

针对变电站外部接地网受损后的应对措施研究

赵 喆

(中国石化物资装备部(国际事业有限公司), 北京 100728)

摘要: 为了应对变电站外部接地网损毁后出现的站内安全性参数不符合规程要求的情况, 需要对变电站内部剩余的主体接地网进行适当的改造, 以使站内的接触电压和跨步电压等符合安全性要求。分别提出了应用离子接地极、垂直接地体和接地模块不同材质接地材料的三种不同接地网改造方案, 仿真试验的结果表明三种改造方案均在一定程度上缓解了站内的安全性超标情况。其中表现效果排序为: 离子接地极 > 垂直接地体 > 接地模块, 离子接地极和垂直接地体的使用均能使接触电压、跨步电压降至安全限值以内, 而接地模块的表现则稍逊色, 其对应的接触电压仍然略大于安全值, 故接地模块在此类问题中的使用还有待于进一步研究。研究结论可以为类似情形的接地网优化改造提供参考。

关键词: 接地网改造; 工频接地电阻; 接触电压; 跨步电压; CDEGS; 离子接地极; 接地模块

The countermeasures for the damaged external grounding grid of substation

ZHAO Zhe

(Sinopec Procurement Division (Sinopec International Co., Ltd.), Beijing 100728, China)

Abstract: In order to deal with the situation that the safety parameters in the substation do not meet the requirements of the regulations after the external grounding grid of the substation is damaged, it is necessary to carry out appropriate reconstruction works on the remaining main grounding grid in the substation, so as to make the contact voltage and step voltage in the substation meet the safety requirements. The results of simulation test show that the three transformation schemes can alleviate the phenomenon of safety exceeding the standard to a certain extent, and the order of performance effect is: ion grounding electrode > vertical grounding body > grounding module. The use of ion grounding electrode and vertical grounding body can reduce the contact voltage and step voltage to within the safety limit, while the use of grounding module can not. Therefore, the use of grounding module in this kind of problem needs further research. The research conclusions can provide reference information for the optimization and transformation of grounding grid in similar situations.

Key words: transformation of grounding grid; power frequency grounding resistance; contact voltage; step voltage; CDEGS; ion grounding electrode; grounding module

0 引言

由于征地纠纷、人为盗窃、取土挖断和腐蚀断裂等因素常常造成变电站外接地网被破坏, 近年来接地网的设计局限于变电站围墙内部的呼声愈演愈烈, 因此新投入使用的变电站、换流站等

接地网往往不存在站外接地网被破坏而威胁到站内的人员安全及设备正常运行的情况。但对于服役年限较长的变电站接地网而言, 为了达到接地电阻的验收指标要求, 将接地网延伸至站址围墙外部, 为接地网的日常维护留下安全隐患。如何

针对这一特定的场景,在变电站围墙内部利用有限的土壤面积进行改造设计,使接地电阻符合验收标准,且站内工频故障下的接触电压和跨步电压等与工作人员息息相关的指标同时满足标准要求,成为接地网改造设计的目标^[1-4]。

目前业内常用的几类接地体材料包括铜包钢、锌包钢、不锈钢包钢、离子接地棒、柔性石墨接地材料和接地模块等。文献[5]针对不同接地模块在接地体中的作用展开论述,着重针对不同形状、数量和布置方式等因素对接地模块冲击特性的影响进行研究,并给出了接地模块的应用建议;文献[6]针对缓释型离子接地装置的研发展开研究,通过对比不同配方和不同配比的内外填料对接地电阻的影响,得到了较优的离子接地装置制作方案;文献[7]基于CDEGS软件对离子接地深井的建模以及仿真试验展开研究,通过对某工程实际中的离子接地深井进行建模和仿真,结果与现场实测的接地电阻数据较为吻合,证明了应用软件进行仿真试验对离子接地深井的接地体设计工作具有指导意义;文献[8]针对降阻剂在垂直接地体周围的敷设进行了对比性探索,证明在垂直接地体周围敷设降阻剂可以显著改善接地体的各项电气性能。

本文将针对变电站外部接地网被破坏时的场景进行分析,基于前人对不同接地材料的研究成果,摒弃变电站外部的扩辅助接地网,而立足于变电站围墙内部的有限面积,将各类接地材料试探性应用于该变电站的接地网优化改造中,以使站内各项指标能够满足安全性要求。

1 改造方案

以某石化工程220 kV总变电站为例,在CDEGS软件中建立原有接地网仿真模型结构,如图1所示。其中站内主体接地网长100 m,宽60 m,接地网的均压带选择等间隔的布置方式,即接地网格的尺寸为5 m × 5 m,站外接地网以斜接地体为主,沿着变电站内接地网的边缘,共有9个长度为30 m的45°斜接地体延伸至站

外。此外在沿着变电站进站道路下,敷设有长度30 m、宽度8 m的辅助接地网。

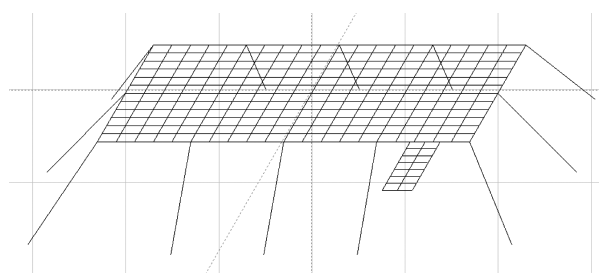


图1 变电站原始接地网模型

Fig. 1 Original grounding grid model of substation

站址土壤电阻率分层参数见表1,在对接地进行优化设计的过程中,将保持土壤参数不变,其次站内主体接地网保持不变,通过模拟不改变已埋设的主体接地网结构来达到后期改造设计的目的。图2为站外辅助接地网全部遭受破坏或者拆除时的场景,仅存站内主体接地网,将借助CDEGS软件进行接地网建模,通过仿真试验的形式对接地网进行改造设计。使得站内发生单相短路接地故障时,工频入地电流引起的接触电压、跨步电压等安全性指标能够满足规程中的相关要求^[9]。

表1 接地网所处区域的土壤电阻率分层模型

Tab.1 Layer model of soil resistivity in the area of grounding grid

土壤分层	土壤电阻率 / ($\Omega \cdot m$)	厚度 / m
顶层	482	3
中间层	278	35
底层	105	∞

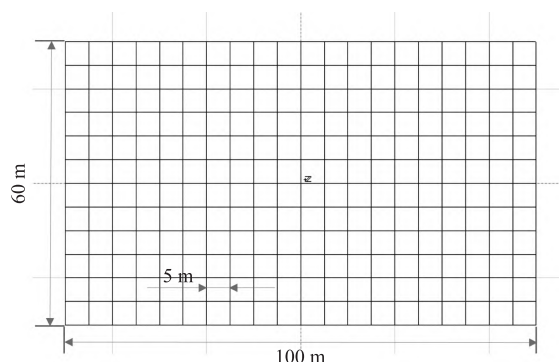


图2 变电站外部接地网遭受损毁后的接地网模型 D

Fig. 2 Model D of grounding grid after external grounding grid of substation is damaged

关于接地网改造设计方案的思路，可以从以下几个角度进行：

- 1) 站内原有主体接地网已经延伸至靠近围墙。
- 2) 站内的主体接地网不能被更改，且不停电施工，最大程度缩短用户侧停电时间。
- 3) 站内土地面积有限，且土壤电阻率属于相对较高的水平。
- 4) 站内的接触电压和跨步电压较大数值均分布在接地网的边缘和四角位置。

根据1) 中条件，在站内进行水平扩网的方式进行改造不可行，并且扩网的效果一般。变电站原有的外部接地网为斜接地体加进站道路下接地网的形式，由于站内土壤面积有限，可以引入降阻效果较好的离子接地棒和接地模块进行接地网改造。初步设计图如图3所示，在接地网靠近围墙的周围增设了12根离子接地极，定义该种改造方式为接地网E；此外还可以借助接地网边缘进行垂直接地体的敷设，并且在垂直接地体的敷设处灌注长效物理降阻剂，设计如图4所示，定义为接地网F；此外还可以借助接地网有限的边缘敷设一系列的接地模块进行改造，如图5所示，定义为接地网G。分别在CDEGS中建立上述的几种接地网改造模型并进行仿真试验，在对接地模块、离子接地极、垂直接地体和长效物理降阻剂的建模过程中，主要是在CDEGS中通过更改材料的涂层厚度及其电阻率实现仿真试验的目的，具体的接地材料尺寸及其电阻率见表2。

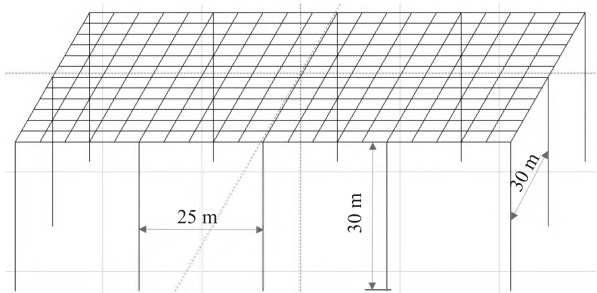


图3 使用离子接地极改造后的接地网模型 E
Fig. 3 Ground grid model E after using ion ground electrode

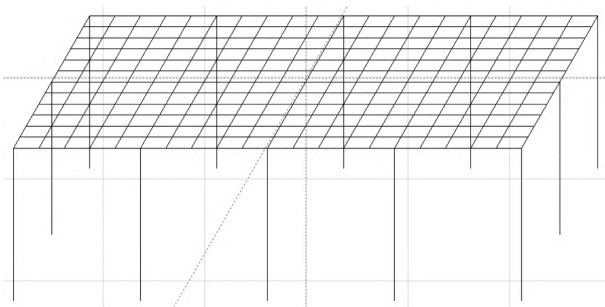


图4 使用垂直接地体改造后的接地网模型 F
Fig. 4 The ground grid model F after using the vertical grounding body

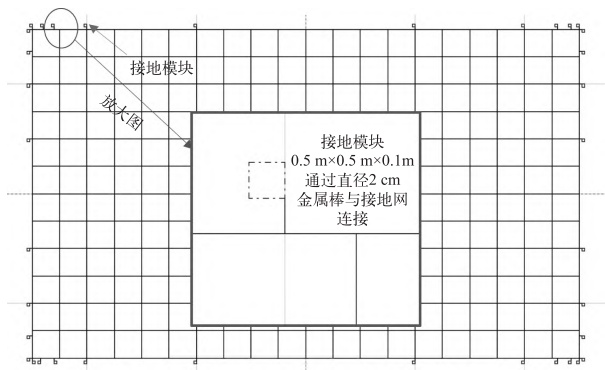


图5 使用接地模块改造后的接地网模型 G
Fig. 5 Ground grid model G after using ground module transformation

表2 选用的不同接地材料的尺寸及电阻率参数
Tab. 2 Size and resistivity parameters of different grounding materials selected

接地材料种类	尺寸 /m	电阻率 / (Ω·m)
接地模块	0.5×0.5×0.1	20
离子接地极	φ0.1×L30	10
物理降阻剂	厚度 0.1	20
垂直接地体	φ0.02×L30	-

为了得到站内的接触电压、跨步电压等安全性参数，保持与本文中同样的故障电流注入接地网。当站内发生单相接地故障时，流入接地网的故障电流为4.97 kA，对于初步设计的三种不同形式的接地网改造方案，均选用此故障电流流入接地网，且接地网所处区域的土壤电阻率参数均保持不变。

2 改造后接地网工频接地电阻值研究

本节针对三种不同改造形式的接地网工频特性展开研究,以工频接地电阻作为衡量指标,分析不同改造方式的降阻效果。具体仿真试验结果见表3。接地网D的工频接地电阻值为 $0.889\ 0\ \Omega$,接地网E的工频接地电阻值为 $0.449\ 8\ \Omega$,接地网F的工频接地电阻值为 $0.591\ 9\ \Omega$,接地网G的工频接地电阻值为 $0.873\ 5\ \Omega$ 。如果以接地网D的工频接地电阻值作为参考,可以计算出离子接地极对接地网的降阻贡献率为49.4%,接地模块对接地网的降阻贡献率为1.7%,垂直接地体对接地网的降阻贡献率为33.4%。降阻率的大小排序为:离子接地极>垂直接地体>接地模块。究其原因是因为受该地的土壤电阻率分层情况影响较大,离子接地极和垂直接地体的长度较大,可以接触到中间相对较低水平电阻率的土壤,故此较接地模块改造的接地网接地电阻值低。将离子接地极和垂直接地体的降阻效果对比,两者长度、数量以及布置方式均相同,降阻率却相差16%。这是由于离子接地极的内部填充物电阻率更低,易于散流,进而导致工频接地电阻值偏低。

表3 三种不同的接地网改造方案对应的工频接地电阻值

Tab. 3 Power frequency grounding resistance corresponding to three different transformation schemes of grounding grid

接地网类型	工频电阻值/ Ω	降阻率(%)
D	0.889 0	-
E	0.449 8	49.4
F	0.591 9	33.4
G	0.873 5	1.7

3 站内安全性指标研究

针对三种不同形式的接地网改造方案对应的站内安全性指标展开分析,以站内接触电压和跨步电压为衡量指标,进一步对三种不同形式的接地网改造方案进行评估。首先需要明确站内接触电压和跨步电压的安全限值,站内的接触电压安全限值为440.8 V,跨步电压安全限值为1 215 V,并且接触电压和跨步电压较大数值均分布在接地网的边缘和四角位置。当短路故障电流注入原

始接地网D时,原始接地网D对应的接触电压为1 340 V,跨步电压最大值为249 V,其接触电压达到了安全限值的近3倍,具有安全隐患;但跨步电压值远小于安全限值,这一情况不会对人员造成安全威胁。在下文中将采用相同的故障电流注入三种改造后的接地网,以分析其站内的接触电压和跨步电压分布情况。

在接地网周围增设12根离子接地极后为接地网E,站内对应的接触电压和跨步电压分布分别如图6、图7所示。可以直观地观察到站内的接触电压和跨步电压值出现了明显的降低。在连接有离子接地极的接地网周围下降趋势更为明显,接触电压最大值为215.85 V,相比原始接地网D降低了83.9%,跨步电压最大值为131.28 V,相比原始接地网D降低了47.3%,可见接触电压和跨步电压的站内分布情况均满足安全限值的要求。接触电压的较大数值仍然分布在接地网的四角和

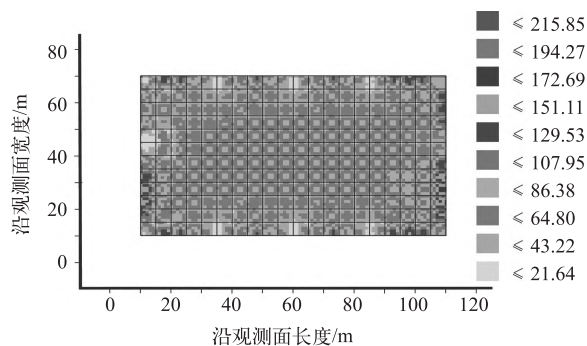


图6 接地网模型E对应的站内接触电压分布

Fig. 6 Distribution of contact voltage in station corresponding to grounding grid model E

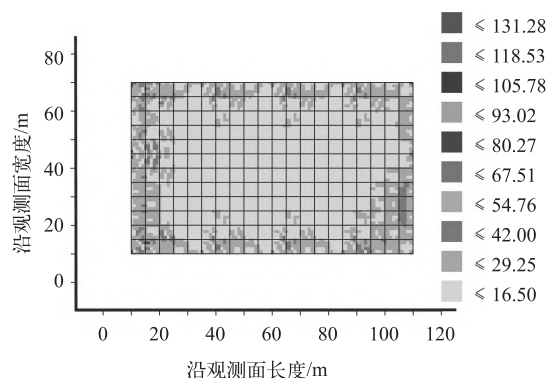


图7 接地网模型E对应的站内跨步电压分布

Fig. 7 Step voltage distribution in station corresponding to grounding grid model E

边缘,所不同的是数值大幅下降。一方面是由于离子接地极的存在,使得接地网纵向可以延伸至土壤电阻率相对较低的水平;另一方面是由于离子接地极本身的填充物电阻率较低,两者均有助于故障电流向周围土壤散流,进而有助于电压的降低。

接地网周围增设垂直接地体后为接地网F,站内对应的接触电压和跨步电压分布分别如图8、图9所示。接触电压最大值为338.95 V,相比原始接地网D降低了74.7%,相比接地网E增加了6%;跨步电压的最大值为70.49 V,相比接地网D降低了74.5%,相比接地网E降低了46.5%。可见垂直接地极对于接触电压和跨步电压数值的降低效果要弱于离子接地极,但是整体效果使接触电压和跨步电压的数值均降低至安全限值以内,基本达到了接地网的改造目标。观察接触电压和跨步电压的具体分布,呈现出与接地网E类似的分布规律。这是因为接地网F中的垂直接地体和接地网E中的离子接地极布置位置、数量相同,垂直接地体周围敷设的物理降阻剂电阻率仅为 $20\ \Omega\cdot\text{m}$,故障电流将沿着垂直接地体流入附近的降阻剂和周围土壤,所以观察到垂直接地体的周围电压分布出现明显的低谷,直径约为5 m,即在垂直接地体周围半径2.5 m的范围内,接触电压和跨步电压的数值均出现明显的降低,这一数值对垂直接地体在大型接地网中的布置间隔起到一定的指导作用。

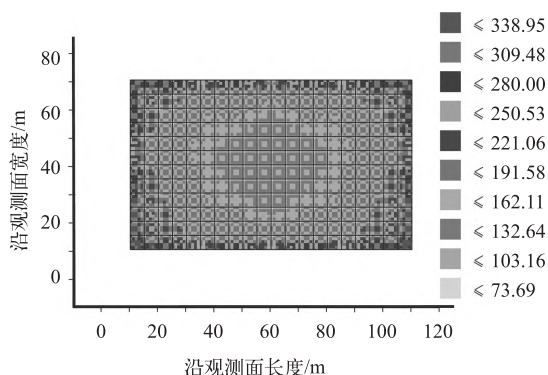


图8 接地网模型F对应的站内接触电压分布

Fig. 8 Distribution of contact voltage in station corresponding to grounding grid model F

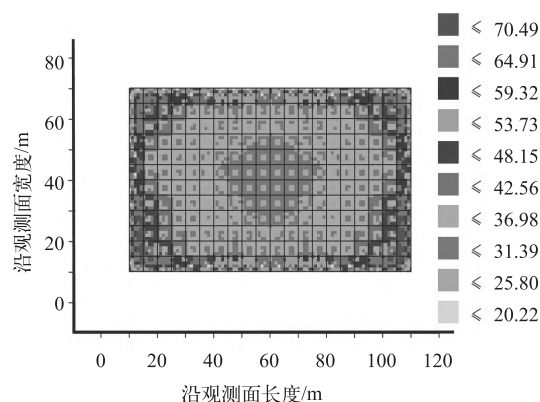


图9 接地网模型F对应的站内跨步电压分布

Fig. 9 Step voltage distribution in station corresponding to grounding grid model F

在接地网周围增设接地模块后为接地网G,站内对应的接触电压和跨步电压分布分别如图10、图11所示。其中接触电压最大值为855.73 V,大于安全限值440.8 V;跨步电压最大值为192.55 V,小于安全限值。可见接地模块对于接触电压和跨步电压的降低效果要弱于离子接地极和垂直接地体。这是因为原有接地网的敷设为0.8 m,而接地网敷设水平位置处的土壤电阻率最高,为 $482\ \Omega\cdot\text{m}$ 。即使在该水平位置增设接地模块,周围的高土壤电阻率也会对接地模块的散流效果起到一定限制作用,从侧面说明接地模块的使用过程中还需要具体问题具体分析,即接地模块在使用过程中的安装位置和方式等还有待于进一步研究,以使其发挥较优的降阻效果。

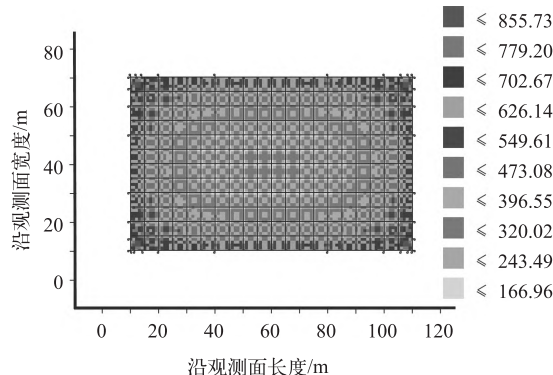


图10 接地网模型G对应的站内接触电压分布

Fig. 10 Distribution of contact voltage in station corresponding to grounding grid model G

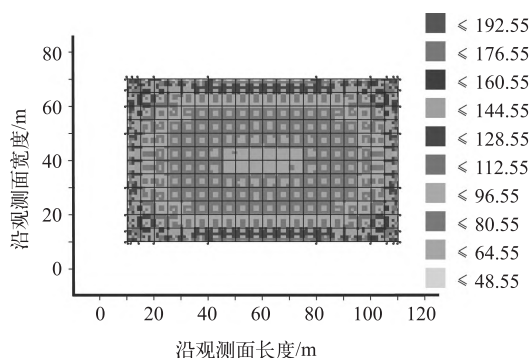


图 11 接地网模型 G 对应的站内跨步电压分布

Fig. 11 Step voltage distribution in station corresponding to grounding grid Model G

4 结束语

当站外延伸的接地网遭受破坏时，本文针对这一场景进行了站内接地网改造设计，并进行了仿真计算。设计了三种不同的站内接地网改造方案，包括将离子接地极、垂直接地体和接地模块等应用于接地网改造工程，得到了如下结论：

1) 当该特定变电站的外部接地网全部遭受破坏时，接地网的工频接地电阻和站内接触电压、跨步电压等均不再满足安全性要求。

2) 仿真试验表明，离子接地极、垂直接地极和接地模块等均对接地网的改造具有一定的效果。

3) 离子接地极和垂直接地极的初步应用，可以使工频接地电阻和安全性参数符合相关规程要求，而使用接地模块后，站内的接触电压仍不符合规程要求，有待进一步优化。

参考文献

[1] ATWATER P L, DEHAAN J M. Temporary

protective ground cable impedance K-factors for predicting worker touch voltage—basic single-point grounding (1 of 2)[J]. IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 2016, 3(4): 179-184.

[2] 李谦, 饶章权, 肖磊石. 大型接地网多维度评价技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.

[3] 文豹, 文习山, 李谦. 数值仿真在接地网降阻技术经济分析中的应用[J]. 电瓷避雷器, 2017(3): 86-90.

[4] 陆德琳. 接地模块在降低变电站接地电阻中的应用[J]. 电气技术, 2012(1): 107-109.

[5] 童雪芳, 彭庆华, 张波, 等. 接地模块在冲击电流下的降阻特性及其优化布置试验研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(1): 126-132.

[6] 吴晓红, 周甫庆, 廖敏夫, 等. 缓释型离子接地装置特性及优化研究[J]. 电瓷避雷器, 2017(3): 61-65.

[7] 居一峰, 肖磊石, 周菲. 基于CDEGS的离子接地深井模拟方法探讨[J]. 广东电力, 2014, 27(6): 96-99.

[8] 李腾飞, 罗日成, 潘俊文, 等. 降阻剂对垂直型直流接地极电气性能参数影响分析[J]. 电瓷避雷器, 2018(1): 132-136.

[9] 交流电气装置的接地设计规范: GB/T 50065—2011[S].

作者简介

赵喆(1982—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电气工程自动化。

(收稿日期: 2023-10-25)