

冲击电荷下电力网络模型与电压稳定性分析

魏福程

(天津农学院, 天津 300384)

摘要 在电力系统控制技术不断发展的同时, 系统输电线路总数不断增多, 虽然常规电网接地保护机制能够满足规程安全需求, 但在遭受闪电和雷击的过程中极易发生跳闸现象, 导致电网的突发性断电问题较为突出, 反击事故难以控制。因此, 在设计电力系统接地网络和维护电网的过程中, 必须重视冲击电流在电网中的流动机制, 对接地网络上的电网接地电阻进行精确评估, 才能找出最佳的电网暂态电位控制参数, 保障电网的稳定运行。

关键词 冲击电荷; 电力网络模型; 电压稳定

中图分类号: TM74

文献标识码: A

文章编号: 2097-3365(2024)03-0001-04

一般来说, 冲击接地阻抗是一个复数, 是电阻、电感、电容中能够对接地电路载流强度造成影响的分量电流总和。

目前试验用的各种测量接地电阻的方法及设备主要是测量工频接地阻抗, 而长期的监测表明杆塔、发电厂、变电站的接地装置接收最多的是雷电流。由于雷电流是波头很陡, 包含频率极其丰富的瞬时单脉冲冲击波, 所以需要采用冲击电流测试方法对接地系统的接地阻抗进行测试。

1 变电站接地网工频接地电阻测试

变电站接地网对工频接地网络具有重要的保护作用, 在接地网电阻值较大的情况下, 接地故障发生时的常态相与中间节点上的电压强度高于标准, 设备的外部绝缘保护层会损坏; 在遭受雷击的过程中, 电流会在瞬间增高, 进而使线路上的瞬时电压过大, 引发设备故障, 危及运行人员安全。因此, 定期检测变电站地网的接地电阻, 评估变电站地网的接地水平, 探究变电站地网冲击电流作用下的响应特性, 对保障变电站的运行安全具有重要意义。

本文重在探索变电站地网和输电线路杆塔的冲击特性, 以其揭示冲击接地电阻和冲击系数的一般变化规律, 为实际工程应用提供一定的理论参考。

1.1 接地电阻测试方法

在实际测试过程中, 电流极的布设位置越远越好, 在常规情况下, 电流极与被监测的接地装置间距为 d_{12} , 值数应当在被测试接地装置对角线长度 D 的 4 倍以上。如果土壤中的电阻率呈现出均匀分布状态, 应取值 2 倍以上。电压极上的电线长度应当为电流极引线长度的 0.618 倍。

1.1.1 电位降法

基于电位降法的接地装置电阻测试回路如图 1 所示。

在图中, G 表示被测接地装置, C 表示电流极, P 表示电压极, D 表示接地装置最大角线长度。 d_{CG} 为电流极与接地装置之间的间隔距离。而 X 则是电压极与接地装置的间隔距离。^[1] D 为每次测试的间隔距离长度。

在被测量的接地装置 G 与 C 电流极上的电流 I 在变化的过程中, 地面电位也会同步变化, 电压极 P 与 G 装置的间隔长度上的电流回路移动倾斜角为 $30^\circ \sim 45^\circ$, 两次测量的间隔时长为 d ($d=50\text{m}$ 、 100m), 在完成 P 与 G 的电位差测量后, 构建测量结果 U 与 x 之间的相关性变化曲线, 将曲线最平坦的区域定义为零点为节点。曲线点为之间的点位, 是在试验电流与接地装置对接后产生的 U 。由此可将接地网的阻抗值定义为 $Z=U_{\text{测}}/I$ 。

1.1.2 接地电阻测试方法

图 2 为接地电阻测试仪测量接地装置接地电阻的接线方法, 测试原理、布线要求与三极法类似。在测试之前, 测试仪上的端子 E 需要与端子 P_1 连接, 但地网接在接地电阻值较小的情况下, 为保障测量结果的准确性, 应当适当放开对端子 E 与端子 P 之间的短路片, 尽量降低仪器与接地网对引线电阻产生的影响, 并单独引线与地网测试点相连。

1.2 现场测试方案

对变电站地网进行测试时, 首先解开架空地线与地网的连接螺栓。测试是通过采用电流-电压法测量地网接地电阻, 为了保证测试的准确性, 我们选择了较远距离进行测试。^[2] 我们用 6mm^2 电流线对所有线路进行包裹处理, 然后从测量引入点开始布设线路直至变电站门前。为了减小接地电阻, 我们利用了路边的

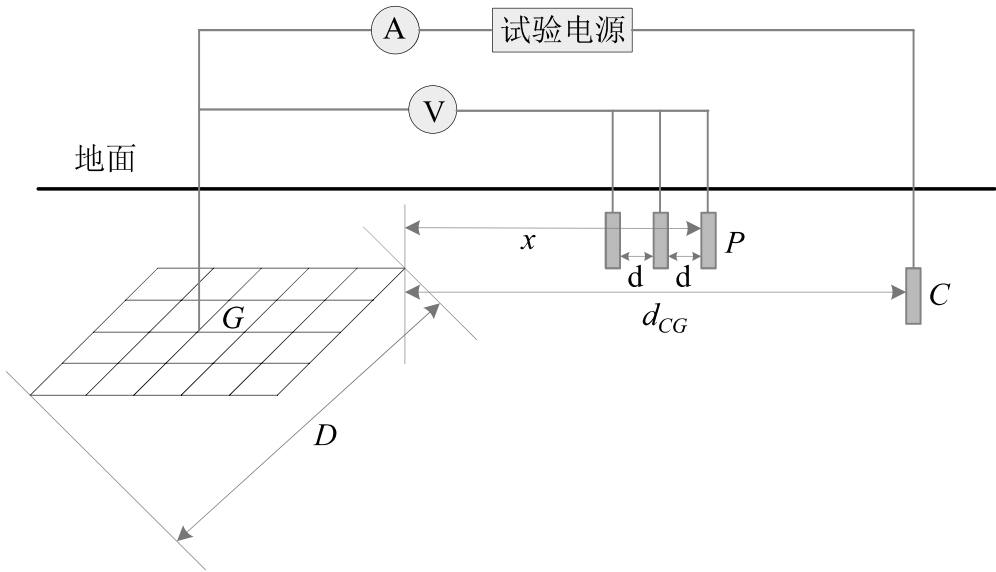


图1 电位降法测试接地装置的接地电阻

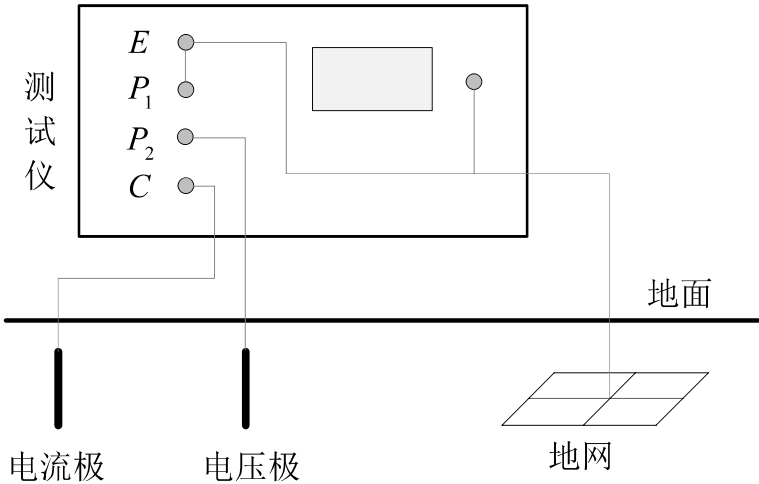


图2 接地电阻测试仪接线图

水洼作为电流极的位置。电流极与地网边缘的距离为 $d_{12} \approx 0.76\text{km} = 4.31D$ (电压极和电流极的布线距离不小于地网最大对角线长度的4倍)。电压线选用花线进行人工布线,从测量引入点接出从站门前引出,布放至电压极,电压极用一根直径24mm、长约1.5m的镀锌圆钢打入地下,电压极与变电站地网边缘的间隔距离长度为 $d_{13} \approx 0.8\text{km} = 4.54D$ 。电流线与电压极之间的夹角度数为 116° 。

由于我们采用了远离法来处理相关的数据,因此有必要根据《接地装置特性参数测量导则》里的计算方式来调整我们的测定成果,^[3] 以便使其符合接地网络的电阻测量的标准:即测定数值和修正因子相乘得

到的结果是 $1/0.8436$ 。本研究遵循了 DL/T475-2006《接地装置特性参数测量导则》所设定的准则,^[4] 并选择了使用50Hz的电流测量方法作为测量的手段。测量原理如图3所示。

图3中: S_1 表示开关, A 表示选频电流表, V 表示高内阻电压表。

1.3 测试结果及分析

按照前面测量方案得对变电站地网工频接地电阻进行测量后得出的结果见表1所示。

对施加工频的小电流远距离测量结果进行观察,我们能够得出以下的结论:

1. 使用8000型工频接地网来进行系统的测试,当

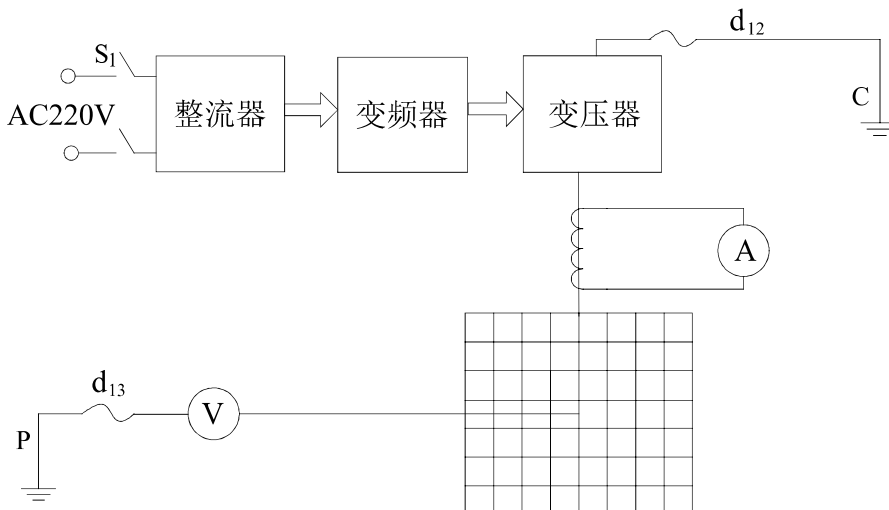


图 3 类工频小电流法测量原理接线图

表 1 工频接地电阻测量结果

电流输入节点	频率 (Hz)	强度 (A)	电压 (V)	噪声 (mV)	电阻值 (Ω)	修正电阻值 (Ω)	
地网中心点	53	1.1400	0.5365	0	0.470	0.541	
	47	1.1382	0.5376	0	0.472	0.537	
	47Hz 和 53Hz 测量电流结果的算术平均值					0.471	0.539
	52	1.1470	0.5356	0	0.467	0.536	
	48	1.1382	0.5384	0	0.473	0.539	
	48Hz 和 52Hz 测量电流结果的算术平均值					0.475	0.537

测试的工频为 47Hz、53Hz、48Hz 和 52Hz 时，干扰电压值为 0，信噪比达到了理想水平。只需增加 8A 的电流，就能提升测量结果的精确度。^[5]

2. 电网的阻抗值与频率相关的电感部分之间有着明显的联系。如果使用偏差超过 50Hz 的工频测量规则来测量电流强度，必定会导致测量结果出现误差。因此，需要采用对称频率来优化测量过程，提高测量的准确度。

从表 1 中可以看出，在小测量电流增加 47Hz、53Hz、48Hz、52Hz 之后，测量的电阻值较为稳定。为严格起见，选取 0.538 Ω 作为接地网等效的工频接地电阻测量值。

1.4 场测试方案

变电站地网冲击接地电阻的测试回路如图 4 所示。选取地网中心点作为冲击注流点，回流点在变电站边缘 150m 处。电压参考点选取距离场地 300m 处的远方，作为公共参考地。整个冲击回路除与注流极、回流极连接外，其余全部浮地。因为冲击过程中的电流发生器并未与其他线路对接，由此可以将其视为接地网与

回流电极之间的冲击电流。^[6]

对各测量设备进行校准，电阻分压器的有效分压比值为 1195.35，标准公开电压为 200kV；线圈为 Rogowski、最大灵敏度为 101.416A/V；对示波器的检测目标主要是电流与电压的强度，检测数量为两个，示波器型号为 Tek2024，最大带宽范围为 200MHz。

冲击发生器采用便携式冲击发生器，可产生波为 2.6 μ s 的标准流波形。由蓄电池配合逆变器对发生器电容进行充电，试验电压等级依次为 30kV，45kV，60kV。^[7]

1.5 测试结果及分析

按照测试方案对变电站地网进行冲击接地电阻测试。由测试结果可以看出：

在变电站地网上施加冲击电压，地网电压和电流波形整体上呈现振荡衰减，这是因为变电站接地网面积较大，等效的对地电容和线路电感构成振荡回路，在冲击电压作用下构成 LC 振荡回路，从而使得地网电压和电流出现振荡。本文选取第一个半周波的冲击电

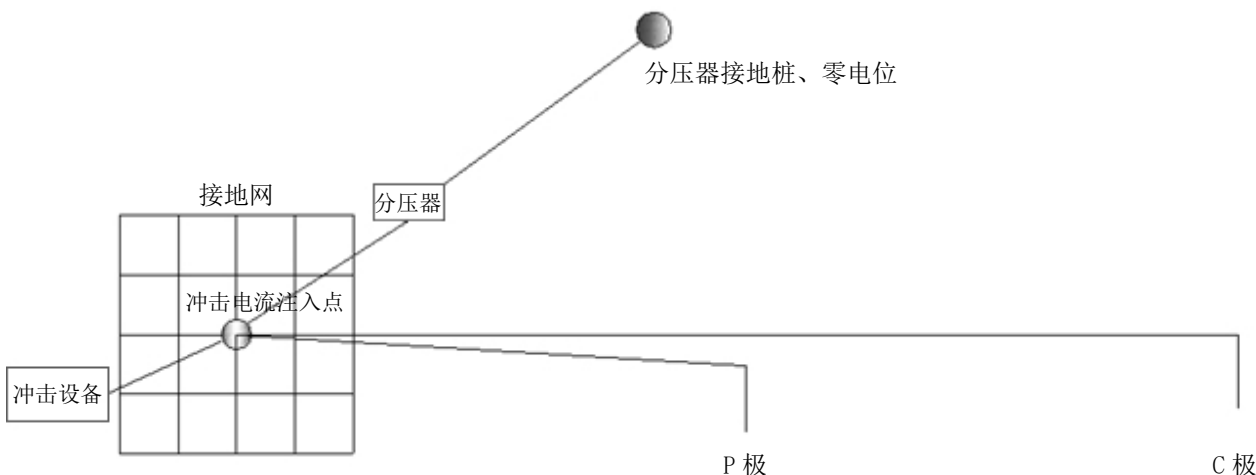


图4 冲击回路布线图

压和电流波形数据作为变电站地网冲击接地电阻的计算数据。

在测得之前，应首先将接地线与接地装置分离，对需要检测点位进行清洁处理。然后在场中安装4根长度为1m的正方形接地极，每根接地极的埋设深度为1m，直径为50mm。

冲击电流发生器与接地线路对接，负极接地极数量为4根，组合后形成电流回流结构，整个冲击回路除与注流极、回流极连接外，其余全部浮地。测试过程中的冲击电流发生器并未与其他线路对接，由此可以认定被监测接地体和回流极中的冲击电流强度一致，但相位不同。^[8]

1.6 测试结果及分析

按照测试方案，对所选杆塔进行冲击接地电阻测量。对比不同幅值冲击电压，冲击电流下的冲击系数的变化，可以发现：

1. 在本文测试条件下，输电线路杆塔接地体的冲击接地电阻均大于工频接地电阻，即冲击系数均大于1。这是因为杆塔接地体在冲击电流作用下表现出了较强的电感效应，从而使得冲击电流作用下的电位升高于工频电流。^[9]

2. 相比于变电站地网的冲击接地电阻测试，由于变电站接地网面积较大，相应的电感效应强于输电线路杆塔接地体，因此变电站地网的冲击系数整体上大于杆塔接地体，测试得到的冲击系数（3左右）远大于输电线路杆塔接地装置的冲击系数（略大于1）。

3. 输出电路杆塔接地体的冲击系数整体上随冲击电流幅值的增加而略微减小。这说明所测试的杆塔接地体在冲击电流作用下产生了部分电离，从而一定程

度上使冲击接地电阻减小。

4. 为更深入地研究这一性质，后续的研究需要利用大型冲击发生器来开展，以突破便携式冲击发生器的输出功率限制，从而更全面地反映接地装置在冲击电流作用下的响应特性。^[10]

参考文献：

- [1] 邹云波,蔡君,徐启腾.接地电阻测试方法探析[J].科技风,2014(08):95-96,98.
- [2] 高宜凡.变电站接地网状态评估分析[D].广州:华南理工大学,2012.
- [3] 孙西宁,高振国,李冠华.杆塔接地体冲击特性试验研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2020,16(04):52-55,66.
- [4] 何金良,陈先禄.输电线路杆塔接地装置冲击特性的模拟原理[J].清华大学学报(自然科学版),1994,34(04):38-43.
- [5] 何金良,曾嵘,陈水明,等.输电线路杆塔冲击接地电阻特性的模拟试验研究[J].清华大学学报(自然科学版),1999,39(05):5-8.
- [6] 杨财伟.接地装置冲击特性的模拟试验及有限元分析方法研究[D].重庆:重庆大学硕士论文,2010.
- [7] 李景丽.接地网频域性能及杆塔接地极冲击特性的数值分析及试验研究[D].重庆:重庆大学博士论文,2011.
- [8] 张宝平,何金良,康鹏,等.冻土冲击特性的试验研究[J].中国电机工程学报,2008,28(16):143-147.
- [9] 郭在华,邢天放,吴广宁,等.冰冻土壤中垂直接地极的接地电阻变化规律[J].高电压技术,2014,40(03):698-706.
- [10] 李景丽.接地网频域性能及杆塔接地极冲击特性的数值分析及试验研究[D].重庆:重庆大学博士论文,2011.