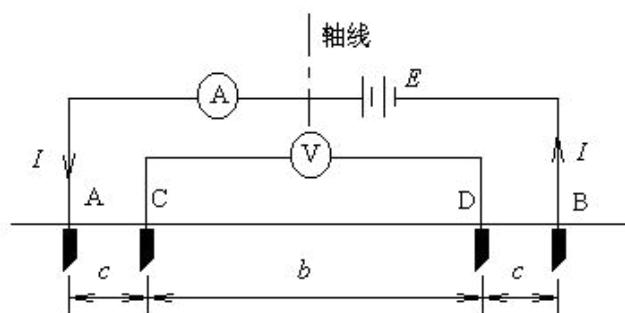
四极法是一种让电流通过两个电流极流入土壤,再用两个电压极测出其附近某两点之间的电位差,进而确定土壤电阻率的方法。这种方法测试工作量较小,且测试结果准确度高,可以通过数值方法分析土壤分

层的具体情况，因而得到了广泛应用。

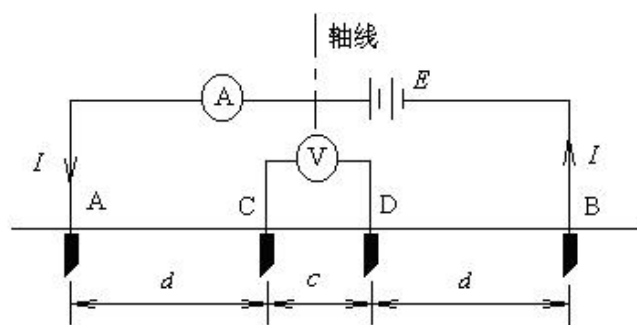
采用四极法测量电阻率时有多种形式的电流极和电位极的布置方案，工程上应用较多的有四种电极布置方案，如图 2.2-1 所示。无论哪一种布置方案，都必须满足一个基本条件：保持四个电极在一条直线上排列。



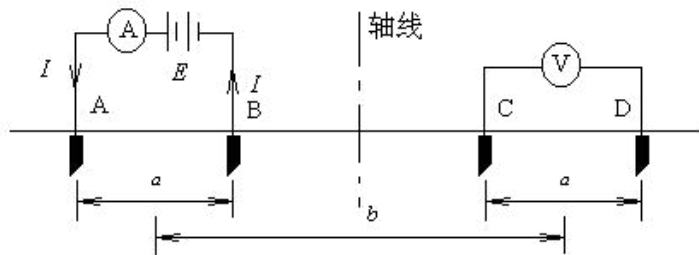
(a) 温纳电极布置



(b) 非等间距或 Schlumberger-Palmer 电极布置



(c) 施兰伯格 (Schlumberger) 电极布置



(d) 电流极与电位极两侧布置

图 2.2-1 四极法的电极布置

在现场中应用较多的电极布置方案是沿直线保持四个电极间的距离相同，即如图 2.2-1(a)所示的温纳(Wenner)电极布置。设 a 为两邻近电极间距，则以 a 表示的土壤视在电阻率为：

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (\text{式 2.2-1})$$

式中 $R = U_{CD}/I$ 。实际操作中，四个电极通常置于间距为 a 的直线上，入地深度不超过 $0.1a$ ，因而可假定 $b=0$ ，则公式简化为：

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (\text{式 2.2-2})$$

将不同极间距离时测量得到的土壤电阻率数据与极间距 a 的关系绘成曲线，即可判断中心点附近地下的土壤分层情况该，包括各层的电阻率和深度。

3 变电站的入地电流计算

现行规范中，入地短路电流只考虑交流分量，新规范规定(未颁布)，还要考虑故障电流直流分量的影响，设计接地网时应按照接地网最大入地电流 I_G 进行设计。确定 I_G 的具体步骤为：

- 确定可能产生故障电流流入接地网的位置和接地故障类型(如站内、站外、中性点是否接地等)。
- 确定接地故障对称电流 I_f 。
- 计算衰减系数 D_f ，将其乘以故障电流的稳态分量，得到考虑直

流偏移的故障电流 $I_F = I_f \times D_f$ 。

d) 根据系统线路设计确定故障电流分流系数 S_f ，进而计算接地网最大入地电流 $I_G = I_F \times S_f$ 。

入地故障电流为： $I_G = D_f \times S_f \times C_p \times I_f$

式中：

I_f ——接地故障对称电流，A；

S_f ——分流系数，需要根据系统的结构计算得到；

C_p ——考虑到系统将来的发展的规划系数，如果不考虑扩建可取 1；

D_f ——衰减系数。

故障电流分流系数包括站内短路故障和站外短路故障两种情况。

3.1 站内短路故障时分流系数 S_{f1} 的计算方法

对于站内单相对地短路，假设每个档距内的导线参数和杆塔接地电阻均相同，其示意图可表示为：

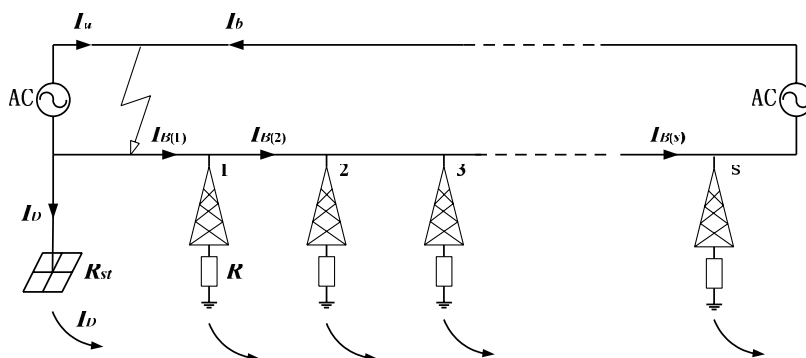


图 3.1-1 站内短路故障示意图

此时不同位置的避雷线上流过的零序电流为：

$$I_{B(n)} = \left[\frac{e^{\beta(s+1-n)} - e^{-\beta(s+1-n)}}{e^{\beta(s+1)} - e^{-\beta(s+1)}} \left(1 - \frac{Z_m}{Z_s} \right) + \frac{Z_m}{Z_s} \right] \cdot I_b$$

其中

$$e^{-\beta} = \frac{1 - \sqrt{\frac{Z_s \cdot D}{12 \cdot R_{st} + Z_s \cdot D}}}{1 + \sqrt{\frac{Z_s \cdot D}{12 \cdot R_{st} + Z_s \cdot D}}}$$

式中： Z_s ——单位长度的避雷线阻抗，（ Ω/km ）；

$$Z_s = \frac{3r_s}{k} + 0.15 + j0.189 \ln \frac{D_g}{\sqrt[k]{a_s D_s^{k-1}}}$$

$$Z_m = 0.15 + j0.189 \ln \frac{D_g}{D_m},$$

Z_m ——单位长度的相线与避雷线之间的互阻抗，（ Ω/km ）；

D ——档距的平均长度，（ km ）；

r_s ——单位长度避雷线的电阻（ Ω/km ）；

a_s ——避雷线的将电流化为表面分布后的等值半径（ m ）；

钢芯铝绞线： $a_s = 0.95 a_0$ ；

有色金属线： $a_s = (0.724 \sim 0.771) a_0$ ；

钢绞线： $a_s = a_0 \times 10^{-6.9 X_{ne}}$ ；

X_{ne} ：单位长度的内感抗（ Ω/km ）；

k ——避雷线的根数；

D_s ——避雷线之间的距离（ m ）；

D_m ——避雷线之间的几何均距（ m ）；

单避雷线时： $D_m = \sqrt[3]{D_{1A} D_{1B} D_{1C}}$ ；

双避雷线时： $D_m = \sqrt[6]{D_{1A} D_{1B} D_{1C} D_{2A} D_{2B} D_{2C}}$ ；

D_g ——避雷线对地的等价镜像距离， $D_g = 80\sqrt{\rho}$ （ m ）；

ρ ——大地等值电阻率（ $\Omega \cdot \text{m}$ ）。

当 $n=1$ 时，可求得分流系数 S_{f1} 为：

$$S_{f1} = \frac{I_{B(1)}}{I_b} = \frac{e^{\beta \cdot s} - e^{-\beta \cdot s}}{e^{\beta(s+1)} - e^{-\beta(s+1)}} \left(1 - \frac{Z_m}{Z_s}\right) + \frac{Z_m}{Z_s}$$

当 $s > 10$ 时， S_{f1} 可简化为：

$$S_{f1} = e^{-\beta} \cdot \left(1 - \frac{Z_m}{Z_s}\right) + \frac{Z_m}{Z_s}$$

3.2 故障电流衰减系数

衰减系数 D_f 定义为接地故障不对称电流有效值 I_f 与接地故障对称电流有效值 I_f 的比值。表 3.2-1 中给出了 D_f 与部分 t_f 和 X/R 的关系。

表 3.2-1 典型的衰减系数 D_f 值

故障时延 t_f (s)	50Hz 对 应的周期	衰减系数 D_f			
		$X/R = 10$	$X/R = 20$	$X/R = 30$	$X/R = 40$
0.05	2.5	1.2685	1.4172	1.4965	1.5445
0.10	5	1.1479	1.2685	1.3555	1.4172
0.20	10	1.0766	1.1479	1.2125	1.2685
0.30	15	1.0517	1.1010	1.1479	1.1919
0.40	20	1.0390	1.0766	1.1130	1.1479
0.50	25	1.0313	1.0618	1.0913	1.1201
0.75	37.5	1.0210	1.0416	1.0618	1.0816
1.00	50	1.0158	1.0313	1.0467	1.0618

4 接地电阻、接触电压、跨步电压的计算

4.1 均匀土壤中接地系统的计算

水平接地网的布置分为等间距布置和不等间距布置。其中不等间距布置指接地网接地极从中间到边缘按照一定的规律由稀到密布置，以使接地网接地极上分布的电流均匀，达到均衡地表电位分布、降低接触电位差和跨步电位差的目的。

4.2 等间距布置接地网的接触电压和跨步电压的计算

1) 最大接触电位差

网孔电压表征接地网的一个网孔内可能出现的最大接触电位差，即

最大接触电位差为最大网孔电压。接地网初始设计时的网孔电压为：

$$U_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M}$$

式中：

ρ ——土壤电阻率 $\Omega \cdot m$ ；

K_m ——网孔电压几何校正系数；

K_i ——接地网不规则校正系数，用来考虑到推导 K_m 时的假设条件引入的误差，这个系数在设计时只考虑周边网孔，由于这里有最严重的接触和跨步电位差出现；

I_G ——接地网的最大入地电流。

几何校正系数 K_m 为：

式中：

D ——接地网平行导体间距；

d ——接地网导体直径，扁导体的等效直径 $d=b/2$ ， b 为扁导体宽度，等边角钢的 $d=0.84b$ ， b 为角钢边宽，不等边角钢的 $d=0.71\sqrt{b_1 b_2 (b_1^2 + b_2^2)}$ ， b_1 和 b_2 为角钢两边宽；

h ——接地网埋深；

K_{ii} ——考虑内部导体对角网孔电压影响的校正加权系数。

上式对埋深在 0.25~2.50m 范围的接地网有效。当接地网具有沿接地网周围布置的垂直接地极、或在接地网的四角布置垂直接地极时，沿接地网四周和整个接地网布置的垂直接地极时， $K_{ii}=1$ 。

对无接地棒或只有少数接地棒，并且接地棒不是沿外周或四角布置时：

$$K_{ii} = 1 / (2n)^{2/n}$$

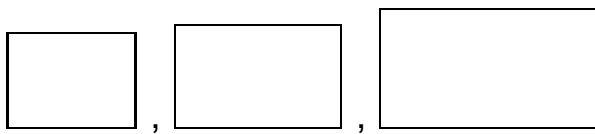


式中：

n —矩形或等效矩形接地网一个方向的平行导体数。采用下式来考虑矩形和不规则形状的接地网：

$$n = n_a n_b n_c n_d$$

对于方形接地网， $n_b = 1$ ；对于方形和矩形接地网， $n_c = 1$ ；对于方形、矩形和 L 形接地网， $n_d = 1$ 。对于其他情况：



$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}$$

式中：

L_c ——水平接地网导体的总长度，m；

L_p ——接地网的周边长度，m；

A ——接地网面积， m^2 ；

L_x ——接地网 x 方向的最大长度，m；

L_y ——接地网 y 方向的最大长度，m；

D_m ——接地网上任意两点间最大的距离，m。

如果进行简单的估计，在计算 K_m 和 K_i 以确定网孔电压时可以采用 $n = \sqrt{n_1 n_2}$ ， n_1 和 n_2 为 x 和 y 方向的导体数。

接地网不规则校正系数为：

$$K_i = 0.644 + 0.148n$$

对于无垂直接地极的接地网，或只有少数分散在整个接地网的垂直接地极，这些垂直接地极没有分散在接地网四角或接地网的周边上，有效埋设长度 L_M 为：

$$L_M = L_c + L_R$$

式中： L_R ——所有垂直接地极的总长度。

对于在四角有垂直接地极的接地网,或沿接地网四周和整个接地网布置的垂直接地极时,有效埋设长度 L_M 为



式中:

L_r ——为每个垂直接地棒的长度, m。

2) 最大跨步电位差

跨步电位差 U_s 与几何校正系数 K_S 、校正系数 K_i 、土壤电阻率 ρ 、接地系统单位导体长度的平均流散电流有关:

$$U_s = \frac{\rho I_G K_S K_i}{L_s}$$

式中:

I_G ——接地网入地故障电流;

L_s ——埋入地中的接地系统导体有效长度可用下式计算:

$$L_s = 0.75L_c + 0.85L_R$$

变电站接地系统的最大跨步电位差出现在平分接地网边角直线上,从边角点开始向外 1 m 远的地方。对于一般埋深 h 在 0.25~2.5 m 的范围的接地网, K_S 可以采用下式计算:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1-0.5^{n-2}}{D} \right)$$

4.3 小结

通过上述计算过程主要了解对接地各项指标的影响因素,对于分层土壤模型或不等间距接地系统设计,通常无法用解析法计算,而采用数值计算方法进行分析。

5 接地网的优化设计和降阻技术

5.1 接地网的均压优化布置

在高电阻率地区，降低接地电阻比较困难，因此尽量使地表电位分布均匀则显得相当重要。接地网的均压优化布置就是一种使地表电位分布均匀的技术。

5.1.1 不等间距布置的原理

普通接地网一般是采用等间距布置，即接地导体之间的间距基本相等。而不等间距布置接地网的原理是考虑到接地网对中间部分导体的屏蔽性，接地导体的布置应是中间稀、往接地网四周则应布置得比中间部分密些，使所有接地导体得到充分利用。等间距布置的接地网和不等间距布置的接地网如图 5.1-1 所示。

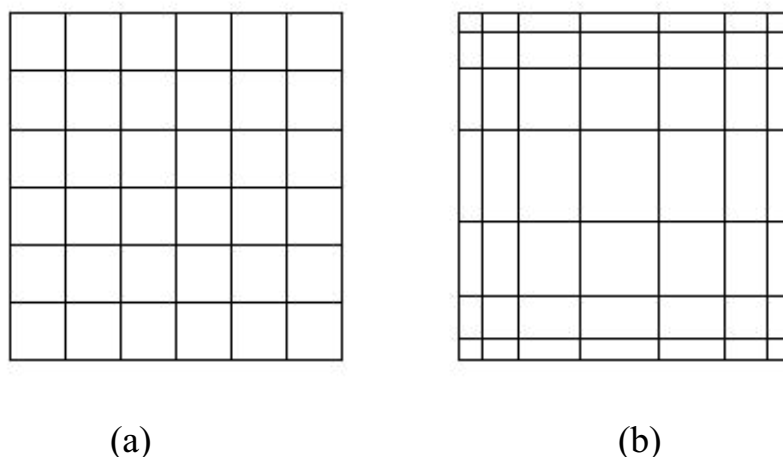


图 5.1-1 等间距布置(a)和不等间距布置(b)的接地网

5.1.2 不等间距布置的些特点：

1) 充分利用接地导体

对于面积取 $200 \times 200 \text{ m}^2$ (典型 220kV 变电站)，埋深为 0.8m 的水平接地网，土壤电阻率为 $200 \Omega \cdot \text{m}$ ，水平导体不等间距布置时的电流分布如图 5.1-2 所示，图中只给出了 1/4 接地网的结果。等间距布置的接地网中每段导体的泄露电流密度数值相差很大，边缘导体的泄露电流密度大约是中间导体的四倍左右(有时能达到十几倍)；而不等间距布置的接地网中，增大了中间导体的泄露电流密度分布，相应降低了边缘导体的

泄露电流密度分布，使得每段导体的泄露电流密度分布比较均匀，边缘导体的泄露电流密度与中间导体数值相差不大。因此，采用不等间距后，各导体的电流分布均匀，能有效改善电位分布，降低接触电压和跨步电压。

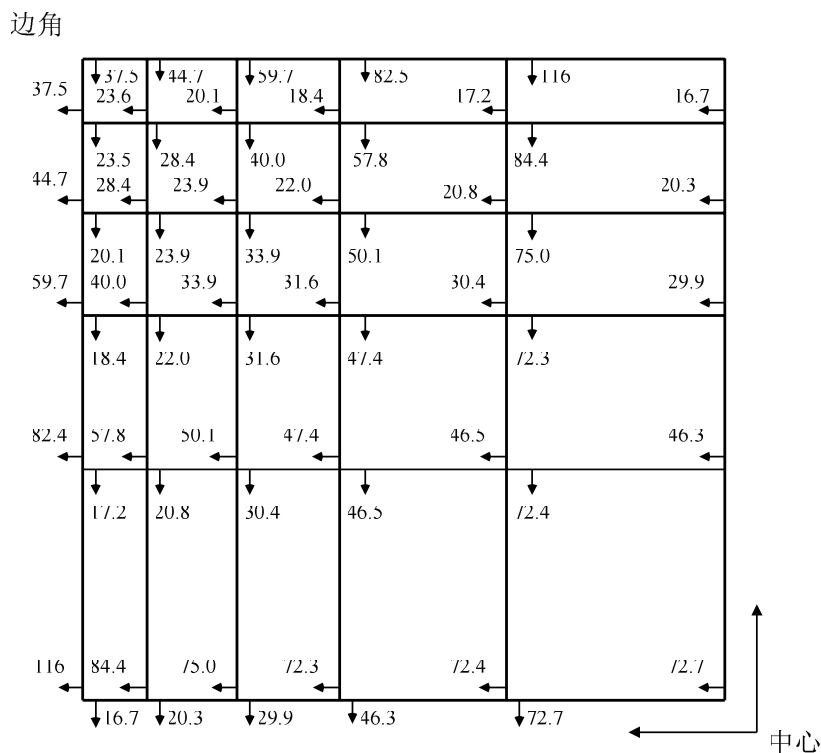


图 5.1-2 采用不等间距布置时接地网各接地导体泄漏电流分布

2) 均匀地表面的电位分布，提高安全水平

按等间距布置的接地网，地表面电位分布很不均匀，采用不等间距布置的接地网可均匀土壤表面的电位分布，降低变电站内最大地电位差和跨步电压，提高安全水平。分析表明采用等间距布置水平接地网后，边角网孔电位则远高于中心网孔电位，这里要高 179.3%。如果使用相同量的接地体材料，采用不等间距布置时，最大与最小网孔电位仅相差 1.37%。因此采用不等间距布置的接地网能均匀地表面的电位分布，使各网孔电位大致相同。

如图 5.1-3 和图 5.1-4 所示分别为 $150 \times 150 \text{m}^2$ 的水平接地网，在土

壤电阻率为 $200\Omega\cdot\text{m}$ 时，采用等间距布置和采用不等间距布置时的地表接触电压分布曲线。采用等间距布置接地网时，一方面接触电压高，另一方面接触电压不均匀。而采用不等间距布置时，一方面能降低接触电压，另一方面能均匀地表的接触电压分布。图 5.1-3 所示采用等间距布置时的最大接触电压为 1.930 kV ，而图 5.1-4 所示的接地网采用不等间距布置时的最大接触电压为 1.122 kV ，降低了 42% ，由此可见，按不等间距布置的接地网，地表面最大接触电压大幅度地减小(有时可达 $50\sim 60\%$)，采用不等间距布置能提高接地网的安全水平。

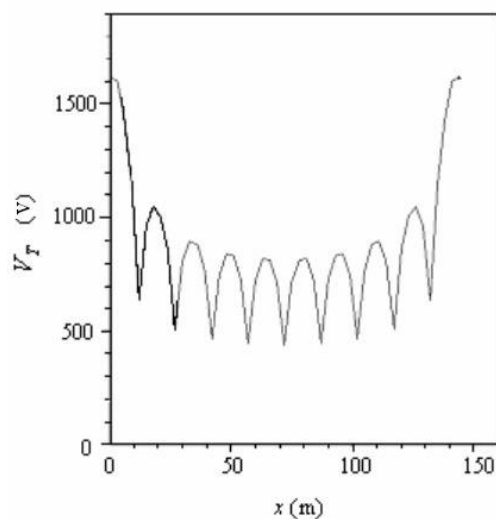


图 5.1-3 等间距布置的接触电压分布

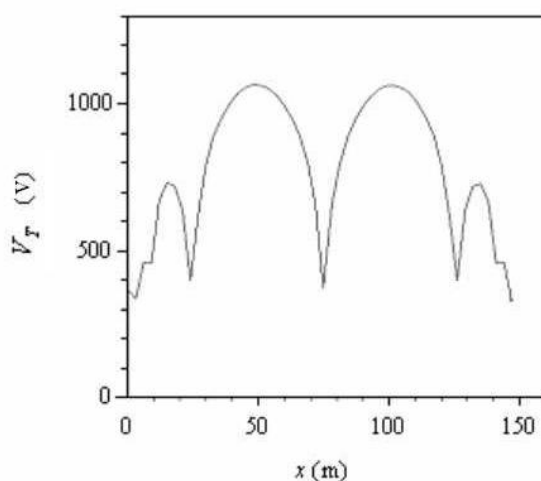


图 5.1-4 不等间距布置的接触电压分布

5.2 降低接地电阻的方法

常用降阻措施主要包括：扩大接地网面积、引外接地、增加接地网的埋设深度、长垂直接地极、深井接地和局部换土等。应当注意各种降阻方法都有其应用的特定条件，针对不同地区、不同条件采用不同的方法才能有效地降低接地电阻，另外各种方法也不是孤立的，在使用过程中必须相互配合，以获得明显的降阻效果。

1) 扩大变电站接地网的面积

变电站的接地电阻可以用下式计算：
$$R = \frac{0.443\rho}{\sqrt{A}} + \frac{\rho}{L} \approx \frac{0.5\rho}{\sqrt{A}}$$

式中 L 为接地极的总长度（包括水平与垂直的），单位为 m ； A 为接地网的面积，单位为 m^2 。

从式中可以看出，变电站接地网的接地电阻与接地网面积的平方根成反比，地面积越大，其接地电阻也就越低。无疑增大变电站接地网的面积是降低其接地电阻的一种行之有效的方法，但操作性差。

2) 外引接地

外引接地是指将变电站主接地网与主接地网区域以外某一低土壤电阻率区域敷设的辅助接地网相连的方法，以达到降低整个接地系统接地电阻的目的。应当注意，在变电站和远处接地设备之间存在显著的电位差，特别是在雷电等高频冲击作用时电位差将更大，因此应确保主接地网与引外接地有多根接地导体连接。

3) 增加接地网的埋设深度

埋设深度指水平接地网埋设处到地面的距离。在接地网其它参数不变的情况下增加接地网的埋深会使接地电阻减小，但其降阻效果不是很明显，这在高土壤电阻率地区更是如此，因此工程中一般不采用这种方法。

4) 长垂直接地极

土壤的电阻率通常沿纵深和横向分布都是不均匀的，就纵深来说，

不同深度土壤的电阻率是不同的。一般接近地面几米以内的电阻率相对要高些，并且不稳定，随季节气候的变化而变化，土壤越深越稳定。特别是在表层为高土壤电阻率地区，采用长垂直接地极与主接地网相连是一种有效降低接地电阻的方法。在有地下含水层的地方，接地极可能深入穿透水层，这时降阻效果将更好。长垂直接地极不受气候、季节条件的影响，除了降阻以外，还可以克服场地窄小的缺点，这在城市和山区是一种行之有效的方法。

在以往的接地设计中，垂直接地极的长度大多只有几米到十几米，而且遍布整个水平接地网布置。可实际降阻效果并不明显，其根本原因是由于垂直接地极长度及布置方式选择不当，所采用的垂直接地极的降阻作用大多被水平接地网所屏蔽。对于长垂直接地极，可遵循如下几点设计原则：

a) 为了减小水平接地网对垂直接地极和垂直接地极之间的屏蔽效应，以提高垂直接地极的利用系数，垂直接地极宜沿接地网的外围导体布置。如果条件许可的话，尽可能将垂直接地极向站外布置，让垂直接地极间的距离大于或等于垂直接地极的长度。

b) 垂直接地极的根数及实际长度的选择可根据水平接地网接地电阻的大小和实际的降阻要求以及地质结构来确定，其基本原则是在地中无低电阻率层时，垂直接地极的长度一般不得小于水平接地网的等效半径，否则降阻效果不明显。垂直接地极的根数一般应在 4 根以上。但应考虑到如下两点：一是垂直接地极根数增加到一定值时降阻率趋于饱和，二是长垂直接地极的施工费用比较高。

c) 在高土壤电阻率地区，为了保证明显的降阻效果，埋设垂直接地极的深井中宜灌注低电阻率降阻材料，考虑到深井的深度，最好采用压力机灌注浆状低电阻率材料。如果变电站处于岩石较多的地区，可采用下面介绍的爆破接地技术，将深井周围的岩石爆裂，使低电阻率材料

渗透到裂缝中，进一步增加降阻效果。

5) 爆破接地技术

爆破接地技术是近年发展起来的一种新的接地施工技术，它能有效地降低高土壤电阻率地区接地系统的接地电阻。其基本原理是采用钻机在地中垂直钻一定直径、深度为 10~100m 的孔，在孔中插入接地电极，然后沿孔的整个深度隔一定距离安放一定量的炸药来进行爆破，将岩石爆裂、爆松，接着用压力机将调成浆状的降阻剂压入深孔中及爆破制裂产生的缝隙中，以达到通过降阻剂将地下巨大范围的土壤内部沟通及加强接地电极与土壤或岩石的接触，从而达到较大幅度降低接地电阻的目的。

单根垂直接地极采用深孔爆破制裂 - 压力灌降阻剂法之后形成如图 5.2-1 所示的填充降阻剂的区域，降阻剂呈树枝状分布在爆破制裂产生的缝隙中，填充了降阻剂的裂隙向外延伸很远。对于变电站接地网，在接地网不同位置布置采用爆破法的垂直接地极，形成一个一定尺寸的立体接地网，如图 5.2-2 所示。在这个立体接地网内，水平接地网与垂直接地极连接，垂直接地极通过填充了降阻剂的裂隙广泛沟通，形成由降阻剂组成的网络，另外通过填充了降阻剂的裂隙向外延伸很远，形成一个内部互联同时向外延伸的立体的网状结构。试验和模拟计算表明，一般爆破制裂产生的裂纹可达数十米。爆破接地技术实际上是一种巧妙的大范围的土壤改性技术。

均匀土壤中，内部互联的立体接地网可近似看成半球形接地装置，其接地电阻可以采用半球接地极的接地电阻计算公式来计算：



内部互联的立体接地网的等值半径 r 大致等于最深孔的深度 h 加上一个等效制裂宽度 D ：

$$r = D + h$$

等效制裂宽度 D 与接地装置所处土壤的地质状况有关，如果有低电阻率土壤层，以及岩石具有发达的固有裂隙， D 的取值就大些。对于轻度风化土壤，可取 5~10m，中等风化土壤取 10~15m，强风化土壤取 15~20m。

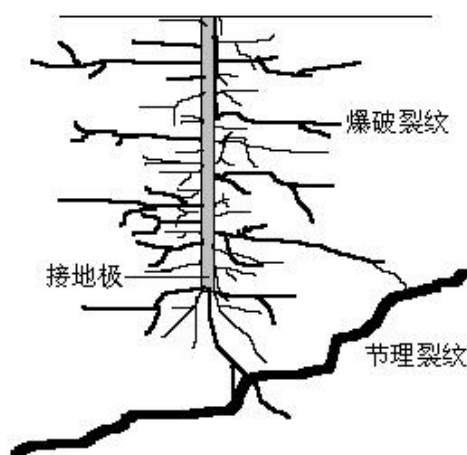


图 5.2-1 单根垂直接地极采用深孔爆破接地技术后形成的填充了降阻剂的区域

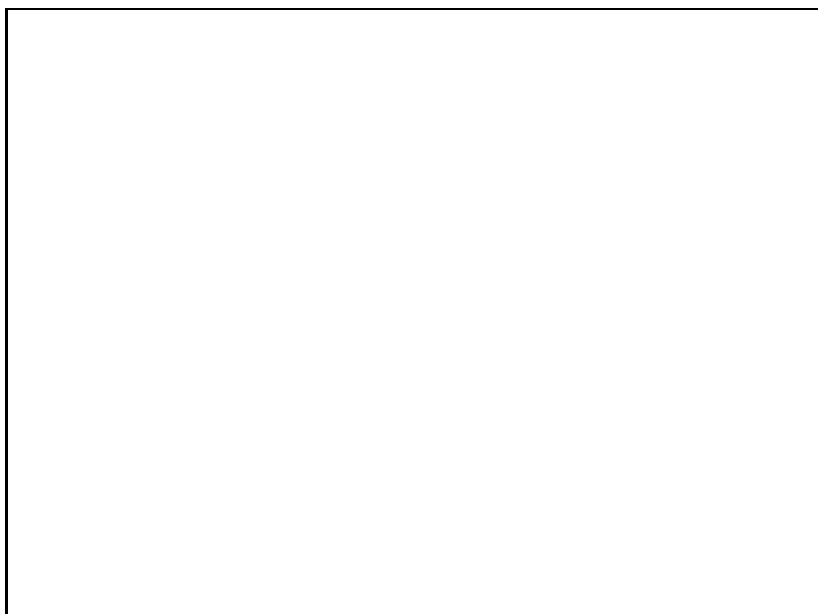


图 5.2-2 变电站接地网采用深孔爆破接地技术后形成的立体网状结构

由于立体接地网可能利用地下电阻率较低的土壤层，如地下水层或

金属矿物质层，另外在具有发达的固有裂隙的土壤中，填充了降阻剂的固有裂隙及爆破生成的裂隙可能伸到比较远的地方，有利于散流，也可能与远处的低电阻率土壤层相联，因此采用半球形接地极的接地电阻计算公式来计算爆破制裂 - 压力灌降阻剂形成的立体接地网的接地电阻时，应考虑一个爆破制裂及地质系数 K:

$$R = \frac{\rho}{2\pi K r}$$

式中的爆破制裂及地质系数 K 与爆破制裂程度及地质状况有关，如地下有无低电阻率层，岩石土壤的固有裂隙是否发达，以及外部裂隙是否与较远处的低电阻率的土壤区域连接等。

6) 深水井接地技术

土壤的湿度越大，土壤电阻率越低，含有丰富导电离子的地下水对土壤电阻率的影响更加明显。

深水井接地技术是指利用水井积水的原理制作的接地极。如图 5.2-3 所示，在地中挖一深井，则井壁的压力 P1 为大气压力，则同等高度的土壤中的地下水分子承受的压力 P2 为大气压力加上土壤的压力，压力不平衡，因此，水分子在压力差作用下朝水井方向运动。深水井周围土壤地下水往井内聚集，同时井内的重力水向井的下半部土壤、气态水和毛细水向井的上半部土壤扩散，使接地极周围土壤的湿度增大、甚至饱和，最终在水井中集聚一定深度的水，在水井周围形成含饱和水的土壤区域。水分子的运动最终达成动态平衡，形成等湿线，如图 5.2-4 所示。因此，由于地下水的集聚，水井周围的电阻率明显降低。

如图 5.2-5 所示，在井壁内布置不锈钢管或热镀锌钢管接地极，钢管的直径约 5cm，钢管壁上必须留有通水孔。利用钢管内的空间作为深水井的储水空间，钢管的金属既是接地极的导体，又是深水井的井壁。另外水井的上端不能封死，必须留有通气孔以形成压力差，确保地下水分子的运动，在接地极的周围形成明显的低电阻率区，从而降低了接地

极的接地电阻。

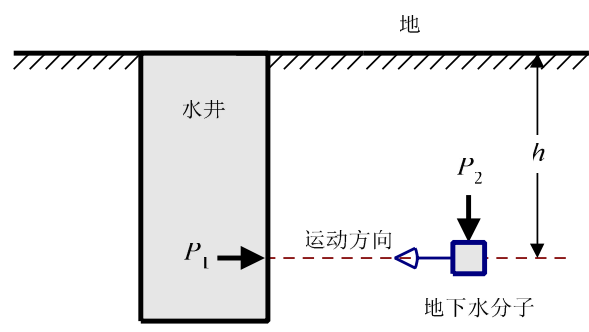


图 5.2-3 水井积水原理图

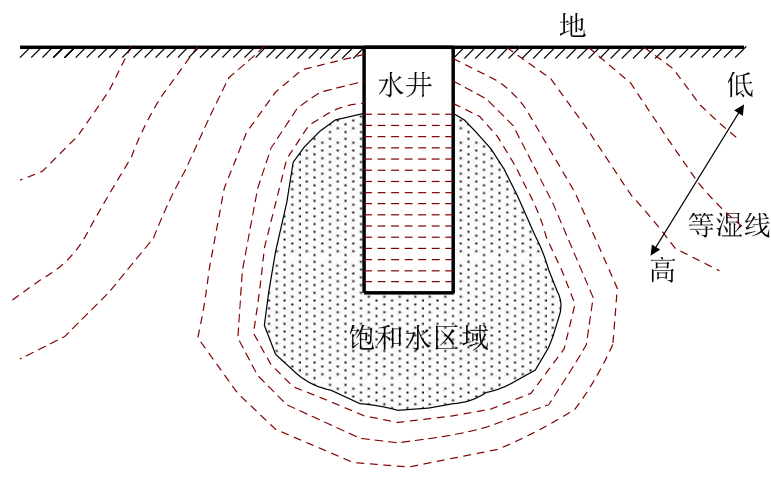


图 5.2-4 地下水形成的饱和水土壤区域

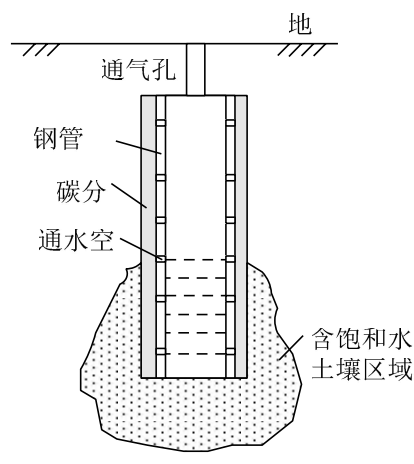


图 5.2-5 深水井接地极

深水井接地技术主要适用于有一定地下水含量、透水能力强的地区。

7) 局部换土

土壤电阻率的高低直接影响接地电阻的大小。对于某些位于高土壤电阻率地区的接地装置，如果采用其它方法降阻困难，可以采用局部换土的方法。用土壤电阻率较低的土壤或接地降阻剂来更换接地装置周围的高电阻率土壤，以获得较低的接地电阻。这种方法的使用必须从技术经济上作全面的比较，避免造成经济上的浪费。

8) 电解离子接地系统

目前国内市场上还出现了各种源自国外厂商或其专利技术的电解离子接地系统，尽管品种繁多，但在基本原理都大同小异。

该项技术的特点是将某种陶瓷合金化合物（固体）装入有孔的铜管或铜合金管中，由于管内含有电解离子化合物，每根铜管就变成一个电解离子接地极。铜管的作用有：（1）保证地极有较高的导电性能；（2）保护管内电解离子化合物有较长的使用寿命（减缓管内电解离子化合物随雨水流失的速度）。当铜管埋入地下时，通过铜管呼吸孔，电解离子化合物吸收水分，发生潮解，将活性电解离子通过管孔有效地释放到周围土壤中。由于铜管不断释放活性电解离子，不但能降低周围土壤的电阻率，还可以较长时间的保持土壤的电阻率，起到长效的作用。在实际使用时，电解离子铜管往往多根、直线排列或交叉垂直排列，形成了一个电解接地极列阵。

从降阻原理的本质上来看，该项技术对于降低接地网接地电阻的作用与传统的降阻剂并无太大区别，只是延长了降阻剂的使用寿命；另外由于采用铜管，实际上还起到了扩大接地导体直径、增大与土壤接触面、降低接触电阻的效果，与钢导体相比还增强了接地体防腐蚀的能力；电解接地极列阵往往还使用短垂直接地体，则能起到扩大散流区域达到降低接地电阻的效果，与深井接地的降阻效果在原理上一致。

5.3 不同降阻技术的适用范围

对于高电阻率地区变电站接地系统,各种降低接地电阻的方法都有其应用的特定条件,针对不同地区、不同土壤条件采用不同的方法进行合理的设计,才能在最大程度上降低接地电阻,在技术经济上达到最优。

1) 扩大接地网面积

均匀土壤条件下,接地网的接地电阻与接地网面积的平方根近似成反比,地网面积越大,其接地电阻也就越低。增大地网的面积无疑是降低接地电阻的一种行之有效的方法。扩大地网面积来降低接地电阻的方法只能因地制宜。对于一些建在山区的电站无法有效扩大其地网面积,另外对于一些建在市区的变电站,采用扩大变电站地网面积的方法不但技术经济上很不合理,同时也难于找到合适的地皮来扩大地网面积。

2) 外引接地

外引接地是指将电站主接地网与主接地网区域以外某一低土壤电阻率区域敷设的辅助接地网相连的方法,以达到降低整个接地系统接地电阻的目的。采用引外接地的条件是必须能在主接地网附近找到土壤电阻率相对较低的区域。在高土壤电阻率地区建设电站,周围除了水源之外可能比较难以找到电阻率较低地区,所以应该充分利用周围水库等水体来降低接地电阻。

3) 增加地网埋设深度

在接地网其它参数不变的情况下增加地网的埋深会使接地电阻减小,但其降阻效果不是很明显,这在高土壤电阻率地区更是如此。同时,增加地网埋设深度可以减小跨步电压,但增加了接触电压,因此工程中需要平衡考虑。

4) 长垂直接地极

降低接地电阻只能从两方面来考虑,一是扩大面积,向水平方向发展,二是采用深垂直接地极,往深度方向发展。实际工程应用中往往采用深斜井技术,深斜井接地兼顾了扩大散流面积和往深度发展两方面的

特点，在接地网面积受限的变电站接地工程中采用可以起到很好的降阻效果。

5) 爆破接地技术

爆破接地技术特别适于采用常规方法降低接地电阻困难的地区，尤其在高土壤电阻地区，爆破接地降阻效果非常明显，目前已解决了我国30余项降阻困难的发、变电站的接地工程，其缺点是相对于其他方法费用比较高。

6) 深井接地

一般接近地面几米以内的电阻率并不稳定，要随季节气候的变化而变化，土壤越深越稳定。特别是在高土壤电阻率及不能用常规方法埋设接地装置的地区，采用深井接地与主接地网并联是一种有效降低接地电阻的方法。在有地下含水层的地方，结合土壤电阻率测量和分层参数分析结果的指导，接地体可能深入穿透水层，这时降阻效果将更好。深井接地不受气候、季节条件的影响，除了降阻以外，还可以克服场地窄小的缺点，这在山区建设水电站时是一种行之有效的方法。

7) 局部换土

土壤电阻率的高低直接影响接地电阻的大小。对于某些位于高土壤电阻率地区的接地装置，如果采用其它方法降阻困难，也可以采用局部换土的方法。用土壤电阻率较低的土壤或低电阻率材料来更换接地装置周围高电阻率的土壤，以获得较低的接地电阻。但是如果建设电站的地区在山区或是地址结构属于不易开挖的情况，使用这种方法的难度则会比较高，所以必须从技术经济上作全面的比较，避免造成经济上的浪费。

表层换为低电阻率土壤虽然不能有效降低接地电阻，但可以降低接触电压和跨步电压。因此配合适用高阻层，可以有效保护人身安全。

8) 电解离子接地系统

由于产品效能未经长时间考验，目前用于理论分析较多，并未广泛

实施于实际工程