

110 kV 变电站接地电阻的降低与核算

李彬¹, 郑连清²

(1 重庆市电力公司江北供电局, 重庆 401147; 2 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

摘要: 接地网是维护变电站安全可靠运行的根本保证和重要措施。阐述常用接地网的降阻处理方法, 对某 110 kV 变电站接地电阻高的原因进行简要分析, 对其接地网重新设计, 并提出选用沥青路面结构。通过对接触电势和跨步电势的核算, 表明接地网满足要求, 有效地解决了变电站接地系统的安全性问题。

关键词: 变电站; 接地网; 沥青; 接触电势; 跨步电势

Abstract: The ground grid is an important measure to maintain the safe and reliable operation of the substation. The common ways to reduce the grounding resistance are described. A brief analysis on the causes for the high grounding resistance in a 110 kV substation is given, and then it is proposed to use asphalt pavement structure to redesign the grounding grid system. Through the check computation of the contact potential and the step potential, this design can effectively solve the security issues of substation grounding system.

Key words: substation; ground grid; asphalt; contact potential; step potential

中图分类号: TM835 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)02-0060-04

0 引言

接地技术广泛应用于各个领域, 伴随着高科技信息化时代的到来, 接地技术含有更多新的概念, 是具有综合性的学科^[1]。目前, 对于变电站接地网的研究一直是一个备受关注的领域。110 kV 变电所设计是城网建设中的关键环节, 变电站的接地网上连接着全站的高低压电气设备的接地线、低压用电系统接地、电缆屏蔽接地、通信、计算机监控系统设备接地, 以及变电站维护检修时的一些临时接地。如果接地电阻较大, 在发生系统接地故障或其他大电流入地时, 可能造成地电位异常升高, 造成接地系统电位分布不均, 局部电位超过规定的安全值, 这会给运行人员的安全带来威胁。还可能因反击对低压或二次设备以及电缆绝缘造成损坏, 使高压窜入控制保护系统、变电站监控和保护设备, 会发生误动、拒动, 造成事故。随着电力系统的发展扩大, 使接地短路电流越来越大。根据接地网的作用, 在接地网设计中主要考虑因素之一就是降低接地网的接地电阻。在分析比较目前使用较广泛接地网的降阻处理方法各自的特点及局限性基础上, 对原有 110 kV 变电站接地电阻较高的原因分析, 重新设计接地网, 并采用一定厚

度的沥青路面结构层, 敷设在变电站接地网内电气设备周围。通过在某 110 kV 变电站接地网设计中的应用, 计算其均压带根数、最大接触电势、跨步电压、接地体热稳定均满足规程要求。

1 常用接地网的降阻处理方法

有些变电站由于受地理条件的限制, 不得不建在高电阻率地区, 而且接地网敷设范围受到很大限制, 导致这些变电站的接地电阻值偏高, 无法满足现行标准的要求。如何合理、有效、经济地解决这一问题, 保障变电站的安全可靠运行, 将具有十分重要的理论意义和工程价值。常见的降低接地电阻的方法^[2]有增大地网面积、增设接地体、引外接地、局部改善接地网周围的土壤电阻率、深孔爆破制裂压灌、电解离子接地系统等。

增大地网面积是降低地网接地电阻最为有效的措施, 然而, 随着面积的增大, 电流密度的不均匀也在增加, 降阻的效果逐渐趋于饱和。因此, 当地网面增设接地体是通过增设水平接地体^[3]、加装并深埋垂直接地体^[4]而达到降阻的目的, 水平接地体能在一定程度上减小接地极附近的电流密度, 但由于相互之间的屏蔽作用而使效果受到影响。加装并深埋垂直

接地体,从减小冲击接地电阻来看,通常有一定的效果,但从降低地网工频电阻来看,效果甚微。此外,在下层土壤电阻率较低的情况下,采用加装垂直接地体的效果是显著的;相反,当下层土壤电阻率较大时,长垂直接地体几乎没有效果。

采用降阻剂^[5]或局部换土可降低地网附近的土壤电阻率,并在一定程度上降低土壤与接地体间的接触电阻,但无论是均匀土壤,还是平双层土壤,这一措施对地网的接地电阻降低作用是较小的,且降阻剂对接地体的腐蚀效应亦是一个令人头痛的问题。

深孔爆破制裂压罐^[6]与电解离子接地系统是日前常用的较大幅度降低接地电阻的方法,前者在土壤表层下电阻率较高时效果极为明显,后者可使周围土壤的导电性能始终保持在较高的水平,从而充分发挥接地系统的保护作用,但此两法所需投资均较大。

目前,针对不同的工程实际情况,大多因地制宜进行综合治理^[7],从而使接地网的接地电阻达到规定的要求,地网的接触电压及跨步电压在容许值的范围内。

2 降低接地电阻值的方法

所设计的 110 kV 变电站位于山巅,大部分由沙土和岩石组成,其土壤电阻率 ρ 值在 $350 \Omega \cdot \text{m}$ 以上。截止到 2008 年,接地网的接地电阻都在 1.3Ω 以上(规定 $<1.0 \Omega$),变电站在这种极不安全的条件下运行。如何减小接地电阻是变电站重建的先决条件。

(1) 变电站的接地网是 15 年前建站时制作的,由于当时施工质量不高,加上多年的腐蚀已经不能再用,需要重新设计改造。

(2) 变电站建在山上,土壤电阻率很高。要想降低接地电阻除增加接地体的接触面积外,还要降低土壤电阻率,这样才能将接地网的接地电阻降到规定范围以内。

2.1 接地网设计

接地网的网格布置采用长孔网或方孔网,接地带布置按经验设计,水平接地带间距通常为 $5 \sim 8 \text{ m}$ 。方格地网的设计简单,但因为接地网边缘部分的导体散流大约是中心部分的 $3 \sim 4$ 倍,因此,方格地网边缘部分的电场强度比中心部分高,电位梯度较大,整个地网的电位分布不均匀,接地钢材用量多,经济性差。在 220 kV 及以下的变电工程中,缺点不太突出。设计的变电站为 110 kV,接地网采用方格网。

根据该 110 kV 变电站的原接地网图纸重新设计接地网如图 1 所示,材料采用 $50 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ (等效直径 $d=0.025 \text{ m}$),埋深 $h=1 \text{ m}$,均压带根数 $n \geq 10$,接地网占地面积为

$$A=85 \text{ m} \times 62 \text{ m}=5270 \text{ m}^2$$

接地极和接地带焊接。为了增加接地面积,新做的接地网与旧接地网连接,主要考虑接地极数量,增加接地体的长度,对改善接地电阻起到良好的作用。

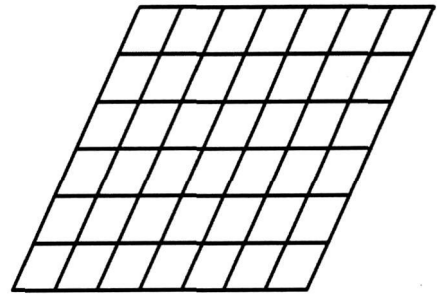


图 1 接地网示意图

该 110 kV 变电站流入接地网的接地短路电流 $I=8580 \text{ A}$ 电流,因 $8580 \text{ A} > 500 \text{ A}$,故为大接地短路电流系统。

由于该变电站土壤为表层土夹石下层砾石,故取土壤电阻 $\rho_s=600 \Omega \cdot \text{m}$, $t=0.6 \text{ s}$ 计算出的允许接触电势。

$$E_{dl}=(250+250\rho_s)\sqrt{t} \\ = (250+250 \times 600) / \sqrt{0.6}=516 \text{ V} \quad (1)$$

接地网设计为矩形接地网,均压带根数 $n \geq 10$,查表得 $a=0.545$, $b=0.137$, $K_d=1$, $\beta=80\%$, $K_A=1.23$
 $-9.2\sqrt{A}=1.106$,则 n 均压带根数的计算式如下。

$$n = \frac{a}{\frac{2E_t\sqrt{A}}{BK_dK_A I} - b} \\ = \frac{0.545}{\frac{2 \times 516 \times \sqrt{5270}}{0.8 \times 1 \times 1.106 \times 8580 \times 600} - 0.137} \\ = \frac{0.545}{0.0329 - 0.137} = -4.5 \quad (2)$$

因 n 为负值,不符合条件 ($n \geq 0$),故无解。负值表明乘积 $E_t \cdot \sqrt{A}$ 太小,要保证有解,必须增大 E_t 或 A 值。由于环境条件限制,扩大接地网面积有困难,为此,选用高电阻的路面结构层提高 E_t 值,试选用厚度为 15 cm 的碎石路面结构层,敷设在接地网内电气设备周围 1.5 m 宽处,碎石的电阻率在干燥状态下为 $2.5 \times 10^7 \Omega \cdot \text{m}$,在潮湿状态下为 $5830 \Omega \cdot \text{m}$,取计

算用电阻率为潮湿状态下的 60%，即 $\rho_s = 3\ 500\ \Omega \cdot m$ 。因两层土壤结构反射系数为

$$\begin{aligned} K &= (\rho - \rho_s) / (\rho + \rho_s) \\ &= (300 - 3\ 500) / (300 + 3\ 500) \\ &= -0.80 \\ \rho_s \text{ 层的厚度 } H &= 15\ \text{cm} = 0.15\ \text{m}, \text{ 查表得折减系数 } C = 0.72, \text{ 这时, 允许接触电势为} \\ E_{\rho} &= (250 + 0.25C\rho_s)\sqrt{t} \\ &= (250 + 0.25 \times 0.72 \times 3\ 500) / \sqrt{0.6} \\ &= 1\ 136\ (\text{V}) \end{aligned} \quad (3)$$

再将 E_{ρ} 的值代入式 (2) 中计算, 得 $n = -5.4$

因 n 仍为负值, 不符合条件 ($n \geq 10$), 故仍无解。需重新选择路面结构层使用材料。

2.2 选用沥青路面结构

上述选用高电阻的路面结构层无法满足要求。现选用厚度为 7 cm 的沥青路面结构层, 敷设在接地网内电气设备周围 1.5 cm 宽处, 沥青的电阻率在潮湿状态下不低于 $46\ 600\ \Omega \cdot m$, 取计算用电阻率为 $\rho_s = 46\ 600\ \Omega \cdot m$, 因两层土壤结构反射系数为

$$\begin{aligned} K &= (\rho - \rho_s) / (\rho + \rho_s) \\ &= (600 - 46\ 600) / (600 + 46\ 600) \\ &= -0.975 \\ \rho_s \text{ 层的厚度 } H &= 7\ \text{cm} = 0.07\ \text{m}, \text{ 查表取折减系数 } C = 0.9 \times 0.4 / 0.975 = 0.37, \text{ 这时, 允许接触电势为} \\ E_{\rho} &= (250 + 0.25C\rho_s)\sqrt{t} \\ &= (250 + 0.25 \times 0.37 \times 46\ 600) / \sqrt{0.6} \\ &= 5\ 887.6\ (\text{V}) \end{aligned} \quad (4)$$

再将 E_{ρ} 的值代入式 (2) 中计得: $n = 11 \geq 10$, 满足变电所的实际接地网情况。

2.3 接触电势和跨步电势校验

2.3.1 计算接触电势

该变电站实测电阻为 $R_c = 0.84$, 取 $R = R_c = 0.84$, 接地网的电位 $E_w = IR = 8\ 580 \times 0.84 = 7\ 207.2\ (\text{V}) \leq E_0 = 10\ 000\ \text{V}$ (E_0 为允许的接地电位)。推荐对大接地短路电流系统取 $E_0 = 10\ 000\ \text{V}$, 当 $E_w \geq 2\ 000\ \text{V}$ 时, 应采取防止高电位转移措施。在对变电所的均压带根数进行反推算时, 为了满足要求, 已采取了措施。为安全起见, 根据变电站的实际土壤情况, 再对均质土壤和两层土壤中的最大接触电势进行分别核算。

(1) 均质土壤

接触电势为

$$E_m = K_m E_w = K_m IR$$

K_m 为复合接地网的接触系数。

$$K_m = \frac{L_s}{4(L_s + aL_c)} \left(\lg \frac{L_s^2}{\sqrt{Ahd}} - 2 \right) \left(\frac{D}{\sqrt{A}} \right)^{0.67} \quad (5)$$

L_s 为水平接地网导体总长度, $L_s = 80 \times 7 + 60 \times 15 = 1\ 460$;

L_c 为垂直接地棒的总长度, $L_c = 60 \times 2.5 = 150$;

a 为修正系数, $a = 1.15$;

f 为水平均压网的均压带布置方式系数, $f = 1.5$;

D 为水平均压带的间距, $D = 13.4$

d 为接地网导体的等效直径, $d = 0.025$ 。

经计算得

$$K_m = 0.22 \times 3.267 \times 0.423 = 0.304$$

最大接触电势为

$$E_m = K_m E_w = 0.304 \times 7\ 207.2 = 2\ 191\ (\text{V}) \leq E_{\rho}$$

(2) 两层土壤中的最大接触电势

变电站表层为 0.6 m 深的沙土 (置换), 土壤电阻率 $\rho_1 = 300\ \Omega \cdot m$, 下层为沙砾, 电阻率 $\rho_2 = 1\ 000\ \Omega \cdot m$, 最大接触电势为

$$K_m = IRM \left(\frac{D\sqrt{A}}{L_s} \right)^{0.45} \quad (6)$$

L_s 为水平接地网导体总长度, $L_s = 80 \times 7 + 60 \times 15 = 1\ 460$;

l 为单根垂直接地棒的平均长度, $l = 2.5\ \text{m}$

M 为与上 (ρ_1)、下 (ρ_2) 层土壤电阻率比值有关的函数, $\rho_1 / \rho_2 = 300 / 1\ 000 = 0.333$, 经查表 $M = 0.5 \times 0.36 / 0.333 = 0.54$;

D 为接地网边缘垂直接地极的平均间距, $D = 6$ 。

经计算得

$$E_m = 7\ 207.2 \times 0.54 \times 0.383 = 1\ 490.6\ (\text{V}) \leq E_{\rho}$$

从以上计算可看出, 经过采用敷设沥青的路面后, 计算出的最大接触电势均小于最大允许的接触电势。

2.3.2 校验跨步电势

接地网外的最大跨步电势为

$$E_{sn} = K_s E_w \leq E_s \quad (7)$$

K_s 为跨步系数;

E_s 为允许的跨步电势;

$$K_s = \frac{L - P}{L} \frac{\alpha}{A^{0.25}} + \frac{P}{L} \frac{\beta}{\ln \frac{9.02\sqrt{A}}{d}} \quad (8)$$

L为接地网导体总长度, $L=1\ 460+150=1\ 610\text{ m}$;

P为接地网周边总长度, $P=280\text{ m}$

α 、 β 为与深埋有关的系数, $\alpha=0.53$, $\beta=0.61$

d为接地网导体的等效直径, $d=0.025$ 。

$$K_s = \frac{1\ 610 - 280 \cdot 0.53}{1\ 610 \cdot 5 \cdot 270^{0.25}} + \frac{280 \cdot 0.61}{1\ 610 \cdot \ln \frac{9.02 \times \sqrt{5 \cdot 270}}{0.025}}$$

$$= 0.051 + 0.01 = 0.061 \quad (9)$$

最大跨步电势为

$$E_{sm} = K_s E_w = 0.061 \times 7\ 207.2 = 439.6(\text{V})$$

允许的跨步电势为

$$E_s = (250 + \rho_s) \sqrt{t} = (250 + 600) / \sqrt{0.6}$$

$$= 1\ 097(\text{V})$$

由于 $E_{sm} < E_s$, 所以跨步电势满足规程要求。

2.3.3 接地体的热稳定校验

接地体的最小允许截面积

$$A_i = I \sqrt{t} / 70 = 8\ 580 \times \sqrt{0.6} / 70 = 94.9 (\text{mm}^2)$$

接地体的实际截面为 $50 \times 6 = 300\text{ mm}^2$ 大于 A_i ,

满足安全要求。

3 结 论

现有各种降阻措施在降阻效应、抗腐蚀性和经济性等方面仍不能完全令人满意, 优化设计、综合治理以及开发降阻效率高、抗腐蚀性好、成分稳定、价格低

廉的新型降阻材料将成为接地网降阻研究的主流。

根据某 110 kV 变电站目前的接地网建设情况和实测的接地电阻 ($R=0.84\ \Omega$), 用厚度为 7 cm 的沥青路面结构层, 敷设在接地网内电气设备周围 1.5 m 宽处, 经此处理后, 通过核算, 可以看出该 110 kV 变电站的均压带根数、最大接触电势、跨步电压、接地体热稳定均满足规程及设计要求。

参考文献

- [1] 李润先. 中压电网系统接地实用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] 杨曼. 变电站降低接地电阻方案 [J]. 湖北电力, 2006 (30): 53-55.
- [3] 王周安, 曾永林. 立体地网的建立和应用. 高电压技术, 1999, 22(4): 26-29.
- [4] 孙旭, 王琦. 变电站接地网优化设计 [J]. 广东电力, 1999, 12(3): 16-18.
- [5] 弋东方. 电气工程电气设计手册 (电气一次部分) [S]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [6] 阳宏声. 雷电防护技术培训教材 [K]. 南宁: 广西壮族自治区气象局政策法规处, 2002.
- [7] 王常余. 接地技术 220 问 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004.

作者简介:

李 彬 (1975—), 男, 学士, 研究方向为电力系统及自动化。

(收稿日期: 2009-10-22)

(上接第 44 页)

各种故障类型, 不受非同步时间、故障距离和过渡电阻的影响, 能够达到测距精度的要求。

参考文献

- [1] 董新洲, 葛耀中. 一种使用两端电气量的高压输电线路故障测距算法 [J]. 电力系统自动化, 1995, 19(8): 47-53.
- [2] 梁军, 孟昭勇, 等. 精确双端故障测距新算法 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21(9): 24-27.
- [3] 崔静安, 王安定. 一种采用双端电气量的新型故障测距算法 [J]. 电网技术, 1996, 20(12): 17-19.
- [4] 牛敏, 赵舫. 一种改进的双端测距算法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(1): 17-21.
- [5] 卫志农, 张颖, 周红军. 基于双端不同步采样数据的高压输电线路故障测距 [J]. 继电器, 2005, 33(23): 5-8.
- [6] 于玉泽, 覃剑, 李功新, 等. 电缆—架空线混合线路故障测距方法综述 [J]. 电网技术, 2006, 30(17): 64-69.
- [7] 吴承恩, 邵能灵, 等. 超高压电缆—架空线混合线路故障

测距方法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 26-29.

- [8] 蔡华嵘, 范春菊, 等. 一种实用的高压输电线路双端电气量故障测距新算法 [J]. 中国电力, 2003, 36(7): 31-34.
- [9] 施世鸿, 何奔腾. 基于分布参数模型的双端非同步故障测距算法 [J]. 电网技术, 2008, 32(9): 84-88.
- [10] Lee J B, Ha C W, Jung C H. Development of Digital Distance Relaying Algorithm in Combined Transmission Lines with Underground Power cables [C]. In: Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference Vancouver 2001(1): 611-616.
- [11] 陈皓. 微机保护原理及算法仿真 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

作者简介:

陈 宾 (1983—), 男, 四川成都, 硕士研究生, 研究方向: 电力系统微机保护及控制。

陈 皓 (1962—), 男, 四川成都, 副教授, 博士, 研究方向: 电力系统微机保护及控制。

(收稿日期: 2010-01-10)