[接地]

接地极接地装置特性参数测量及注意事项综述

文/国网河南省电力公司电力科学研究院　郭　磊　寇晓适　丁国君　王　栋
国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司　杨　杰
国网三门峡供电公司　魏　巍

随着直流输变电工程运维管理属地化趋势的推进，省内电力系统将承担起如换流站接地极接地装置特性参数测量试验等特殊直流试验项目，测试过程需考虑的因素及应对的情况较多。从现场实用角度出发对换流站接地极接地装置特性参数测量试验进行了详细介绍，并对测试过程中需要注意的关键事项进行总结，对系统内开展此类试验工作具有一定的指导和借鉴意义。

随着特高压直流输变电工程的推广应用，各个直流输变电工程运维管理的属地化已成为一种趋势，直流输变电工程所在的省电科院或检修公司将逐渐负责包括接地极接地装置特性参数测量在内的很多直流试验项目。这对于此前一般来说不太熟悉接地极接地装置特性参数测量的省内系统来说难度不小，测试过程中需要考虑的因素较多，遇到的突发情况较为复杂。结合对省内特高压直流输变电工程接地极接地装置特性参数测量试验，对试验过程期间可能遇到的问题及注意事项进行总结归纳，对开展此类测试工作具有一定的指导和借鉴意义。

接地极接地装置特性参数测量介绍

1．接地极地网介绍

通常接地极极址换流站间直线距离为几十公里，接地极一般多按双同心圆环设计（受场地、温升及跨步条件限制），内外环半径为二、三百米，内外圆环直径比值宜在0.65～0.75之间。馈电棒一般选用直径50 mm的高硅铬铁，电极埋深3 m。

接地极的地下导流部分采用分段连接，一般外环均分为4段，内环均分为2段，端口间距不大于2 m。地上部分从接地极线路至极址中心构架后，再经导线连接至滤波电抗器以及滤波电容器后连接至导流管母线；通过管母线采用直埋电缆引流至内外极环。接地极内环分为两段共8根电缆引流，接地极外环分四段共16根电缆引流，然后再由配电电缆将电流引入高硅铬铁棒（馈电元件），通过高硅铬铁棒以及石油焦炭将电流溢泻流到大地土壤中。

2．特性参数测量项目

接地极接地装置特性参数测量基本包括接地极接地电阻测试、接地极馈电电缆分流测试、接地极附近地网跨步电压测试和接地站设备的接触电压测试。

接地极接地电阻。接地极接地电阻是评价接地极的电位升及安全性是否满足系统运行要求的基本参数，通过测量可获得接地电阻实测值，与竣工验收测试时接地电阻值进行比较，评估接地电阻值变化情况，并与设计值比较，考核接地极是否满足设计要求。

接地极馈电电缆分流。埋入地下的接地极内外环段上的电流分配是否均匀，是影响接地极运行时跨步电压、腐蚀和温升的主要因素，电流分

配通过地面上馈电电缆电流的测量获得，同时还可评估每根馈电电缆的电流是否小于电缆额定载流量。

接地极附近地面最大跨步电压。接地极最大跨步电压值是评价接地极运行时对人、畜安全性的重要指标，最大跨步电压值与电流、土壤电阻率和接地体埋深等因素密切相关，通过测量可获得接地极附近区域内地面跨步电压值和分布范围，其中最大跨步电压值是否小于设计允许值，作为判断接地极运行安全性的依据。

接地极极址附近金属构架的最大接触电压。接地极极址附近金属构架的接触电压同样是评价接地极运行安全性的又一重要指标，通过测量极址区域内地面金属铁塔及其它金属设施的接触电压值，作为判断接地极运行安全性的依据。

3．测试原理接线

1）接地电阻测量。单极大地运行时，大电流通过接地极时，接地极接地电阻会引起接地极处电位抬升。接地极接地电阻即接地极与电位为零的远方接地极之间的欧姆定律电阻，即接地极相对于无穷远零电位点之间的电阻，将该无穷远零电位点定义为电位极。试验采用“电流注入法”，将外加试验直流电源安放在换流站内直流场（也可以是接地站内，视具体情况而定）接地极线路出线构架附近，利用接地极两条极线分别作为电流线和电位线，电流线与换流站接地网构成直流测量回路，利用电位线测量接地极电位的抬升（相对于零电位参考点）。接地极接地电阻试验原理图如图1所示。

测量接地极的接地电阻时，向接地极注入直流电流I，测量接地极相对零电位参考点的电位U_g，则接地电阻$R_g=U_g/I$。为克服地中杂散电流场和变压器中性点接地零序电流的影响，测量电流越大越好，一般至少取50 A以上。

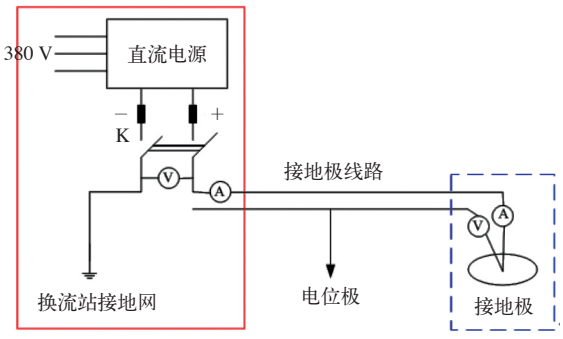

图1　接地极接地电阻试验原理图

电位极采用单根无极化电极，电位极（即无穷远零电位点）的位置并不是一开始就可以确定的，需要多进行几次测试根据数值的变化大致判断无穷远零电位点的位置，一般根据经验在电流线测量回路距离被测接地装置的60%左右附近位置，因此电位测量线利用接地极另一根极线，分别从所选定的杆塔上（注：以接地极参考点，选取极线线路直线距离的45%、50%、55%、60%、65%的五基杆塔引下测量线依次连接到电位极，测量时将根据实测数据情况进行增减电位极位置或数量。测量接地极相对零电位点的电位时，应当在通电前测量接地极和电位极间的背景电压U_0和极性。在计算接地电阻时，应消除背景电压的影响。测量由直流电源、接地极、试验线路构成的大地试验回路中的电流I和接地极相对零电位点的电位U，而$U_g=U-U_0$，则接地电阻$R_c=(U-U_0)/I$。

2）馈电电缆分流测量。利用接地极线路向接地极注入直流电流，在图2所示接地极馈电电缆分流测量位置对每根馈电电缆分流进行测量。

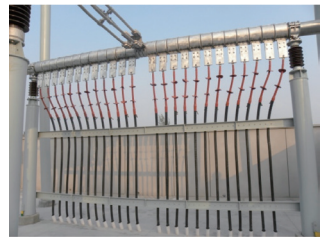

图2　接地极馈电电缆分流测量位置

采用大口径直流钳形电流表套于馈电电缆上测量各馈电电缆电流I_i和注入接地极的总电流，各馈电电缆的分流系数为

$$\eta_i=\frac{I_i}{\sum_{j=0}^{n} I_j}$$

式中，n为馈电电缆根数。测量时要求接地极入地电流基本保持衡定，电流表指定的电流方向与实际电流方向一致，测量时固定一块电流表监测电流值的变化，用另一块电流表依次测量各电缆中电流。

3）接地极附近地面最大跨步电压。测量应在每个测点相互垂直的两个方向上进行，以便根据矢量相加得到该点的电位梯度的大小和方向，所测得的最大跨步电势和水中最大电位梯度不能超过设计允许值。测量时要注重接地极附近的以下位置：接地极导体正上方地面距接地极导体径向3～5 m处；地面不平的低洼与潮湿之处；散流不均匀的接地导体、电流密度大的导体上方地面；与周围土壤相比，局部土壤电阻率突变的地方。

地面跨步电压可采用两种方法测量，分别为

电位法和跨步电压法。电位法是将一对无极化电极中的一个电极固定在接地极埋设处上方地面，以该处为电位参考点，沿接地极径向移动另一个电极，以1 m为间距由近至远测量地面上的电位变化，前后1 m间的电位差值即为跨步电压。跨步电压法是固定两电极间距为1 m，沿接地极径向同时移动两电极，以1 m为间距由近至远测量地面1 m间的电位差即为跨步电压。配对的无极化电极间的电极电位差要求小于10 mV，电位测量仪表应保证有效读数。

根据接地极各个方向和位置的跨步电压测量数据，可绘制出地面各点跨步电压随距离变化的曲线，得到整个接地极地面最大跨步电压值、出现的位置和范围。

4）接地站设备的最大接触电压测量。测量接地极址附近的金属埋设物暴露在地面部分与地面间的电位差。如接地极铁塔、金属构架和其他金属物等。所测得的最大接触电势不能超过设计允许值。

采用数字万用表和一支无极化电极，将万用表的表笔连接到金属构架上1.8 m处，将参比电极插入地面与金属构架水平距离1 m处，测量两点间的电位差。若金属构架几何尺寸较大，应在金属构架同一高度的不同位置上进行测量，得到最大接触电势值。

4．试验主设备

接地极试验装置系统一般由控制电源、隔离变压器、三相感应调压器、整流器、连接电缆和测试仪表等部份组成。

对测试电源的电压要求：通常换流站与接地极距离20～100 km不等，要求测试电源输出电压能够在几十到几百伏范围内可调，满足不同测距的要求。电源调压装置一般有两种方式，一是在电源输入端采用感应调压器调压，二是在电源输入端采用可控硅交流调压。感应调压器优点在调压的过程中不会附加波形变化，缺点是电源装置无法闭环运行，输出电压值会受电源波动；可控硅调压优点是引入了电压负反馈使输出电压恒定，实现自动稳压，缺点是调压时是调压时输出电压波形由于导通角影响发生了一定的变化。

对测试电源的电流要求：为了提高测试精度和准确性，对注入接地极电网的电流要求能够稳流运行，且输出电流波形尽量平滑，一般测试装置配备LC滤波器，通过储能元件减少脉动幅值。

测试电源装置应具备输出过压保护、输出过流保护及超温保护。

试验过程中的注意事项

1．相关文件规程的执行

《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》（修订版）、DL/T 273—2012《±800 kV特高压直流输电设备预防性试验规程》、Q/GDW 1168—2013《输变电设备状态检修试验规程》等多项规程、规范中对接地极接地装置特性参数测量均做出了相关规定，如表所示。一般未安装接地极地网在线监测装置的运维单位会按照每年测量一次接地电阻的要求执行。

表　试验相关的文件规程

标准名称	相关要求
《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》（修订版）	8.6.2.6 应认真开展接地极设备运维和状态检测，至少每季检测1次温升、电流分布和水位，每年测量1次接地电阻，两年测量1次跨步电压，每5年或必要时开挖局部检查接地体腐蚀情况，针对发现的问题要及时进行处理。
DL/T 273—2012《±800 kV特高压直流输电设备预防性试验规程》	接地电阻测试周期为6年，接触电势和跨步电压测量、接地装置馈电电缆分流测量均为必要时，以上4个项目标准均应符合设计规定。（注：本标准适用于直流输电系统±800 kV换流站。）
Q/GDW 1168—2013《输变电设备状态检修试验规程》	接地极接地电阻测量基准周期6年，接地极电流分布测试为3年，当电流分布明显变化或接地电阻明显增加、接地极寿命损失达到60%、80%、90%时或开挖检查后应进行跨步电压与接触电压测量。
DL/T 437—2012《高压直流接地极技术导则》	7直流接地极运行维护 7.3电流分布。运行中对通过接地极线路和各元件馈电电缆的电流宜定期进行实测检查，其周期为不超过6个月1次，周期的长短应根据系统运行方式来确定。 7.4接地电阻。高压直流接地极宜每年进行接地电阻实测检查1次。

2．各工作面的配合

接地极接地装置特性参数测量测试分为3个工作面，即换流站、电位极处及接地站。3个工作面需要高度配合，共同完成接地极接地装置特性参数测量。换流站的工作人员负责控制直流输出；电位极工作人员负责确定电位极测点位置，并记录坐标；接地站工作人员负责各个试验项目的测量。试验全过程应由接地站测量人员根据具体的测量情况对换流站及电位极工作人员进行具体统一发令，试验时应由接地站测量人员确认其余两个工作面接线完毕且人员到达安全位置后再发令，避免工作流程上的混乱以及由于监督配合不到位造成安全事故发生。

3．试验前准备工作

（1）现场勘察及前期断引工作

试验开工前对3个工作面提前进行现场勘察较为必要。

在换流站应提前确定好检修电源箱的容量和地理位置，确定接地极试验升压装置的摆放位置，电源线缆的规格及长度是否合适。一般架空接地极线路为两根并联线路，因此有项重要工作是提前确定好采用架空接地极线路中的哪一侧线作为测试电流线使用（另一侧作为电位线使用），方向一旦确定后另2个工作面的接线必须严格保持一致。换流站内还应提前确定好架空接地极线路与站内连接的断引位置（即测试电流线接入位置），一般断开接地线光电流互感器出线侧的连接金具，并做好工作点的安措。

在电位极应提前对方案中确定的极线线路直线距离的各个电位极接入点所在杆塔的实际地理位置、周边环境进行现场勘察，记录好各个位置的坐标以确定距离是否符合要求。对电位线使用的一侧架空接地极线路应与换流站保持一致。

在接地站应确定电流线及电位线串入测试仪表的断引位置。一般选择接地站前最后一基杆塔作为断引位置。测量接地极电位抬升用的测量仪表一端接在电位线上，另一端应接在接地极分流馈线电缆的管母上以保证测试的准确性不受接地站内其它设备的影响。

（2）特殊的试验设备及工器具

参比电极。无极化电极使用便携式硫酸铜参比电极，该电极体积小、携带方便，腔体由透明有机玻璃或ABS管构成，便于观察内部硫酸铜溶液的饱和度；电极电位稳定、不易极化、结构牢固且接头耐腐蚀；电极帽与电极腔体用螺口连接，灌液方便、电极微孔膜渗漏，可在各类土壤及淡水中应用，适于现场使用。

分流器。电流线中试验直流通常采用分流器进行测量，一般选择FL－2型0.5级150 A/75 mV。建议在分流器串入电流线中接入一个容量合适的直流空气开关以便于控制。

测试仪表。采用精度0.5%四位半的数字万用表，分别用万用表的电流档和电压档测量电流回路中的电流和电压回路中的电压。此外，注意在测试馈电电缆分流时，使用的直流钳表口径应大于电缆直径，避免因仪表不具备条件而造成试验缺项。

过渡铜排及工作接地线。由于测试线与架空接地极线路上的螺栓规格可能不一致，需要在它们之间连接过渡铜排。此外还应准备足够量的配套螺栓，登高作业时应备用以免螺栓掉落造成重复登高。换流站内的工作接地线规格应满足主回路的要求，应与升压线规格保持一致。

其他设备。条件允许下还可配备GPS定位仪、对讲机、望远镜等辅助设备。对于初次进行的接地极地网测试，需要高精度的GPS定位仪确定电位极杆塔的实际位置（交接试验后电位极位置相对固定，在预试时无须再携带GPS）。对讲机便于与登高作业人员对话，望远镜用于地面人员对登高作业的监护及接线检查。

4．试验注意事项

在开工准备完成后，应确认试验当天换流站极I、极II均已停电且站内安措已执行到位。试验开始前，应对运维单位现场监护人、全体试验人员及配合人员进行安全技术交底，进行现场危险点分析。注意事项如下。

（1）现场反事故措施的执行

首先登高人员登高应做好安全防护措施防止坠落。由于线路可能存在感应电造成人员触电危险，登高人员登上接地极线路龙门架后对接地极极线安装临时接地线，尤其注意临时接地线的悬挂位置应起到保护作用。在做好安措后，首先在需要解开的导线与金具之间测量接触电阻以及连接螺栓的压紧力度（紧固力矩）并做好记录，之后开始进行极线改接线及接地极线路右极线电流线的串入。高空与地面试验导线均连接完毕后，登高人员解开临时接地线后下塔，此时可进行配电箱侧电源线的连接，连接完成后人员全体待

命，等待加压指令。

（2）试验电源的使用

整流柜中安装有滤波电感和电容等储能元件，在关机状态，电感和电容上仍存在较高残余电荷，在接、拆负载时，必须对电抗器和电容器进行放电；使用过程中出现过流或过压报警自动关机时，应查明故障原因后再开机使用；主开关分闸时（处于水平位置）才能开柜门，主开关合闸时（处于垂直位置）不许开柜门，否则易损坏操作手柄。

（3）背景值的测量

在进行接地极接地电阻测试时应注意测试仪表接入方向的准确性，防止反接。升压前，应先对整个测试回路中的背景干扰电压值进行一段时间的监测，观察背景干扰电压的幅值范围，在其后的测试数据中应去除背景干扰，可较为准确反映真实接地电阻情况。

在进行馈电电缆分流测量时，要求接地极入地电流基本保持衡定，电流表指定的电流方向与实际电流方向一致，测量时固定一块电流表监测电流值的变化，用另一块电流表依次测量各电缆中电流，并注意表显示的背景电流值及正负性，读数时应消除背景值，依次完成所有馈电电缆分流测量。

（4）读数的技巧

在测量电位线和电流线的电压值时，会出现接地极电位数据振荡的现象，持续观察测量值一段时间，建议记录该段时间内的峰值并同时记录对应的分流器上的电压值（转换为当时的直流电流值），之后采用相同方式多次记录，尽量减少数据的离散性。在第一轮测试后，可以进行初步计算判断结果是否符合要求，为后续的测试提供参考。

（5）试验结束后的恢复工作

试验完成后的复引工作十分重要，换流站及接地站的登高人员负责登塔进行试验电流线、电压线的拆除，以及接地极线路的恢复工作，包括接地极线路极线及跳线导电膏的涂抹与连接、接触电阻测量、连接螺栓紧固力矩的测量等。

（6）其他注意事项

测试仪表尽量多准备一些，避免由于测试过程中由于仪表的损坏造成测试的无谓中断。

接地站、电位极每个工作面的断复引工作建议各有至少两名登高人员（条件允许的话），电位极的接线建议从距离接地极最远的杆塔开始进行，由远及近，可以最大限度的节省时间。

由于接地极极址所处位置有可能涉及前期征地赔偿等复杂历史原因，当地民众意见较大，因此应尽量避免试验人员（车辆）踩踏耕地、农作物等纠纷的发生。

结束语

试验负责人应清楚接地极接地装置特性参数测量的目的及重点检测位置，做到有的放矢。直流接地极接地装置测试原理与交流系统接地装置特性参数测量方法近似，但由于涉及到多个工作面相互之间的协调配合，试验过程中遇到的各种情况都比较琐碎，掌握整个试验各个环节非常关键，对所有工作面全过程严格把控和突发事件的应对处理对试验负责人的职业素质提出了更高要求。因此，每次试验都应当充分重视、认真对待。**EA**

（收稿日期：2016.11.22）

（编辑：刘群点）

（上接第62页）

不理想的杆塔，应该布设拉线辅助固定。

3．杆塔的防腐处理

杆塔长时间暴露在野外，极易受到各类腐蚀性物质的侵蚀，造成杆塔力学性能的降低，此类情况在沿海地区和环境恶劣地区较为常见，导致杆塔寿命大幅降低。针对此问题，应该对杆塔进行防腐处理。一般来说，主要的防腐措施为在杆塔外侧涂刷防护层，以此抵御腐蚀性物质的侵袭，涂刷应该严格按照除锈、底漆和面漆等步骤进行。**EA**

（收稿日期：2016.10.10）

（编辑：刘群点）