

变电站接地技术现状及相关设计问题的探讨

叶成建

(江苏省电力公司建设分公司, 江苏 南京 210004)

摘 要: 变电站接地系统是保证设备与人身安全, 维护电力系统可靠运行的重要措施, 研究变电站的接地技术具有重要意义。本文主要从设计的角度分析和探讨目前国内变电站接地方案中的一些问题, 并结合笔者的工作经历对目前接地技术中存在的问题进行了探讨和研究, 并提出了相关建议与大家分享。

关键词: 变电站; 接地技术; 接地电阻; 地表电位; 电阻率

0 引言

变电站的接地网作为变电站交直流设备工作接地及防雷保护接地的必要设施, 是保障人身和设备安全、保证变电站可靠运行的重要手段。我国曾多次出现因接地网设计不当造成的停电事故^[1, 2]和安全隐患^[3], 因此, 接地网的安全应引起高度重视。一方面, 为满足负荷日益增长需要, 变电站主变容量不断增大, 故障时经地网流散的电流越来越大, 地网电位也随之升高, 给电网运行人员和检修人员的安全带来威胁; 另一方面, 国家政策要求新建电网工程要少占或不占良田好土, 高土壤电阻率地区的新建变电站越来越多, 给变电站接地设计和施工增加了难度。故探讨和研究变电站接地技术, 对电网的安全运行具有现实意义。

1 变电站接地技术现状及研究

1.1 接地网的优化设计

接地网的优化设计技术是通过合理布置变电站地网的接地导体, 以最小的经济代价, 使导体的泄漏电流密度分布和土壤表面的电位分布均匀, 最大限度降低接触电位差和跨步电位差, 保障人身和设备的安全的。

早期变电站接地网设计的均压导体按等间距布置, 由于端部和邻近效应, 接地网边角处散流电流远远大于中心处, 地表电位分布很不均匀, 而且过分增加均压带根数也不能无限制的减小最大接触系数, 反而增加了接地材料的投入。目前的接地网设计一般采用不等间距布置方式, 不等间距的概念在 1976 年提出出来后^[4], 一些学者对均匀土壤和不均匀土壤中地网不等间距布置的规律进行了研究和

探索^[5, 6]。

在变电站接地网工程中, 接地网网孔的边长比一般按 1:1 到 1:3 变化。当接地网孔个数大于 16, 接地电阻降低幅度很小, 故对于小、中型接地网, 建议网孔个数不大于 16 (均压要求除外), 对于大型接地网, 网孔个数也不宜大于 32。

国内研究表明, 变电站接地网面积从 $100 \times 100 \text{m}^2$ 增大到 $600 \times 600 \text{m}^2$ 时, 接地网的接地电阻在不断减少。但接地网面积大于 $200 \times 200 \text{m}^2$ 后, 随着面积越大, 水平导体之间屏蔽作用增强, 对电流的散流的抑制作用也越大。故接地网面积大于一定值后, 增加接地网面积对降阻的作用减少。

目前接地网优化设计主要采用以下三种措施:

- (1) 将接地系统的所有混凝土基础及接线固定装置的钢筋与接地网相连, 同时要求通流容量小于容许值, 确保有足够的接地网导体和垂直接地极的分流;
- (2) 连接接地网导体可确保控制地表地位, 通过交叉连接确保多个故障电流流散通道, 使接地网本身的电位降至最小;
- (3) 将接地网的四角做成圆弧形, 改善接地网外直角处的跨步电势。

1.2 降低接地电阻

随着变电站规模的扩大, 变电站内接地故障电流越来越大, 在接地设计中无法满足的 $R \leq 2000/I$ 要求。现行标准与原标准的区别是对接地电阻值不再规定在 0.5Ω , 而是允许放宽至 5Ω , 但须满足其附加条件, 即: 防止转移电位引起的危害, 应采取各种隔离措施; 考虑短路电流非周期分量的影响, 当接地网电位升高时, $3 \sim 10 \text{kV}$ 避雷器不应动作或动作后不应损坏, 应采取均压措施, 并验算接触电位差和跨步电位差是否满足要求; 施工后应进行测量和绘制电位分布曲线。同时, 变电站地网必须与

二次系统的安全结合考虑。系统正常工作时地网电位接近于零,而故障时流过地网的电流将在地网接地电阻上产生压降,即地电位升高。如不考虑短路时二次电缆芯线上的感应电位,短路时二次电缆承受的电位差即为地电位升高,因此地电位升高直接决定于二次电缆的交流绝缘耐压及二次设备的交流绝缘耐压值。

接地网的接地电阻:

$$R = \rho \varepsilon / C \quad (1)$$

由公式可得降阻两种途径:一是增大接地体几何尺寸,增加接地体的电容 C ;二是改善地质电学性质,减小土壤的电阻率 ρ 和介电系数 ε 。

目前国内降阻的常用方法有:采取不等间距布置来均衡地网电位、电位隔离、利用地质钻孔埋设长接地极、水平接地带换土与加降阻剂交替使用、长垂直接地极加降阻剂、利用地下水的降阻作用、引外接地、所内超深井接地、利用架空地线杆塔接地系统等等。此外,还有爆破接地和斜垂直接地极等技术^[7]。爆破接地技术是近年来提出的一种有效降阻方法,该技术在某些地区已广泛应用。斜垂直接地极主要应用于接地网面积受限制的场合,一方面可向纵深散流,另一方面可扩大散流面积,该技术在国内外工程中也有应用。

1.3 接地网防腐蚀

防止接地网腐蚀的方法主要有^[8]:增加接地导体的截面积、镀锌或镀铜保护接地体、采用耐腐蚀的金属代替钢、采用导电涂料、牺牲阳极保护等等。

接地网腐蚀的主要因素:(1)接地网腐蚀与接地导体的形状有关。我国北方某些地区变电站的水平接地体采用圆钢,直径一般为 $\phi 25\text{mm}$;江苏某些地区水平接地体采用厚度约 $8 \sim 10\text{mm}$,宽度约 $60 \sim 80\text{mm}$ 扁钢。对于同样截面而言,圆钢比扁钢用钢量少,与土壤的接触面小,抗腐蚀性相对较好,但对接地导体的焊接工艺要求较高。建议江苏地区可适当考虑采用圆钢作为水平接地体。(2)接地网因采用铜、钢等不同金属材料形成原料电池发生电化学作用而腐蚀。在无法避免不同金属材料组成的混合接地网时,可通过以下措施防止接地网腐蚀:(一)对铜地网采用外裹砼块的方案,通过混凝土隔离离子在铜和扁钢之间交换,减少电化学腐蚀;(二)在非主地网材料上涂刷绝缘涂料;(三)将不同材料放在不同的介质中,如将铜地网布置在电缆沟中,而

钢地网在土壤中;(四)在铜地网和钢地网交叉连接的接头处采用聚氯乙烯热缩护套包裹。(五)以镀锌钢为接地导体的接地网,施工过程中镀锌层被破坏需即时修补。

案例一:江苏某地区 220kV 变电站因采用铜、钢不同金属材料组成的混合接地网,接地网铜、钢连接点严重腐蚀,造成接地网隔断,接地电阻值过大,引起站内接触电位差和跨步电位差过大,严重影响了变电站工作人员的人身安全。

解决办法:考虑到该站已投入运行,重新敷设接地网不可能。建议在接地网铜、钢连接处焊接铝材导体,利用铝材分别与钢材、铜材形成原料电池,有效阻止铜、钢形成原料电池发生腐蚀。该方法简单可行,投入成本大幅降低,施工难度小。

1.4 接地网材料选取

国内接地材料主要有镀锌钢、铜两种。近年来一些新建GIS变电站开始采用铜材作为接地网。铜地网和钢地网在变电站布置时相互比较结果^[9]:(1)变电站建筑物和构架的基础中含有钢筋,采用铜材接地,易形成原料电池发生电化学作用而导致钢筋混凝土基础腐蚀。(2)接地电阻与土壤电阻率、接地网面积、接地极的布置方案等因素有关,铜材电阻率比钢材低,但接地材料电阻率对接地网的接地电阻影响不大,铜地网优势在于其不等电位问题没有钢地网严重。(3)在碱性或中性土壤中,铜材的抗腐蚀能力比钢强 $2 \sim 3$ 倍;在酸性环境中,铜也会被腐蚀,其被腐蚀的速率稍慢于镀锌钢。

可见,接地材料要根据变电站所在区域土壤的实际情况来判断选择。对采用GIS设备的变电站,在正常的工作状态下由于GIS外壳三相存在不平衡,接地网中有可能因感应而产生较大的电流。在这种情况下,一般宜选择导流能力更强的铜材作为接地网,以更好地满足接地体的热稳定要求。

国外大部分采用铜及镀铜钢,尤其是镀铜钢棒和纳米碳扁钢因其综合性能好而被广泛运用,建议国内相关科研单位可对使用新型接地材料的可行性进行研究和探讨。

表1 国内外不同接地材料的综合性能比较

性能	热稳定性	导电率	耐腐蚀率	价格
铜	差	好	好	高
镀锌钢	好	差	差	便宜
镀铜钢	好	好	好	适中
纳米碳扁钢	好	好	50年	适中

2 变电站接地网设计问题探讨

2.1 短路电流计算相关问题

接地电流计算直接关系到接地电阻、接地线热稳定、设备接触电压和跨步电压的计算。按规程 DL/T621-1997 规定, 接地电流按考虑系统 5~10 年规划的最大运行方式确定, 并计及各中性点的短路电流分配、电线分流和单相接地短路电流值。在利用下列公式进行计算入地短路电流, 取两式中较大的电流 I 值。

$$I = (I_{\max} - I_n)(1 - ke1) \quad (2)$$

$$I = I_n(1 - ke2) \quad (3)$$

式中: I_{\max} ——接地短路时的最大电流, A;

I ——入地短路电流, A;

I_n ——发生最大接地短路电流时, 流经变电站的最大接地短路电流, A;

$ke1, ke2$ ——变电站内、外短路时地线的工频分流系数。

其中 I_{\max} 是选择设备接地引下线和水平接地极截面的依据, I 是计算变电站发生接地故障时地电位升高、接触电位差和跨步电位差的依据。一般来说, 考虑回流和分流后 I 比 I_{\max} 小得多。中性点的回流和避雷线分流系数计算的准确程度对接地网设计的合理性影响较大。尤其是避雷线的分流系数计算, 如果能配合线路专业对变电站出线避雷线进行优化设计, 将会使接地网的设计更为合理。

2.2 高土壤电阻率地区相关问题

当变电站站址表层土壤电阻率较高时, 如何确定一个有效的降阻措施, 成为接地网敷设的关键。下面笔者列举三件有代表性的降阻措施。

(1) 打接地深井是降低变电站接地电阻的常用方法之一, 当地下深处的土壤电阻率较低或者地下水位较高时, 打接地深井降阻效果明显; 当地下深处的土壤电阻率比表层高, 又缺乏地下水或地下水位很深, 打接地深井就达不到降阻目的而其因造价过高而得不偿失。例如, 南方某地区 500 kV 变电站施工人员在打完几口接地深井后, 发现地下都是高电阻率的岩石, 没有发现地下水, 浪费了大量的投资, 问题也没有解决。因此, 采用打接地深井降阻, 要先做好站区及附近深层土壤结构的勘测工作。如果能够利用地质勘察钻孔埋设长垂直接地极, 将大大减少接地工程费用, 但一定要利用地网边缘的

地址钻孔, 且间距不小于接地极长的两倍。

(2) 降阻剂能有效降低接地网的接地电阻, 但其有效使用年限较短。当具有强腐蚀性的化学降阻剂一旦注入土壤中, 会加快接地导体的腐蚀。尤其是, 在小面积接地网中, 采用降阻剂或置换等化学方法可以有效改善接地体附近的高土壤电阻率, 减小接触电阻。但对减小接地电阻作用不大。所以, 实际工程中在对待降阻剂的使用上应特别谨慎, 不可滥用。

(3) 深孔爆破接地技术是近年来降低高土壤电阻率地区接地系统接地电阻十分有效的方法。其基本原理是采用钻孔机在地中垂直钻直径为 100mm、深度为几十米 (在发、变电站接地工程中垂直接地极深度可能达 100m 以上) 的孔, 在孔中布置接地电极, 然后将岩石爆裂、爆松, 接着用压力机将低电阻率材料压入深孔中及爆破制裂产生的缝隙中, 以达到通过低电阻率材料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, 从而达到大幅度降阻的目的。目前南方电网变电站工程中开始广泛应用, 并取得满意的结果, 但其成本投入较大, 工程周期较长。

2.3 水平接地极埋深问题

在我国, 冰冻季节可能对变电站接地网的安全性产生负面影响。为减小影响, 大部分地区是将水平接地网敷设在冻土层以下, 降低其对接地电阻的影响。但某些地区的冻土层厚度达几米, 若仍采用传统做法, 不但地网施工难度极大, 而且大量增加土石方的开挖量, 工程造价大幅增加。研究表明, 如果下层土壤具有较低的电阻率, 加装垂直接地极对降低地网的接地电阻具有一定的效果^[10]。因此, 对冻土层深达几米的特殊工程, 降低水平接地极的敷设深度, 适当增加垂直接地极的根数(垂直接地极埋深在冻土层以下), 可取得良好的技术经济效果。事实上, 许多地区已运行的变电站水平地网埋设深度约为 0.8~1.0 m, 而避雷针、避雷器和变压器等设备下方的垂直接地极埋深超过冻土层。所以, 水平地网是否埋设应在冻土层以下需结合站址土壤的结构特点, 通过技术经济的比较后决定。

案例二: 某地区 110kV 变电站建设用地红线近似梯形, 面积 3203 m², 变电站地网在避雷针、避雷器和变压器等设备下方均已埋设垂直接地极, 埋深均超过冻土层, 但接地电阻测量值 R 仍大于 5Ω,

不满足设计要求。

分析及建议：考虑到该站规划红线已下达，扩大接地网敷设面积不可能；若采用深孔爆破接地技术投资较大，超过投资预算；因该站面积小，并已在避雷针、避雷器和变压器等设备下方均已埋设垂直接地极，如在变电站四角端深埋垂直接地极，因电流屏蔽作用，降阻效果不明显。建议在变电站四角端深埋斜垂直接地极，埋设方向沿梯形对角线斜向地下深层埋设。该方法简单有效，施工难度小，但要先做好站区及附近深层土壤结构的勘测工作。

3 结论

在电力发展的新形式下，变电站接地技术和接地设计优化方法的探索和研究，对维护电力系统的安全稳定运行具有重要的现实意义。变电站接地技术应结合实际情况选择，在实施过程中应重点考虑地网的布置、敷设深度、腐蚀及热稳定校验等方面。

参考文献

- [1] 涂明,林志伟. 湖北 220 kV 及以上变电站接地网问题 and 对策[J]. 湖北电力, 2002, 26(1): 10-11.

- [21] 鲍敏铎. 110 kV 海盐变电所接地装置不合格导致扩大事故原因分析[J]. 华东电力, 1993, (2): 13-15.
- [3] 王西平. 330kV 花园变人工接地网改造设计的理论核算[J]. 青海电力, 2000, (1): 13-16.
- [4] DL/T 62121997, 交流电气装置的接地[S].
- [5] 徐华. 大型变电站接地网的参数计算和优化设计[D]. 武汉大学, 2004.
- [6] 高延庆, 何金良, 曾嵘, 等. 非均匀土壤中变电站接地网优化设计[J]. 清华大学学报, 2002, 42(3): 345-348.
- [7] 何金良, 曾嵘, 高延庆. 电力系统接地技术研究进展[J]. 电力建设, 2004, 25(6): 1-3.
- [8] 闫风洁, 李辛庚. 电力接地网腐蚀与防护技术的进展[J]. 山东电力技术, 2007, (1): 9-13.
- [9] 刘午阳, 张蔼忱. 变电站钢接地网与铜接地网的经济性比较[J]. 河北电力技术, 2007, 26(4): 16-17.
- [10] 曾嵘, 何金良, 吴维韩, 等. 变电站接地系统中垂直接地级作用分析[J]. 中国电力, 2000, 33(5): 62-65.

作者简介:

叶成建 (1984-), 男, 安徽滁州人, 工程师, 从事基建管理工作。