

高土壤电阻率变电站降阻措施分析及降阻目标选择

钟山,周炜明

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川成都 610021)

摘要:采用接地系统辅助设计软件包CDEGS,结合工程实例对局部换土、深井接地、引外接地和敷设接地极(接地模块或离子接地棒)4种高土壤电阻率变电站常用降阻措施进行了仿真计算。基于计算结果分析了每种降阻措施的降阻特性,并提出了工程应用建议。此外,在确保人身和设备安全前提下,探讨了如何合理选择降阻目标避免过度设计。

关键词:变电站;降阻措施;降阻特性;降阻目标

中图分类号:TM645 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)03-0056-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210311

Analysis of Resistance Reduction Measures and Its Target Selection for Substation with High Soil Resistivity

Zhong Shan, Zhou Weiming

(CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: Using CDEGS software package of grounding system and combined with engineering examples, four common resistance reduction measures for substation with high soil resistivity, including local soil replacement, deep well grounding, external grounding and laying grounding electrode (grounding module or ion grounding rod), are simulated and calculated. Based on the calculation results, the resistance reduction characteristics of each measure are analyzed, and the engineering application suggestions are put forward. In addition, on the premise of ensuring personal and equipment safety, how to reasonably select the target of resistance reduction to avoid over design is discussed.

Key words: substation; resistance reduction measures; resistance reduction characteristics; target of resistance reduction

0 引言

中国可利用土地资源十分宝贵,变电站选址越来越困难。相当多的变电站站址处于山区,造成站内土壤电阻率高且不均匀,接地系统设计难以满足规程规范要求,尤其对于西南山区,地质条件恶劣,地下水源匮乏,其矛盾更为突出。

在高土壤电阻率变电站,为降低接地系统的接地电阻,工程技术人员开展了大量研究工作,提出了局部换土、深井接地、引外接地和敷设接地极(接地模块或离子棒)等新型降阻措施,并在工程中取得了显著效果^[1-3]。但目前高土壤率变电站接地设计中,如何结合工程实际选用技术经济合理的降阻措施主要还是参考以往工程经验,缺乏对各降阻措施

的降阻特性的定量分析来指导工程设计。而降阻措施的选择失当,不但达不到期望的降阻效果,反而可能造成巨大的经济浪费。因此,有必要对常用降阻措施及其降阻特性进行研究,便于工程应用中合理选择。

此外,即使采用了相应的降阻措施,部分变电站的接地电阻仍难以满足规程对接地电阻的要求。在确保人员和设备安全的前提下,合理确定降阻目标,避免过度设计是工程设计中值得研究的课题。

1 常用降阻措施及特性分析

高土壤电阻率变电站接地装置的接地电阻往往较大,发生接地故障后地电位升较高,接触电压及跨步电压难以满足规范要求,运行人员及设备安全难

以得到保证。因此,在接地系统设计时,必须采取降阻措施以确保变电站安全和可靠运行。

在工程应用中,较为常用的降阻措施主要有以下几种:1)回填粘土、矿渣或降阻剂;2)深埋接地体,采用接地深井;3)敷设外引接地体;4)敷设接地电极(接地模块或离子接地棒)^[1,4]。

此外,深井爆破法及空腹式接地装置等新型降阻措施也在近年来的一些变电站接地网设计及改造中得到应用,由于尚未得到广泛应用,下面重点对前述4种降阻措施的降阻特性采用 CDEGS 软件包进行计算及分析。

为了便于对各种降阻措施的降阻效果进行比较,定义降阻率为

$$\mu = (1 - \frac{R'}{R}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: R' 为接地网采用降阻措施后的接地电阻, Ω ; R 为接地网的接地电阻, Ω 。

从式(1)可以看出,降阻率越大,说明降阻措施的降阻效果越好。

如无特别说明,仿真计算采用的基本模型为某 500 kV 变电站工程实例:200 m × 150 m 的 10 m 均匀等间距地网,导体为截面 60 mm × 8 mm 的镀锌扁钢。

1.1 回填粘土、矿渣或降阻剂

回填粘土、矿渣或降阻剂是目前工程中采用较多的降阻方式,通常称之为换土。换土的方式主要有两种:部分回填(仅对地网周边一圈导体进行换土回填)和全部回填(对地网中所有导体进行换土回填)。

通过改变地网所处土壤的电阻率大小,仿真计算两种方式的降阻率。

1) 部分回填

将地网周边一圈导体换填直径为 1 m、电阻率为 100 $\Omega \cdot m$ 的粘土,计算结果如表 1 和图 1 所示。

表 1 部分换土后的降阻率

| 土壤电阻率/($\Omega \cdot m$) | R/Ω | R'/Ω | $\mu/\%$ |
|----------------------------|------------|-------------|----------|
| 500 | 2.04 | 2.01 | 1.46 |
| 1000 | 3.08 | 2.99 | 2.85 |
| 2000 | 5.46 | 5.24 | 4.02 |
| 3000 | 7.95 | 7.60 | 4.40 |
| 4000 | 10.48 | 10.01 | 4.57 |
| 5000 | 13.03 | 12.42 | 4.66 |

2) 全部回填

将地网中所有导体换填直径为 1 m、电阻率为 100 $\Omega \cdot m$ 的粘土,计算结果如表 2 和图 1 所示。

表 2 全部换土后的降阻率

| 土壤电阻率/($\Omega \cdot m$) | R/Ω | R'/Ω | $\mu/\%$ |
|----------------------------|------------|-------------|----------|
| 500 | 2.04 | 1.99 | 2.28 |
| 1000 | 3.08 | 2.95 | 4.26 |
| 2000 | 5.46 | 5.14 | 5.90 |
| 3000 | 7.95 | 7.44 | 6.41 |
| 4000 | 10.48 | 9.79 | 6.63 |
| 5000 | 13.03 | 12.15 | 6.75 |

采用换填粘土措施降阻,在工程中应用较多。从计算结果可以看出,地网所在区域土壤电阻率越大,其降阻效果就越好。图 1 为两种换土方式降阻率随土壤电阻率变化的比较曲线,从曲线可以看出全部换土的降阻效果虽然比部分换土的效果要好,但并无质的提高。

根据上述计算结果,对于站址附近具备粘土、经济费用不高的工程,可以采用部分换土的方式进行降阻,考虑到全部换土的降阻效果并不理想,且工程量太大,因此不建议采用。

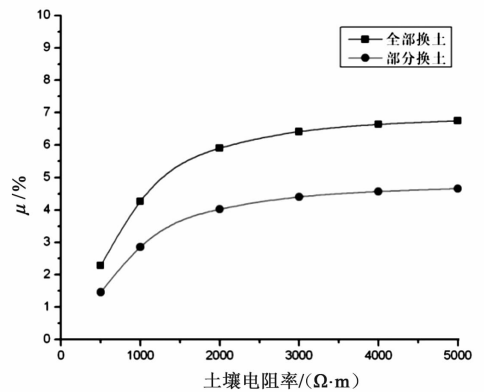


图 1 换土后降阻率曲线

1.2 接地深井

土壤的电阻率通常沿纵深方向分布是不均匀的,不同深度土壤电阻率是不同的。一般接近地面几米以内的电阻率并不稳定,会随季节气候的变化而变化。土壤越深,电阻率越稳定,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,采用垂直接地极与主接地网并联是一种有效降低接地电阻的方法。同时由于垂直接地极方式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。

采用接地深井的降阻效果主要与接地深井的安

装位置及地网所在区域深层土壤电阻率密切相关,采用 CDEGS 软件包进行仿真计算分析如下:

1) 接地井位置对降阻效果的影响

采用基本模型,假设地网区域土壤电阻率为 $2000 \Omega \cdot \text{m}$,计算当在地网的中心、边、角 3 个不同位置分别设置 1 口 100 m 深的接地井时的降阻效果。计算结果如表 3 所示。

表 3 不同位置安装接地井降阻效果计算结果

| 接地井位置 | 接地电阻/ Ω | $\mu/\%$ |
|-------|----------------|----------|
| 未安装 | 5.46 | — |
| 中心 | 5.39 | 1.20 |
| 边 | 5.36 | 1.81 |
| 角 | 5.29 | 3.16 |

从表 3 可以看出,在地网角上加入接地极的降阻效果最佳,其次是边,接地井在地网中心时降阻效果最差。主要原因在于:当接地井安装于地网角上,其与地网的相互屏蔽效应最低,散流密度最大,边次之,接地井在地网中心,屏蔽效应最高,所以降阻效果最差。

2) 深层土壤电阻率对降阻效果的影响

上例中深层土壤电阻率设置也为 $2000 \Omega \cdot \text{m}$,与表层相同,因此深井降阻效果并不理想。采用双层土壤模型,上层土壤厚度为 50 m,土壤电阻率为 $2000 \Omega \cdot \text{m}$;下层土壤厚度为无穷,改变下层土壤电阻率,计算降阻率,结果如表 4 和图 2 所示。

表 4 不同下层土壤电阻率时降阻效果计算结果

| 下层土壤电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$ | 接地电阻/ Ω | $\mu/\%$ |
|------------------------------------|----------------|----------|
| 2000 | 5.46 | — |
| 1000 | 4.14 | 24.18 |
| 500 | 3.45 | 36.81 |
| 200 | 3.09 | 43.41 |
| 50 | 2.92 | 46.52 |

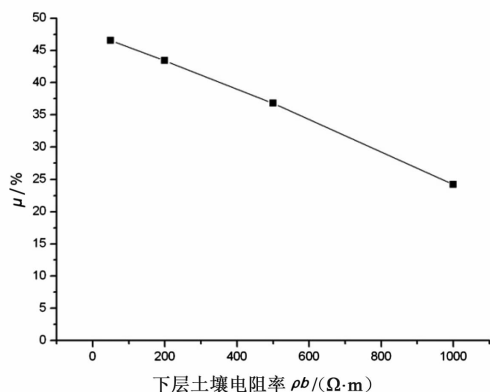


图 2 下层土壤电阻率对深井降阻的影响曲线

计算结果表明,下层土壤电阻率越低,采用接地深井降阻的效果越好,且效果非常明显。如在工程中采用该措施,必须对站区深层土壤电阻率进行勘测,在土壤电阻率低的前提下再使用,同时应兼顾到深井的设置位置,使降阻效果达到最优。在 1 口深井无法满足降阻需要的时候,可设置多口,但应注意到它们之间的屏蔽作用,尽可能使间距最大。

1.3 外引接地体

对于高土壤电阻率变电站,如果站外附近有低电阻率地区,比如水塘、水沟等,可以在这些区域敷设辅助接地体,从而降低接地系统的接地电阻。影响外引接地体降阻效果的主要因素就是接地网至站外低电阻率地区的长度。

采用基本模型,并使用 2 根截面为 240 mm^2 的扁钢将主地网引入附近的河流中,其土壤电阻率考虑为 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 。改变地网与河流的距离,计算相应外引降阻率。计算结果如表 5 和图 3 所示。

表 5 不同外引接地体降阻效果计算结果

| 外引长度/m | 接地电阻/ Ω | $\mu/\%$ |
|--------|----------------|----------|
| 0 | 5.46 | — |
| 500 | 3.62 | 33.61 |
| 1000 | 2.91 | 46.73 |
| 1500 | 2.50 | 54.19 |
| 2000 | 2.27 | 58.47 |
| 2500 | 2.14 | 60.82 |
| 3000 | 2.08 | 61.82 |
| 3500 | 2.07 | 61.98 |
| 4000 | 2.09 | 61.57 |

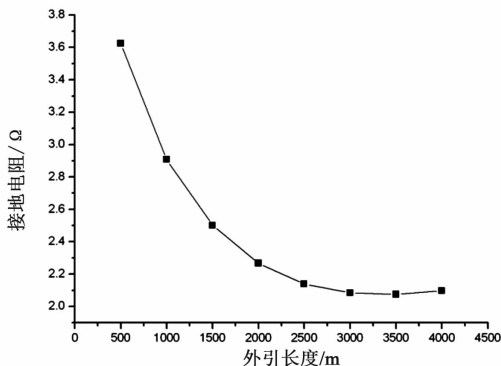


图 3 不同长度外引接地体时地网的接地电阻

从图 3 可以看出,采用外引接地体降阻效果明显。随着外引长度的增加,地网接地电阻逐步减小,主要原因在于增加了其散流长度。当外引长度在 2000 m 内,降阻效应随长度的增加十分显著,但是

大于2000 m后,曲线趋于平稳,且当外引达到一定长度后,接地电阻不降反而有轻微的上升。这种现象产生的主要原因是,延长接地体本身也增加了接地系统的电阻,当达到一定长度后增加的电阻大于相应的降阻效应。

上述仿真说明,具备外部条件的情况下,外引接地体是一种较好的降阻方式。但应注意校核外引接地体通过路径的跨步电压是否满足规程要求,如不符合要求必须采取增加接地体埋深或敷设沥青路面措施,同时还应定期检测外引接地体是否完好。

1.4 离子接地极

近年来,采用离子接地极降阻在工程中得到了-定范围的应用。与普通垂直接地极比较,由于其随时间推移能够逐步散发电解离子,可以局部改善周边的土壤特性,具备更好的降阻效果。对于单根离子接地极的降阻效果的定量分析,通常按式(2)计算。

$$R_v = \frac{\rho_1}{2\pi l} (\ln \frac{8 \times l}{d} - 1) \times k \quad (2)$$

式中: R_v 为离子棒的等效接地电阻; ρ_1 为土壤的电阻率; l 为离子棒长度; d 为离子棒直径; k 为屏蔽系数,取0.2。

工程经验表明,当使用多根离子接地极降阻时,由于存在多根之间的屏蔽作用,其等效接地电阻并不能简单采用并联计算。屏蔽系数的选择,由于缺乏试验测试的数据支持,尚无法确定。在工程应用中应沿接地网边沿敷设,其最小间距应大于2倍的接地极长度,这样才能减少屏蔽效应,起到良好的效果。

2 降阻目标的选择

《交流电气装置的接地设计规范》规定,接地网的接地电阻宜满足式(3)的要求:

$$R \leq 2000/I_G \quad (3)$$

式中: R 为采用季节变化的最大接地电阻, Ω ; I_G 为计算用经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值,A。

当接地网的接地电阻不符合式(3)要求时,可通过技术经济比较适当增大接地电阻^[5]。这就给设计人员提供了一个较大选择空间,同时也提出了一个问题,接地电阻降到多少是合适的。

通常一个500 kV变电站,其接地费用约150万元左右;而对于高土壤电阻率变电站,由于需采取降阻措施,其接地系统费用高达300~500万元,甚至仍有上升趋势;因此,合理选择降阻目标是十分重要的,可以避免不必要的经济浪费。

2.1 确定降阻目标的主要因素

大量研究成果表明,高土壤电阻率变电站的降阻目标主要由以下两个因素决定:

1) 满足接触电压和跨步电压要求

确保人身及设备安全是接地系统设计的首要目标。接触电压和跨步电压要求在文献[5]中均有相应要求,不再赘述。通常高土壤电阻率变电站降阻后,跨步电压较易满足,而接触电压难度较大,可通过敷设碎石或沥青混凝土地面等辅助措施来解决。

2) 避免转移电位的危害

由于接地电阻较大,造成变电站地电位升比较高,为确保设备及人身安全,应避免高电位引出地网和低电位引入地网,主要有以下几个方面需注意:

- (1) 向站外供电的三相四线制低压的隔离;
- (2) 对外通讯线路的隔离;
- (3) 铁轨和金属管道的隔离;
- (4) 阀型避雷器的误动作。

设计人员应主要从以上两个方面来考虑,经技术经济比较确定具体工程接地系统的允许接地电阻。

2.2 设定降阻目标的误区

由于地电位升与地网的接触电压及跨步电压密切相关,地电位升越高,接触电压及跨步电压计算值越大,越难以满足该接地系统的允许值。因此,通常通过降阻来降低地网的地电位升,并消除过大的地电位升带来的危害。但两者是否存在线性关系,其实不然。

某500 kV变电站接地电阻和分流系统计算情况如表6所示。相应地电位升与接地电阻关系如图4所示。

由计算结果可以看出,即使当接地电阻从10 Ω 降低至1 Ω 时,其地电位升并未明显降低,而在低于1 Ω 后,地电位升则下降明显。算例表明,降低地网的接地电阻,并不能象通常认为的能等比例地降低

表6 不同接地电阻分流系数计算结果

| 接地电阻/ Ω | 入地电流/A | 分流系数/% | 地电位升/V |
|----------------|---------|--------|--------|
| 0.1 | 9 746.0 | 75.64 | 975 |
| 0.2 | 6 280.0 | 84.30 | 1256 |
| 0.3 | 4 617.1 | 88.46 | 1385 |
| 0.4 | 3 646.9 | 90.88 | 1459 |
| 0.5 | 3 012.5 | 92.47 | 1506 |
| 0.6 | 2 565.6 | 93.59 | 1539 |
| 0.7 | 2 234.0 | 94.42 | 1564 |
| 0.8 | 1 978.1 | 95.05 | 1583 |
| 0.9 | 1 774.8 | 95.56 | 1597 |
| 1.0 | 1 609.4 | 95.98 | 1609 |
| 1.2 | 1 356.4 | 96.61 | 1628 |
| 1.4 | 1 172.1 | 97.07 | 1641 |
| 1.6 | 1 031.9 | 97.42 | 1651 |
| 1.8 | 921.7 | 97.70 | 1659 |
| 2.0 | 832.7 | 97.92 | 1665 |
| 2.5 | 670.8 | 98.32 | 1677 |
| 3.0 | 561.6 | 98.60 | 1685 |
| 3.5 | 482.9 | 98.79 | 1690 |
| 4.0 | 423.6 | 98.94 | 1695 |
| 4.5 | 377.3 | 99.06 | 1698 |
| 5.0 | 340.1 | 99.15 | 1700 |
| 6.0 | 284.1 | 99.29 | 1704 |
| 7.0 | 243.9 | 99.40 | 1707 |
| 8.0 | 213.7 | 99.47 | 1709 |
| 9.0 | 190.1 | 99.52 | 1711 |
| 10.0 | 171.2 | 99.57 | 1712 |

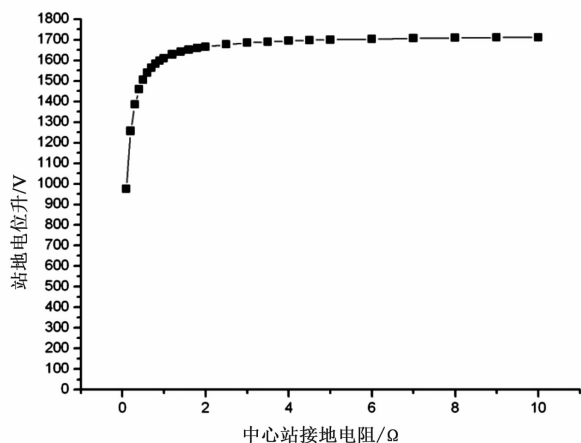


图4 地电位升与地网接地电阻的关系曲线

地电位升,原因在于当接地电阻降低,其分流系数也将降低,入地电流反而增大,地电位升随之增大,从而抵消或部分抵消降阻对降低地电位升的影响。因此,选择降阻目标必须慎重,过度设计或盲目降阻将可能造成巨大的经济浪费。

3 结 语

前面对工程应用中的主要降阻措施进行了仿真分析,并探讨了如何设定降阻目标,主要结论如下:

1)换土降阻的效果并不理想,其降阻率偏低,在代价不高情况下,可在地网边沿采用部分换土回填方式降阻。

2)深井接地极在深层土壤电阻率低的前提下,降阻效果明显,接地井应设置在地网边角上,使降阻效果最优。

3)低土壤电阻率区域在距离地网 2000 m 范围内时,外引接地体降阻效果明显,超过该距离降阻效果与延长接地体增加的电阻将相互抵消。

4)工程实践表明,离子接地体具有一定降阻效果,在采用多根离子接地体降阻时应考虑屏蔽效应的影响。

5)接地网的降阻目标应主要考虑满足接触电压及跨步电压的需要,同时避免转移电位的危害。

6)地网的地电位升应根据分流系数的计算结果确定,盲目采用降低电阻的方式降低地电位升不可取。

参考文献

- [1] 何金良,曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [2] 许非吾,张亮,刘义华,等. 500 kV 兰亭变电所接地网降阻改造[J]. 高压技术,2008,34(4):839-841.
- [3] 田松. 深井接地极在变电站接地网中的应用分析[J]. 电工电气,2019(1):37-39.
- [4] 张波,何金良,曾嵘. 电力系统接地技术现状及展望[J]. 高压技术,2015,41(8):2569-2582.
- [5] 交流电气装置的接地设计规范:GB/T 50065—2011[S],2012.

作者简介:

钟山(1975),男,硕士研究生,高级工程师,从事变电站设计及设计管理工作。

(收稿日期:2020-11-15)