

变电所各种降阻措施及接地电阻计算方法

吴波

摘要： 本文对高土壤电阻率地区变电所各种降低接地电阻的措施进行了综合分析和比较，提出了各种措施的适用情况，并归纳了各种情况下接地电阻的计算方法。

关键词： 变电所，接地电阻，降阻措施，计算

0 引言

我国西北地区的地质条件比较恶劣，地表层主要为湿陷性黄土、砾砂土、砂石、岩石、风沙甚至沙漠，气候干燥少雨，蒸发量大于降水量，土壤中含水量少，大部分地区都为高土壤电阻率地区，这对变电所接地的设计造成了不小的困难。按照常规的接地设计已经无法满足变电所对接地电阻的要求，必须采用适当的降阻措施，以确保整个变电所接地系统的安全可靠。

西北地区大部分变电所都不同程度的采用了降阻措施，有成功的范例，也有失败的教训，多年来积累了许多经验。本文将结合各种降阻措施的比较分析，归纳出各种情况下接地电阻的计算方法，力求达到指导变电所接地设计的目的。

1 通常情况下接地电阻计算公式

在电力行业标准《交流电气装置的接地 DL/T 621—1997》中，水平接地极为边缘闭合的复合接地极(接地网)的接地电阻计算公式为：

$$R_n = \alpha_1 R_e \quad (1)$$

$$\alpha_1 = \left(3 \ln \frac{L_0}{\sqrt{S}} - 0.2 \right) \frac{\sqrt{S}}{L_0} \quad (2)$$

$$R_e = 0.213 \frac{\rho}{\sqrt{S}} (1+B) + \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{S}{9hd} - 5B \right) \quad (3)$$

作者简介：吴波，铁道第一勘察设计院电气化处，助理工程师，陕西 西安 710043，电话：(029) 82365764

$$B = \frac{1}{1 + 4.6 \frac{h}{\sqrt{S}}} \quad (4)$$

式中： R_n —任意形状边缘闭合接地网的接地电阻， Ω ；

R_e —等值(即等面积、等水平接地极总长度)方形接地网的接地电阻， Ω ；

S —接地网的总面积， m^2 ；

d —水平接地极的直径或等效直径， m ；

h —水平接地极的埋设深度， m ；

L_0 —接地网的外缘边线总长度， m ；

L —水平接地极的总长度， m ；

ρ —土壤电阻率， $\Omega \cdot m$ ，

本文中所述的土壤电阻率均是指考虑季节影响系数的值。

上述公式的适用范围是土壤电阻率比较恒定，以水平接地体为主、外加少量垂直接地体且边缘闭合的接地网的接地电阻计算。

我们知道，接地电阻的大小跟很多因素有关，土壤电阻率、接地网形状、埋设深度、接地体材质、尺寸、长度等等，影响最大的就是土壤电阻率和接地网的形状。根据复合人工接地网的工频接地电阻简易计算式：

$$R \approx 0.5 \frac{\rho}{\sqrt{S}} = 0.28 \frac{\rho}{r} \quad (5)$$

减小土壤电阻率以及增大接地网面积，可以有效降低接地电阻。

2 换填土

换填土是常用的一种减小土壤电阻率的措施。方法就是用电阻率低的土壤置换变电所场坪一定范围内的土壤，如用陶土、黏土、黑土、田园土、泥浆等等，这些土壤的电阻率多在 200 Ω·m 以下，可以有效改善整个接地网周围的土壤环境。

换填土是一种比较方便、便宜且有效的方法，条件是变电所附近有这些电阻率较低的土壤，如果运土的代价太大，则有必要进行技术经济比较。有时，也将降阻剂、土壤、水以一定比例混和后作为换填土。

换填土有 2 种方式，一是全所范围内一定深度的土壤全部换填，二是在接地体的周围局部换填，视变电所场坪大小而定。2 种情况的接地电阻计算方法不一样。

方法一：全部换填，变电所场坪范围一定深度的土壤（如 2m）全部换填后，接地网周围的土壤实际上就变成了一个双层土壤环境。双层土壤的接地电阻计算方法在不少文献中都介绍过。这里推荐另一种计算公式：

$$R = \sqrt[3]{\frac{1}{\left(\frac{1}{R_s}\right)^3 + \left(\frac{1}{R_r}\right)^3}} \quad (6)$$

式中： R_s —水平接地网的接地电阻，Ω

R_r —垂直接地棒组的接地电阻，Ω

其中，水平接地网的接地电阻计算：

$$R_s = \alpha_1 R_0 - c \rho_1 \ln(1-K) / 2\pi(H+H_0) \quad (7)$$

式中 α_1 、 R_0 意义及计算公式同式 (1) ~ (4)。

其中土壤电阻率采用 ρ_1 ，表示上层土壤的电阻率； ρ_2 则表示下层土壤的电阻率。

其余参数照式 (8) 计算：

$$K = (\rho_1 - \rho_2) / (\rho_1 + \rho_2) \quad (8)$$

$$c = \begin{cases} 1 & |K| \leq 0.6 \text{ 或 } H/\sqrt{S} > 0.5 \\ (1-K)^2 & |K| > 0.6 \text{ 且 } H/\sqrt{S} \leq 0.6 \end{cases} \quad (9)$$

式 (9) 中 H 为上层土壤的厚度，即为换填土

的深度。

$$\gamma = [1.391 \ln(L_0 / \sqrt{S}) - 1.78] \sqrt{S} / L_0 \quad (10)$$

$$H_0 = \beta \sqrt{\frac{A}{2\pi}} [(K-1)/2K] \ln(1-K) \quad (11)$$

$$\beta = [6.27 \ln(L_0 / \sqrt{S}) - 5.09] \sqrt{S} / L_0 \quad (12)$$

垂直接地棒组接地电阻计算：

$$R_r = 0.84(1+K)^{0.1} \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}} \quad (13)$$

式中：

$$R_a = \frac{\rho_1}{2\pi m L_1} g_0 F_0 + \frac{\rho_1}{2\pi H} \frac{\ln\left(\frac{1}{1-K}\right)}{\sqrt{\left(\frac{n}{F_0} - 1\right)^2 q^2 + 1}} \quad (14)$$

$$q = \begin{cases} \frac{L_1 + L_2 + h}{H} & H > L_1 + L_2 + h \\ 1 & H \leq L_1 + L_2 + h \end{cases} \quad (15)$$

$$R_b = \frac{\rho_2}{2\pi m L_2} g_0 F_0 \quad (16)$$

$$g_0 = \ln \frac{4(L_1 + L_2)}{d_0} - \frac{0.31(L_1 + L_2) + 2.27h}{L_1 + L_2 + 2.27h} \quad (17)$$

$$F_0 = 1 + (n - \frac{1}{\sqrt{n}}) \frac{1.2 \left[\frac{L_1 + L_2}{\sqrt{S}(1-0.9K)} \right]^{0.6}}{g_0} \quad (18)$$

式中：n—垂直接地棒根数；

d_0 —垂直接地棒导体直径，m。

至此，即可采用式 (6) ~ (18) 来计算双层土壤复合接地网的接地电阻。将其用在变电所一定深度土壤全部换填的情况下计算接地电阻是合适的。

方法二：局部换填，如图 1，将水平接地体与垂直接地极周围的土壤置换，置换土壤的宽度可根据情况灵活处理，宽度越宽，降阻效果越好。

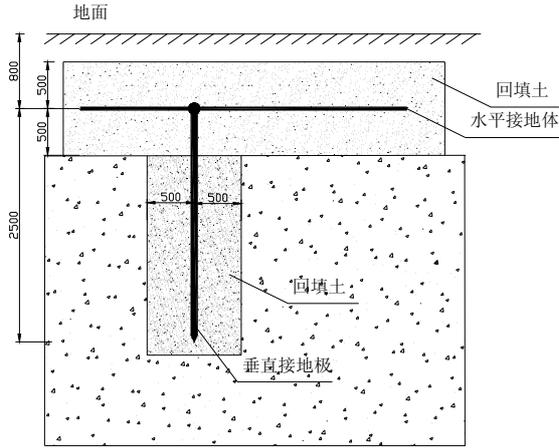


图1 换填土示意图

采用换土措施后,根据《钢铁企业电力设计参考资料》,接地电阻的计算式为:

$$R = \frac{\rho_1 \ln(2L/b) + \rho_2 \ln(L/b_1)}{2\pi L} \quad (19)$$

式中: ρ_1 、 ρ_2 分别为回填土和原土壤的电阻率; L 为接地体总长度; b 为接地体宽度; b_1 为换土半径。

3 敷设降阻剂

通过向土壤中加入降阻剂可以降低接地体附近土壤的电阻率。在接地极附近敷设了降阻剂后,可以起到降低与其周围大地介质之间的接触电阻的作用,因而能在很大程度上降低接地极的接地电阻。通常,土壤的电阻率在几百到几千欧姆米的范围内,而降阻剂由于采用了导电性能良好的配料,其电阻率常常几欧姆米。将降阻剂埋设在接地体周围,由于降阻剂的电阻率很小,相当于增大了接地体自身的直径或截面,有利于减小接地体的散流电阻,从而有利于整个接地电阻的减小。

过去经常使用的化学性降阻剂,由于其对接地体有较大的腐蚀性以及对周围土壤、水源有污染,目前已经很少采用了。取而代之的是物理降阻剂,又叫长效型降阻剂。降阻剂的敷设方法一般采用湿敷法,就是将降阻剂加水搅拌和匀后(比例通常为1:1),包裹在接地体周围,敷设16-24h后封土夯实填。关于采用降阻剂后接地电阻的计算,工程中

常用的经验公式是:

$$R_j = k_f \cdot k_p \cdot R$$

式中 R_j 表示采用降阻剂后的接地电阻, R 表示采用降阻剂之间的接地电阻, k_f 为降阻系数值(见表1),与施加降阻剂的截面尺寸有关, k_p 为大型地网的屏蔽系数,对大型地网 k_p 一般为1.2—1.3。

k_f 的值与断面尺寸关系 表1

降阻剂施加截面尺寸 m^2	0.4×0.3	0.3×0.3	0.3×0.2
降阻系数 k_f	0.25	0.35	0.4
每米用量(kg)	60	45	30
降阻剂施加截面尺寸 m^2	0.2×0.2	0.2×0.15	0.15×0.15
降阻系数 k_f	0.5	0.6	0.68
每米用量(kg)	20	15	11

经验公式的计算一般误差比较大,如需较为精确的计算值,可采用如下方法:

敷设降阻剂后,相当于增大了接地体的半径,因此引入等效半径 r_e 。

对于水平接地体,

$$r_{ep} = r_0 \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^{1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}} \quad (20)$$

对于垂直接地棒,

$$r_{ez} = \frac{r_1 l}{(r_1 + 1) \left[\frac{r_1 (r_0 + l)}{r_0 (r_1 + l)} \right]^{\frac{\rho_1}{\rho_2}} - r_1} \quad (21)$$

式中: r_0 —接地体的导体半径;

r_1 —降阻剂的包裹半径;如降阻剂敷设截面为矩形,则 $r_1 = \sqrt{bd/\pi}$, b 、 d 降阻剂区域截面的高和宽;

ρ_1 —降阻剂的电阻率, $\Omega \cdot m$;

ρ_2 —周围土壤的电阻率, $\Omega \cdot m$;

l —垂直接地棒长度, m 。

如此即可将等效半径 r_e 代入各自的接地电阻计算公式进行计算。如要进行任意形状的水平接地体加相当数量的垂直接地极组成的复合接地网的接地电阻计算, 以下公式可作参考:

$$R_w = \frac{R_n \cdot R_c - R_{nc}}{R_n + R_c - 2R_{nc}} \quad (22)$$

式中: R_n 的意义及计算方法同式 (1) ~ (4), 不过其中的 d 值应该用式 (20) 计算的等效半径的 2 倍, 即等效直径; R_c 为与水平接地网并联的垂直接地极的总接地电阻, Ω 。

$$R_c = \frac{\rho}{2n\pi l} \ln \frac{2(l+1)}{d_0} + \frac{R_b}{n} (\sqrt{n}-1)^2 \quad (23)$$

$$\text{式中 } R_b = 0.213\alpha_1 \frac{\rho}{\sqrt{S}} (1+B) \quad (24)$$

同样, d_0 为垂直接地极的等效直径, 即为用式 (21) 计算所得的等效半径的 2 倍。 R_{nc} 为水平接地网与垂直接地极之间的互电阻, Ω 。

$$R_{nc} = R_n - \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{l}{\sqrt{hd}} \right) \quad (25)$$

式中各参数物理意义同前文。

4 采用低电阻接地模块

低电阻接地模块是一种以导电非金属材料为主的接地体, 它由导电性、稳定性好的非金属材料、电解质、吸湿剂和防腐金属电极组成。当接地模块埋入大地后, 与大地构成一个接触良好的整体, 由于接地模块具有很强的保湿、吸湿性和稳定的导电性, 金属接地体通过外围的非金属的电阻的模块与大地的接触电阻将大大减小, 达到良好的降阻作用。接地模块既可以作为水平接地体使用, 也可以作为垂直接地极使用。从降阻原理上来说, 接地模块与降阻剂类似, 但相对降阻剂来说, 接地模块施工更加方便、稳定性好, 特别适用于缺水的高土壤

电阻率地区。

对于采用接地模块的接地电阻计算, 可以参照通常的计算公式或本文介绍的一些计算方法, 只将等效半径代入就行了。不过有的计算过程比较复杂, 公式简单的误差又较大。对于接地网的接地电阻计算还有如下方法:

单根垂直接地体的接地电阻计算公式:

$$R_z = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{8l}{d_0} - 1 \right) \quad (26)$$

水平接地体的接地电阻计算公式:

$$R_p = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left(\frac{L^2}{2hr} + A \right) \quad (27)$$

A 为形状系数, 取值可参考有关规范。

多支垂直接地极并联及与水平接地体并联后的接地电阻值计算方法:

$$R = \frac{\frac{R_z}{n} R_p}{\frac{R_z}{n} + R_p} \frac{1}{\eta} \quad (28)$$

n 为垂直接地极数量; η 为利用系数 ($\eta < 1$), 与垂直接地极长度与间距有关, 通常可取 0.65 ~ 0.9。

5 采用离子接地体

离子接地单元由铜合金接地极、内离子填充剂及外离子填充剂组成。其中的外离子填充剂能有效地降低接地极周围的土壤电阻率, 并隔绝金属接地极与周围土壤、空气的接触, 避免了金属接地极在恶劣环境中的腐蚀, 同时它还能吸收并保存土壤中的水分, 使自身的有效成分持续向周围土壤渗透。产品中的铜合金接地极是由铜及其他稀有金属材料用特殊工艺制成并做抗氧化钝化处理, 自身导电性能优异, 在空气中的腐蚀氧化速度极慢, 内部离子填充与外层填充剂有效成分相同的高浓度填充物, 在吸收水分潮解后通过底部的小孔向外缓慢渗透, 不断补充外层填充剂随土壤中水分流失的有

效降阻成分。由于其优异的抗氧化性及离子补充设计,使单套接地单元的使用寿命可长达30年以上,且接地电阻值常年保持稳定,变化幅度极小,非常适合于各种系统的接地装置中作为垂直或水平接地体应用。在变电所接地工程中常作为垂直接地极使用。

单根防腐离子接地体的接地电阻经验计算公式:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} (\ln \frac{8l}{d_0} - 1) \times 20\% \quad (29)$$

其中, d_0 为离子接地极的等效直径,通常取0.2~0.3m; 20%为离子接地体对土壤的调节系数,工程经验值。

复合接地网的接地电阻可照前文计算。

6 外引接地网

现在很多变电所占面积小,土壤电阻率高,使接地电阻达不到规程要求的标准,最简单的解决办法就是把地网的面积扩大,或在已建成地网的附近,找一处电阻率较低的地方,再建设一个新地网,然后把两地网连接,使地网的接地电阻降低,俗称外引接地。实践证明,这是个十分有效的办法。

引外接地需注意:距离不能太远,接地体要深埋,要作好安全保护措施,防止因跨步电位差引起人员和牲畜的触电事故发生,必须保证引外接地的安全性。

外引接地网的接地电阻简易计算方法:

$$R_1 = \frac{0.5\rho_1}{\sqrt{S}} \times \frac{S}{S_1} \quad (30)$$

$$R_2 = \frac{0.5\rho_2}{\sqrt{S}} \times \frac{S}{S_2} \quad (31)$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \times k \quad (32)$$

式中, R_1 、 ρ_1 、 S_1 分别表示原地网的接地电阻、

土壤电阻率及面积, R_2 、 ρ_2 、 S_2 分别表示新地网的接地电阻、土壤电阻率及面积, S 、 R 则表示两地网面积的和及总的接地电阻, k 为屏蔽系数,取1.1~1.3。

7 深井接地

常用的深井接地有3种方式,即常规深井接地、深井爆破接地、深水井接地3种,它们分别用于不同的地质、土壤环境。

常规的深井接地极适用于上层土壤的电阻率很大、土层厚度小于接地极长度、下层土壤的电阻率很小的地区。

深井爆破接地适用于在裂隙较多、土壤干燥或岩石地区,如固结坚硬的沉积岩、岩浆岩、变质岩地区,硬度稍差的各种砂岩、片岩地区等;当土壤干燥时它们的电阻率极高,在进行深井爆破时容易形成较稳定的裂缝,所以这些裂缝网用低电阻率材料填充后,形成一个明显的低电阻率区域的散流通道,使接地极有很好的接地降阻作用。不适用于硬度小、松散的土壤。

深水井接地极适合常年有地表水补充或在接地极到达的深度以内最低限度有少量地下水的地区,如我国南方地区、人口密集地区、周围有河流或水塘的地区。从土壤结构来看,深水井接地极更适用于土壤是分层结构的地区,特别是适用在各层土壤中有一层是明显的含水层或隔水层的地区。深水井接地极不适用于在接地极埋设深度以内基本没有地下水或透水性极差的地区,如特别干旱区、密实岩石区等。

深井接地还可与离子接地极结合,形成深井离子接地极,是一种新型的接地装置,从实际应用看降阻效果很好,但投资较大。

在详细获得变电所及周围范围内深层地质情况,如深层地质状况、冻土深度、深层土壤的电阻率、地下水水位的高度等后,在采用其他降阻方法效

果不理想时,适宜的采用深井接地技术对降低接地电阻还是很有效果的。

根据单根垂直接地极的接地电阻结算式式(26),深井接地降低接地电阻的因素有:

- a、增加了接地极长度;
- b、利用电阻率较低的深层土壤,降低了土壤的平均视在电阻率;
- c、在接地极周围形成低电阻率材料填充区,相当于增大了接地极的等效直径 d 。

从接地的电容理论来看深井接地,接地电阻的计算公式 $R = \varepsilon\rho / C$ 中,接地电阻和其电容成反比,在 ε 、 ρ 一定的情况下,接地极的电容与其几何尺寸成正比。当垂直接地极的长度和接地网的长、宽尺寸可以比拟时,接地网由原来的近似平板接地体趋近于一个半球接地体,即由二维接地体变成三维接地体,电容会有较大增加,因此接地电阻会有较大减小。

在设计深井接地极时,还应注意接地极之间的屏蔽效应,接地极的间距最好不要小于接地极长度的2倍,因此深井接地极宜敷设于接地网的四周边缘甚至尽可能向站外延伸,数量不宜过多。

深井接地的接地电阻计算可归为双层土壤环

参考文献

- [1] 中国电力工业部. 交流电气装置的接地(DL/T 621—1997). 北京: 中国电力出版社, 1998. 01
- [2] 陈先禄、刘渝根等. 接地. 重庆: 重庆大学出版社, 2002. 07
- [3] 王洪泽. 论任意形状复合接地网接地电阻的计算问题. 广西: 广西电力工程, 2000. 03
- [4] 鲁志伟. 双层土壤复合接地网接地电阻的简化计算. 广西: 广西电力工程, 1999. 01
- [5] 王晓辉, 张小青. 一种填加降阻剂的接地电阻计算方法. 吉林: 吉林电力, 2006. 10

境的接地的电阻计算。

8 结论

在进行变电所的接地设计时,应充分收集有关资料数据,尽可能进行现场勘察。应掌握地形、地貌,水文、气象、地质结构、矿藏、电磁场、实测土壤电阻率。这些对接地工程设计计算和施工布置都是很重要的。

在地网接地电阻的理论推算时,应首先使用国际标准或国标、部标中推出的公式,在计算中由于特殊环境或特殊技术措施而找不到相应规范时可参考一般技术部门或企业提供的计算方法,但应仔细审查其可靠程度,并留足够的设计余量。

本文所列举的若干降低接地电阻的措施,在工程应用中应做到因地制宜。在土壤电阻率为 $1000 \Omega \cdot \text{m}$ 以下的变电所,有条件的情况下,应优先采用换填土、外引接地等投资较小的措施;在条件受限制的情况下,可敷设降阻剂或接地模块。在更高土壤电阻率的地区,对于大中型地网,换填土及敷设降阻剂等措施对降阻的作用是有限的,在进行技术经济比较后,应积极慎重的采用离子接地极和深井接地等新技术。