

石墨基柔性接地材料及其在 南方复杂地质环境防雷接地的应用

韦扬志¹ 丁卫东² 张国锋^{3*} 务孔永³ 岳成峰³ 胡松江³ 陈彦青³

(1.超高压输电公司柳州局,柳州 545000;2.西安交通大学电气工程学院,西安 710049;
3.河南四达电力设备股份有限公司,许昌 461500)

摘 要 接地是输电线路防止雷击跳闸的主要措施之一,接地装置的接地性能直接受到所处环境的强烈影响,接地技术的研究涉及到地质、土壤、化学、材料、电气等多个学科。在均匀土壤中,水平接地网的接地电阻与接地系统所处土壤电阻率成正比,与地网面积的平方根成反比,但是在复杂土壤中,难以套用现有计算公式。南方地区地形复杂,大多数输电线路位于山区,地表上层为石英岩风化砂,下层为岩石,土壤分层现象比较显著,且石英岩风化砂通透性良好,保水保肥能力较差。南方地区的特殊地质对输电线路防雷接地的选型和设计带来一定影响。测量了南方一些具有代表性地区的土壤电阻率,得到了土壤电阻率分层情况,在此基础上比较了几种接地材料在一定长度内接地电阻的变化情况,为南方地区输电线路接地装置的材料选型和设计提供参考。结果表明:在南方的地质条件下,采用柔性石墨基接地带具有防腐能力强和可解决开挖受限难点的优势,应优先采用。

关键词 输电线路,接地电阻,复杂地形,防腐能力,石墨基柔性接地材料

Flexible grounding material based graphite and lightning protection in complex geology in the south

Wei Yangzhi¹ Ding Weidong² Zhang Guofeng³ Wu Kongyong³ Yue Chengfeng³
Hu Songjiang³ Chen Yanqing³

(1.Liuzhou Bureau of Ultra High Voltage Transmission Company,Liuzhou 545000;
2.School of Electrical Engineering,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049;
3.Henan Sida Electric Equipment Co.,Ltd.,Xuchang 461500)

Abstract Ground is one of the main measures to prevent lightning trip in transmission line. The earthing performance of ground device is directly affected by the environment. In uniform soil, the ground resistance of horizontal ground net is proportional to the soil resistivity of ground system and inversely proportional to the square root of ground net area. The terrain of Liuzhou area of Hunan Province is complex, most transmission lines are located in mountainous area. The upper layer is quartzite windblown sand, the lower layer is rock. The phenomenon of soil stratification is remarkable, and the permeability of quartzite windblown sand is good. The ability of water and fertilizer preservation is poor. Special geology in Liuzhou area has certain influence on the selection and design of lightning protection and grounding of transmission lines. The soil resistivity of Liuzhou area was measured, and the soil resistivity stratification was obtained. Based on this, the variations of ground resistance in certain length were compared. The results showed that the flexible graphite-based grounding belt had the advantages of strong anticorrosion ability and solved the difficulty of excavation limitation.

Key words transmission line, ground resistance, complex terrain, antiseptic capacity, flexible grounding material based graphite

随着电力系统的不断发展,输电线路雷击跳闸事故日益增多。据电网故障分类统计表明,在我国

跳闸率较高的地区,由于雷击造成的事故次数约占高压输电线路总跳闸次数的 60%^[1]。接地是防雷

作者简介:韦扬志(1978-),男,本科,工程师,主要从事输电线路运行与维护等管理工作。

联系人:张国锋(1987-),男,本科,助理工程师,主要从事石墨接地材料性能研究。

的基础,防雷接地装置是否良好,直接关系到防雷系统的防雷效果,降低杆塔接地电阻是最为经济有效的防雷改进措施,多年的输电线路运行经验也使研究者在这一点上达成共识^[2]。

金属接地体具有良好的导电性,在国内电网接地系统中得到了广泛应用。金属接地材料最大的瓶颈问题是接地材料的腐蚀,一般金属接地网运行 3—7 年后即发生严重腐蚀^[3-4],造成接地网的接地电阻达不到系统安全运行的标准要求,而进行接地网改造施工,每次接地网改造施工需投入大量的材料费、机械费、人工费和青苗赔偿费等费用,增大开支^[5]。

为解决金属接地体的腐蚀性问题,一些国家采用铜材料作为接地材料,铜接地材料的导电性能较钢接地材料好,铜接地材料不存在钢接地材料的点腐蚀情况,寿命较长。尽管铜包钢接地材料防腐性能较好,但一般在接地材料端部容易出现腐蚀,当铜包钢接地材料因自然因素发生扭曲或弯折时,表面铜覆盖层易破裂进而加速内部钢材料的腐蚀速率,并且腐蚀实验表明,酸性土壤会加剧铜的腐蚀^[6]。

目前接地网为了达到降低接地电阻的目的,采用石墨降阻模块,但其本体较脆,在运输过程中易破碎,质量大,难以运输,内部骨架为金属材料,和金属接地体连接时需采用传统的电弧焊接方式,高温电弧会破坏接地体接头部位的镀锌层,出现点蚀现象,严重影响接地材料的寿命。此外,电弧焊接稍有不慎就会在焊接接头产生气孔、夹渣,出现焊接裂纹等焊接缺陷^[7]。

近两年来,柔性石墨接地缆绳是国内电力系统推出的新型接地材料,以柔性石墨为主要材质,抗腐蚀性能良好,且具有良好的柔韧性,运输方便;施工过程中省去了原先采用金属材质作为接地材料时需要的焊接、切割等复杂程序,与土壤有良好的接触,降低了接地电阻,在国内具有一定量的应用^[8]。新型石墨基接地材料具有耐高低温、耐腐蚀性等优点,但是也有防损坏能力比较弱的缺点。为了防止利器刮伤石墨缆体,山区石地要保护缆体导电,泄电层不受损坏。穿越路基时,要用钢管套护。在有机机械作业的农田等特殊地段使用时,其连接体需要加固金属防护套。柔性石墨复合接地材料比重轻,有风就会摆动,风大还会舞动,长期的摆动、舞动极易磨损,必须固定。这些措施的采取提高了施工成本,增加了施工难度^[9]。

为解决上述问题,笔者在前人研究的基础上研制了一种比表面积更大、降阻效果优异和防盗性能好的扁带状石墨基柔性接地体,其与土壤浸润性好,接触电阻低,耐腐蚀性好,柔性好,可随敷设地形变化一同变化,能适应各种形状变化,尤其是在接地体表层包覆一层不锈钢丝铠甲,力求在控制成本的同时解决长期摆动、舞动极易磨损的问题,大大提高了使用寿命。

石墨化学性质稳定,具有良好的抗高温性能^[10]、高吸附性^[11]、高导热性^[12-13]和较低的接触电阻^[14]。本项目组所制石墨基柔性接地体呈带状,采用膨胀石墨为主体材料,导电性能优越。第三方检测机构检测报告显示,其在 200kA 冲击电流作用下电阻变化率小于 10%,能满足雷电流和短路故障电流的冲击。

1 实验部分

1.1 材料

石墨基柔性接地带(SJC-D40×5)、石墨基柔性接地缆(SJC-L28),河南四达电力设备股份有限公司,平均长度为 70m,接地带截面尺寸为宽 40mm、厚 5mm,接地缆平均直径为 28mm,镀锌圆钢平均直径为 10mm。

1.2 实验方法

石墨基柔性接地体是由鳞片石墨经氧化、插层等工艺制备的可膨胀石墨(炭含量 $\geq 98\%$,wt,质量分数,下同)高温膨化、气料分离、去杂质、膨胀石墨预压成型、纤维浸胶、固体胶渗透及烘干、膨胀石墨包覆、辊压成型、分切、毛边处理、加捻、旋转编织再经纬编织等工序流程制备而成^[15]。

1.3 测试

交流电流流过导体时,会产生交流电流的趋肤效应;电流离开导体载流面中心向表面集中的程度,可以用趋肤效应深度来衡量。一般情况下导体的趋肤深度可以用式(1)表示。

$$d = 66.1 \times \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f \rho_c}} \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

式中, d 为趋肤效应深度,mm; ρ 为导体材料的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; ρ_c 为 20℃ 时铜材的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; μ_r 为导体材料的相对磁导率(铜和其他非磁性材料 $\mu_r=1$); f 为电流的频率,Hz。

采用温纳四极法测量土壤电阻率,在实验现场选用不同的极间距,测量多组土壤电阻率数据,极距 $<100\text{m}$ 时,引线间的互感可以忽略不计^[16]。

1.4 施工技术

柳州市位于广西壮族自治区中北部,东、西、北三面环山,具有典型的岩溶地貌特征。该地区的平、岗、丘等地层构造主要以第四纪松散堆积物、红岩、灰岩及砂页岩为主;山地以花岗岩、变质岩、灰岩以及砂页岩等四种主要岩石构成;土壤属于岩石风化土壤,通透性良好,但保水、保肥能力较差;地质情况复杂,土壤电阻率分层情况十分复杂。

在该实验场地开挖出 3 条间隔不超过 1m,长度 70m、深度 0.5m、沟槽底部宽度 0.3m 的接地沟槽,将带状柔性石墨接地体、柔性石墨接地缆与圆钢分别铺设在沟槽底部,一端露出地面用于测量接地电阻,敷设示意图见图 1,水平接地体长度为 L ,埋深为 h 。每次分别敷设 5m 接地体并回填、压实,然后用接地电阻测试仪(ZC-8 型)测量接地电阻并记录。

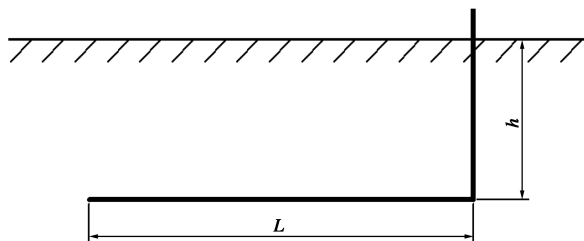


图 1 单根水平接地体安装示意图

2 结果与讨论

2.1 不同接地材料截面电流密度分布及趋肤深度

以石墨基柔性接地带和圆钢为例,接地带规格尺寸为 $40\text{mm} \times 5\text{mm}$,圆钢直径为 12mm ,根据式(1)给出不同频率电流作用下的截面电流密度分布和趋肤深度,结果见表 1。

表 1 不同接地材料截面电流密度分布及趋肤深度

频率	接地材料电流密度分布		d/mm	
	圆钢	石墨	圆钢	石墨
50Hz			2.8	363.2
10kHz			0.083	25.6

由表可知,圆钢在高频电流作用下趋肤效应较为严重,电流集中分布在导体表面,而石墨基柔性接

地材料趋肤深度均大于其 $1/2$ 宽度,说明石墨基接地材料的电流分布较为均匀,趋肤效应小,有效载流面积大,石墨导体的交流电阻小,接地体的趋肤效应面积与导体的横截面积相当,材料的整体利用率相比较较高,因此在高频电流作用下,石墨基接地材料可以不用考虑趋肤效应的影响,趋肤效应对输电线路电流损耗较低。

2.2 土壤电阻率

土壤电阻率测量结果见图 2。因温纳四极法测量土壤电阻率时,电压极探针渗入土壤深度对土壤电阻率测量结果无影响^[17]。消除这些可能影响土壤电阻率的影响后,从图 2 可以看出,极距小于 10m 时,该地的土壤电阻率较低,当极距增大时,土壤电阻率主要分布在 $3400 \sim 3600 \Omega \cdot \text{m}$,取区间的平均土壤电阻率 $3500 \Omega \cdot \text{m}$ 为该地的土壤电阻率。

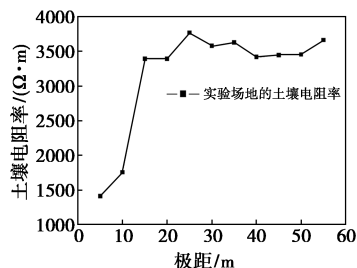


图 2 不同极距实验场地土壤电阻率分布图

2.3 工频接地电阻

工频接地电阻随接地体长度的变化曲线见图 3。由图可知,3 种接地体的接地电阻随长度的变化趋势具有一致性,由于土壤结构不均匀的缘故,以及实验中存在其他的不可控因素(如测量误差和回填时夯实程度差异),曲线某一段存在有波动现象,但接地电阻随敷设长度变化的趋势是一致的,同一长度不同接地体接地电阻的最大差异在 10% 左右。在埋设长度较短时,圆钢接地体相对于石墨基柔性接地体的接地电阻较大,在长度 15m 以下时波动范围较大。随着接地体长度的不断增加,圆钢接地体和石墨接地体接地电阻呈下降趋势,但石墨接地体的接地电阻一直低于圆钢接地体,而且带状石墨接地体的接地电阻一直低于圆钢状的接地电阻,经分析由于接地体的接地电阻是由接地体的自电阻、接地体与土壤之间的接触电阻和接地体周围土壤的散流电阻组成,在接地体自电阻相差不大时,接地体与土壤的接触电阻对工频接地电阻起关键作用,由于带状石墨接地体与土壤的接触面积比圆钢装石墨接地产品的接触面积大,且与土壤的浸润性更好,所以带状石墨接地体与土壤的接触电阻较小,其工频

接地电阻较小。

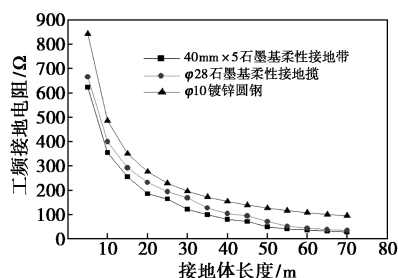


图 3 工频接地电阻随接地体长度的变化曲线图

3 南方复杂地质环境防雷接地的应用实例

由于柳州地区土壤属于岩石风化土壤,土壤颗粒较大、通透性良好,土壤中氧浓度较高,因此金属材料接地体的腐蚀现象比较严重,特别是埋设深度在 500mm 以上的金属接地材料腐蚀更为严重,因此不宜选用金属材料的接地体。

在实际工程中,对回填土而言,颗粒小的相比颗粒大的,即使接触面积比相同,由于其接触点更多,故接触电阻也较小,由于柳州地区地表的土壤主要为粒度 1mm 左右的岩石颗粒,土壤中的胶结物质较少,接地体和土壤的接触电阻相对较大,接地装置的降阻效果也相对较差,柔性非金属接地材料除具有良好的耐腐蚀性外,还具有良好的柔韧性和与土壤结合性,特别是带状石墨接地产品,与土壤结合性较好。接地体与土壤接触面积加大,接地电阻会随之降低。且柔性非金属接地体是通过编织工艺加工而成,表面具有微小的空隙,水分及细微土壤颗粒能进入微小的空隙内部,接地体被埋入一段时间后,随着土壤的沉降,柔性非金属接地体与土壤的结合更加紧密,接地电阻更低,并处于一个稳定状态。

因此建议在柳州地区,选用石墨基柔性接地带更能满足电力输电线路接地装置的需要。

4 结论

(1)在工频电流作用下,圆钢接地体与石墨基接地体接地电阻随接地体长度增加而下降的趋势相同,石墨接地体在耐腐蚀性和降阻方面优于金属接地体。

(2)由于石墨材料的趋肤深度较大,且圆揽型大于自身半径,带状大于 1/2 厚度,在工频电流作用下,石墨接地材料自身利用率高。

(3)在柳州地区进行接地装置施工时,在高土壤

电阻率地区不建议使用金属接地体,建议选用降阻效果好且使用数量少的石墨基柔性接地带。

(4)综合考虑接地装置的建设、运行维护等各阶段的各种影响因素,在柳州地区选用石墨基柔性接地带更能满足电力输电线路接地装置的需要。

参考文献

- [1] 谷山强,何金良,陈维江,等.架空输电线路并联间隙防雷装置电弧磁场力计算研究[J].中国电机工程学报,2006,26(7):140-145.
- [2] 肖微,胡元潮,阮江军,等.柔性石墨复合接地材料及其接地特性[J].电工技术学报,2017,32(2):85-94.
- [3] Gorman J, Arey M, Koch G. Cost of corrosion in the electric power industry[R]. New York: Electric Power Research Institute, 2001.
- [4] 陆培钧,黄松波,豆朋,等.佛山地区变电站接地网腐蚀状况分析[J].高电压技术,2008,34(9):1996-1999.
- [5] 徐航,刘丽娟.变电站接地网腐蚀原因分析及改进措施[J].科技致富向导,2011(23):183-183.
- [6] 伍远辉,刘天模,等.酸雨作用下酸性土壤酸化过程中铜的腐蚀行为[J].工程科学与技术,2010,42(1):199-125.
- [7] 卢威,陈娜,魏仕勇.电弧焊裂纹产生的原因分析及防止措施[J].热处理技术与装备,2016,37(2):71-74.
- [8] 胡元潮,阮江军.柔性石墨复合接地材料及其在输电线路杆塔接地网中的应用[J].电网技术,2014,38(10):51-57.
- [9] 徐海海,何平,高梅鹃.柔性石墨复合接地材料在电力接地网应用中存在的问题及对策[J].电工世界,2018,29(7):1-5.
- [10] 苗艳,苏永庆,薛婷婷,等.膨胀石墨电极的研究和应用进展[J].炭素技术,2012,31(6):5-8.
- [11] 韦业,高林.膨胀石墨的多孔结构及其应用[J].长江大学学报(自然科学版),2008,5(1):173-175.
- [12] 周文英,齐暑华,李国新,等.导热胶粘剂研究[J].材料导报,2005,19(5):26-29.
- [13] 韩志东.新型石墨层间化合物的制备及其膨胀与阻燃机理的研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2008.
- [14] 黄道春,陈家宏,谷山强,等.石墨基柔性接地材料特性及其在防雷接地中的应用[J].高电压技术,2018(6):1766-1773.
- [15] 武国亮,李震宇,王志利,等.柔性石墨接地材料的制备工艺研究[J].化工新型材料,2016,44(12):223-225.
- [16] 李伟,文习山,潘卓洪,等.消除土壤电阻率测量引线间互感影响的方法研究[J].电瓷避雷器,2017(5):37-40.
- [17] 周蜜,王建国,黄松波,等.土壤电阻率测量影响因素的试验研究[J].岩土力学,2011,32(11):3269-3275.

收稿日期:2018-08-15