不同电流注入点对接地网参数测试影响的计算分析

变电站的接地网不仅可以降低电气设备的绝缘水平、为变电站站内各种电气设备提供了一个公共的参考点，而且在系统故障时可将故障电流迅速排泄，降低变电站的电位，保证人身和设备安全。接地网参数测试中接地电阻、地表电位、接触电压及跨步电压的测试都需对接地网注入一定测试电流，相关测试规程对测试电流的具体注入位置并未作出明确的规定，需要测试人员依据实际情况具体分析判断。从本质上说，接地网参数测试均是对各种接地网注入电流后散流效果的评估，依据电流场相关计算理论，利用CDEGSL软件对某变电站接地网建立了计算模型，对不同电流注入点时接地网参数特性进行了计算，为接地网相关测试与评估提供了理论依据。

胡春江/国网甘肃省电力公司电力科学研究院　刘晓华/国网甘肃省电力公司检修公司　范伟捷/北京送变电公司　李亚军/安徽正广电技术有限公司
陈　颖/西南交通大学电气工程学院

胡春江/高级工程师

关键词/Keywords
接地网·
接地阻抗·
地表电位·
接触电压·
参数测试·

0　引言

当电力系统发生接地短路故障或遭受雷击时，如果接地网接地电阻值比较大，会使地面电位过高，导致接触电压、跨步电压超过人体耐受值或因接地网电位异常升高使电气设备和保护装置受到反击过电压的影响，造成电网设备事故。调查表明我国各地发生过多起由于接地网性能不符相关技术要求的电网重大事故。

一般对于接地网性能的测试评估主要包括地表电位、接触电压、跨步电压及接地阻抗等项目的测试评估，上述参数概要性地反映了接地网的散流状况，参照DL/T 621—1997中的有关规定，在进行上述测试评估时也要根据实际情况，包括地形、地质和接地网的尺寸进行综合判断分析。上述参数是表征接地网性能的关键参数，大型接地网的状态评估应测试接地网上述参数，在上述项目测试中均需选择具体位置注入测试电流，比如于跨步电位差数值上即单位场区地表电位梯度，可直接在场区地表电位梯度曲线上量取折算，也可在所关心的区域，如场区边缘，重点是场区边缘的和运行人员常接触的设备，如隔离开关、接地开关及构架等区域，但各项目测试相关规程中并未对具体注入测试电流位置作出明确规定，本文利用散流场计算相关理论，对变电站接地网参数测试中不同电流注入点时接地网地表电位、接触电压、跨步电压及接地阻抗进行了计算，为接地网测试评估提供了一些参考。

1　接地网参数计算的基本与方法

1.1　CDEGS接地网计算软件简介

均匀土壤中接地参数的计算问题一般采用电磁场数值计算中的边界元法来模拟计算，但实际上大地并不是均匀导电媒质，因此常需采用分层均匀大地模型来处理。加拿大工程安全服务和技术公司（Safe Engnieering Service & technologies，SES）开发的电流分布、电磁场、接地和土壤结构分析软件（Current Distribution，Eletromagnetic Fields Grounding and Soil Structure Analysis，CDEGS）中接地参数辅助分析工具MALT程序基于线性滤波法，在世

界各国接地网参数计算中得到了广泛使用，本文依据电磁场数值计算理论，采用CDEGS软件对典型接地网地表电位、接触电压、跨步电压和接地阻抗进行了计算分析，为接地网测试和评估提供相关依据。

1.2 水平分层土壤中电位分布计算的基本理论

如图1所示，在底下有n层水平层状地中结构，各层电阻率分别为ρ_1、ρ_2、…、ρ_n，各层的厚度分别为h_1、h_2、…、$h_n=\infty$。各界面至地表间的距离分别为H_1、H_2、…、H_n，假如在地面A点注入电流大小为I的电流源。

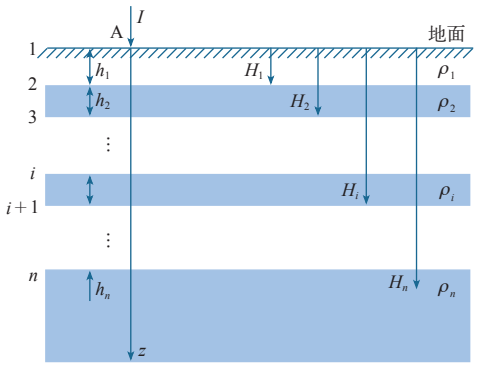

图1 n层地质层结构剖面图

在A为原点、z轴垂直向下的圆柱坐标系中，电位分布满足的拉普拉斯方程为

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial v}{\partial r}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}=0 \tag{1}$$

采用分离变量法求解该拉普拉斯方程，设

$$v(r,z)=f(r)g(z) \tag{2}$$

式中，$f(r)$为变量r的函数，$g(z)$为z的函数。将式（2）代入式（1）可以得到

$$\frac{1}{f(r)}\frac{\mathrm{d}^2 f(r)}{\mathrm{d}r^2}+\frac{1}{rf(r)}\frac{\mathrm{d}f(r)}{\mathrm{d}r}+\frac{1}{g(z)}\frac{\mathrm{d}^2 g(z)}{\mathrm{d}z^2}=0 \tag{3}$$

上式前两项只与r有关，而第三项只与z有关，因此可以假设

$$\frac{1}{f(r)}\frac{\mathrm{d}^2 f(r)}{\mathrm{d}r^2}+\frac{1}{rf(r)}\frac{\mathrm{d}f(r)}{\mathrm{d}r}=-m^2 \tag{4}$$

式中，m为常数。因此式（4）可分解为如下两式

$$\frac{\mathrm{d}^2 f(r)}{\mathrm{d}r^2}+\frac{1}{rf(r)}\frac{\mathrm{d}f(r)}{\mathrm{d}r}+m^2 f(r)=0 \tag{5}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2 g(z)}{\mathrm{d}z^2}-m^2 g(z)=0 \tag{6}$$

式（5）的解为零阶贝塞尔函数$J_0(mr)$和$Y_0(mr)$，而式（6）的解为e^{mz}和e^{-mz}。当$r=0$时，$Y_0(mr)$是发散的，所以通解中$Y_0(mr)$应舍去。另外由于m为任意常数，因此可以连续取0～+∞之间的所有值，因此第i层的电位为

$$v_i=\int_0^\infty J_0(mr)[A_i(m)\exp(-mz)+B_i(m)\exp(mz)]\mathrm{d}m \tag{7}$$

式中，$i=2,3,\cdots,n-1$；$A_i(m)$和$B_i(m)$为积分变量m的函数。

在实际工程中，主要关心的是土壤表面的电位分布即第一层土壤中的电位v_1。由于第一层土壤中有电流源A，所以除了A点外，其他各处的电位均满足拉普拉斯方程。这样第一层土壤中各点的电位可以看成两部分组成，一部分是电流源半无限介质中所产生的电位$v_1=I\rho_1/(2\pi R)$，$R=\sqrt{r^2+z^2}$，另一部分就是拉普拉斯方程的解。因此第一层土壤中各点的电位v_1为

$$v_1=\frac{I\rho_1}{2\pi R}+\int_0^\infty J_0(mr)[A_i(m)\exp(-mz)+B_i(m)\exp(mz)]\mathrm{d}m \tag{8}$$

在最上面的边界地面上，由于介质上层是空气，其电阻率为无限大，因此由第二类边界条件有

$$\left(\frac{\partial v_1}{\partial z}\right)_{z=0}=0 \tag{9}$$

由式（8）和式（9）可得$B_1(m)=A_1(m)$，代入式（8）可得第一层土壤中的电位为

$$v_1=\frac{I\rho_1}{2\pi\sqrt{r^2+z^2}}+\int_0^\infty J_0(mr)[A_i(m)\exp(-mz)+B_i(m)\exp(mz)]\mathrm{d}m \tag{10}$$

其他各界面处的边界可根据第一类边界条件和第三类边界条件进行分析。

实际工程中，n总是有限的，当$n=3$时，可以得到常用的三层水平地质结构时土壤表面的电位函数

$$v_1=\frac{I\rho_1}{2\pi}\int_0^\infty\frac{1-c(m)\exp(-2mh_1)}{1+c(m)\exp(-2mh_1)}J_0(mr)\mathrm{d}m \tag{11}$$

式中，$c(m)=(\rho_2-\rho_1 a/b)/(\rho_1+\rho_2 a/b)$，$a=1+K_{23}\exp(-2mh_2)$，$b=1-K_{23}\exp(-2mh_2)$，其中$K_{23}=(\rho_3-\rho_2)/(\rho_3+\rho_2)$。

本文利用上述电流场计算方法对接地网在不同电流注入点情况下采用的CDEGS软件对接地网相关参数进行计算。

2　不同电流注入点时接地网参数的计算

由于甘肃省土壤特征差别较大，土壤电阻率ρ的变化范围比较分散，本文中，选择甘肃省河西地区土壤电阻率较大的某变电站接地网建立计算模型，土壤电阻率ρ的变化范围为150～600 Ω·m，接地网的埋深为0.8 m，导体等效半径为0.005 84 m，接地网结构为100×100 m^{2}的正方形，均压带间距10 m。在假设入地电流为工频1 000 A时，建立计算相关模型，分别对注入电流点不同时地表电位、接触电压、跨步电压及接地阻抗进行计算分析。

2.1　当注入点沿接地网对角线变化时接地网电位的分布

利用1.2中的方法，对电流注入点沿接地网对角线变化时地表电位、接触电压及跨步电压进行计算，当注入点电流在接地网对角线交点处时，计算结果如图2～图4所示。

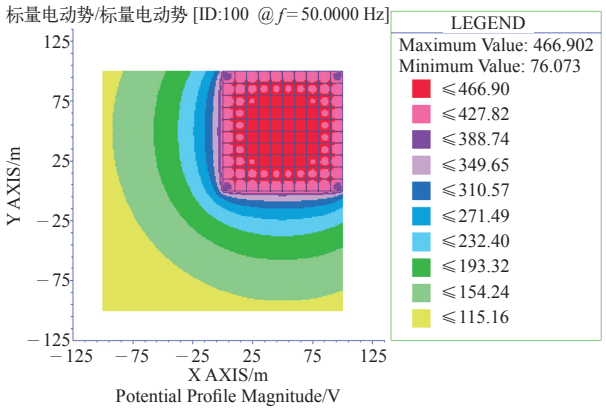

图2　电流注入点在中心时的地表电位分布

2.2　当注入点沿接地网边线变化时接地网参数的计算

利用同样方法对电流注入点沿接地网边线变化时地表电位、接触电压及跨步电压分布进行了计算，当注入点电流在接地网边线中心时，相关计算结果如图5～图7所示。

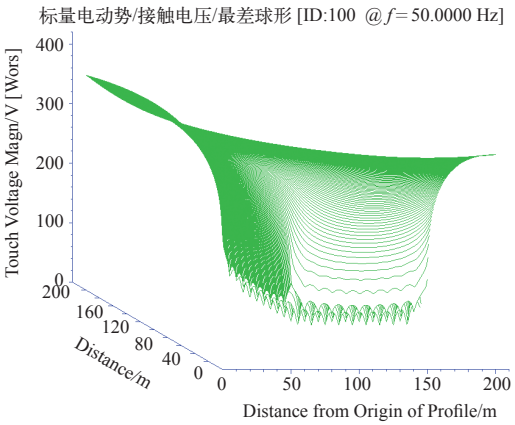

图3　电流注入点在中心时的接触电压分布图

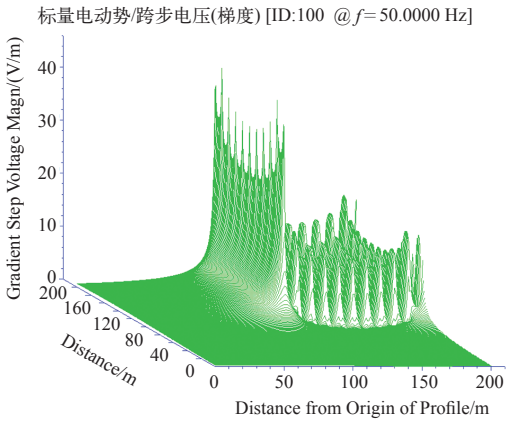

图4　电流注入点在中心时的跨步电压分布

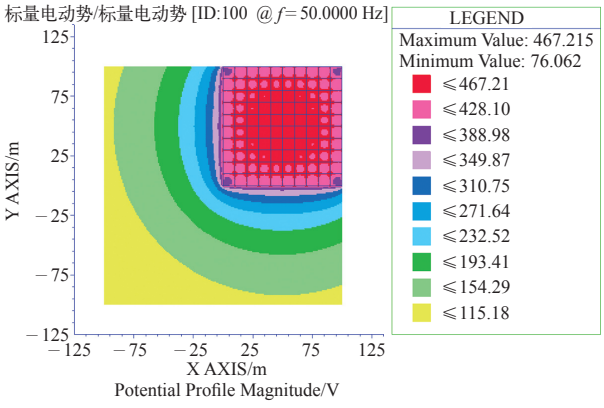

图5　电流注入点在接地网边线中心时的地表电位分布

2.3　不同电流注入点时接地网阻抗的计算

接地网模型不变，分别对当电流注入点沿接地网对角线变化和沿接地网边沿变化时，依据

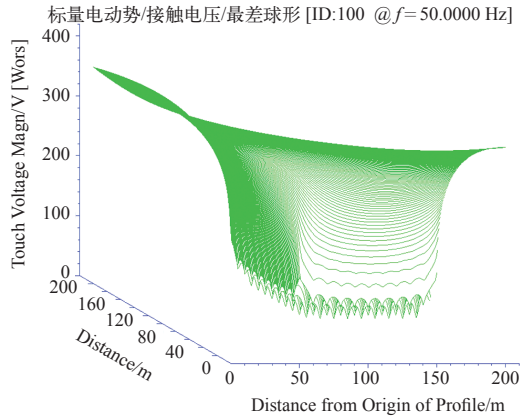

图6　电流注入点在接地网边线中心时的接触电压分布

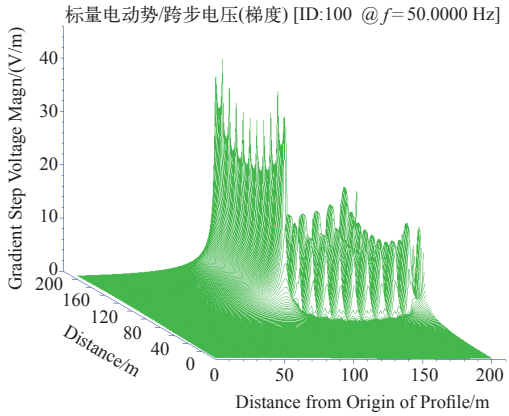

图7　电流注入点在接地网边线中心时的跨步电压分布

电压降法接地阻抗测试原理搭建测试模型，利用CDEGS软件计算得到工频下接地阻抗模值随电流注入点变化的曲线，如图8、图9所示，其中图8为工频下接地阻抗模值随电流注入点沿对接地网角线变化时的曲线，图9为工频下接地阻抗模值随电流注入点沿对接地网边沿变化曲线。

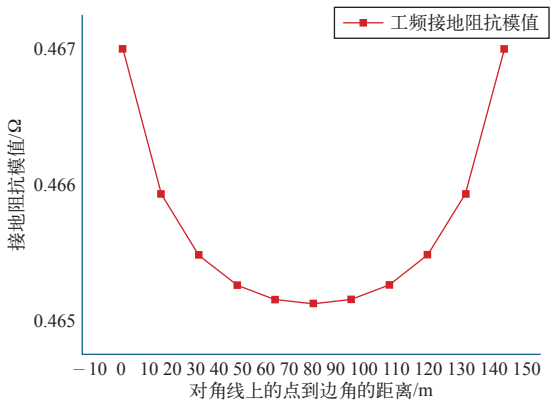

图8　工频下接地阻抗模值随电流注入点沿对角线变化变化曲线

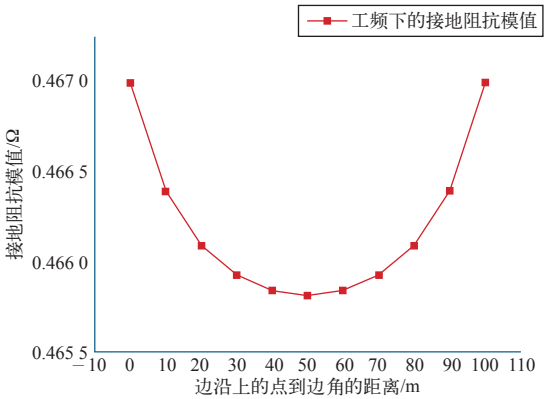

图9　工频下接地阻抗模值随电流注入点沿接地网边沿变化的曲线

3　计算结果的分析

接地网地表电位、接触电压、跨步电压分布和接地阻抗是接地网参数测试与评估的重要项目，通过本文计算可知，不同的测试电流注入点与上述参数有以下关系。

1）当注入点不同时接地网地表电位的分布。当注入电流确定时，接地网地表电位分布表现为：边角注入时，地表电位的最大值＞接地网边线中心注入时地表电位最大值＞接地网对角线中心注入时地表电位最大值，这一点说明在进行接地网状态评估时，应该结合设备布置，重点考虑接地网沿边线处的散流效果最差情况进行测试，按最严苛条件进行参数测试与评估。

2）注入点不同时接地网跨步电压的分布。通过计算结果及图4和图7的对比可知，就跨步电压分布而言，当电流注入点在接地网对角线中心时，其电压整体水平比电流注入点在边角时要低得多，极值点沿接地网边线分布，对接地网跨步电压的评估，需结合接地网中设备及在整个接地网的分布位置，进行综合评估。

3）当注入点不同时接地网接触电压的分布。接触电压的分布与接地网格呈相同的分布规律，临近故障点附近以及边角附近的接触电压则比较高，因此对于接触电压的评估重点可关注存在较大电流入地情况的设备区域。

4）当注入点不同时接地网接地电阻的影响。依据在不同测试电流注入点时接地阻抗的计算，

在进行接地网接地阻抗测试时，电流注入点沿接地网对角线变化时，接地阻抗模值先减小再增大，在对角线中点有极小值，可以推断当故障点发生在接地网中心时，接地网的散流效果最好。在边角处的接地阻抗值较大，所以在进行接地网接地阻抗现场测量时，需在边角上接地散流效果最差的点为电流注入点，以此时测得的接地阻抗值作为基准，评价最为严格。

4 结束语

本文依据接地网计算理论，利用CDEGS接地网特性仿真计算软件对甘肃某变电站接地网建立计算模型，计算了接地网在不同电流注入点时地表电位、接触电压、跨步电压分布和接地阻抗，不同电流注入点对上述参数影响的相关计算结论，为今后变电站接地网的现场测试与准确评估提供了相关依据。

参考文献

[1] 胡春江，河西走廊高土壤电阻率地区电网接地电阻测量与分析 [J]. 电测与仪表，2014，51 (18)：121-123.

[2] DL/T 475—2006 接地装置特性参数测量导则 [S]. 北京：中国电力出版社，2006.

[3] 李增. 复杂土壤地区接地网电气特性的研究 [D]. 成都：西南交通大学，2007.

[4] 李谦，肖磊石，饶章权，等. 广东电网变电站接地网安全性状态评估 [J]. 南方电网技术，2013，7 (5)：21-26.

[5] 司文荣，傅晨钊，卞晓亮，等. 变电站接地网缺陷诊断无误评价方法综述 [J]. 电气工程学报，2015，10 (8)：14-21.

[6] 鲁志伟，常树生，李越，等. 大型变电所接地网接地阻抗与接地电阻的差异 [J]. 高电压技术，2005，31 (1)：14-16.

[7] 李谦. 发电厂和变电站接地网安全状态评估 [M]. 北京：中国电力出版社，2013.

[8] 王洪泽，杨丹，王梦云. 电力系统接地技术手册 [M]. 北京：中国电力出版社，2007.

[9] 曾嵘，何金良，高延庆，等. 电极位置对垂直三层土壤结构中接地系统接地电阻测量结果的影响 [J]. 清华大学学报：自然科学版，2001.

[10] Rogers E J，White J F. Mutual coupling between finite lengths of parallel or angled horizontal earth return conductors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，1989，4 (1)：103-113.

[11] 郭华俊，董巧元，姚晓芳，等. 大型接地装置接地电阻测量及其影响因素 [J]. 高电压技术，2002，28 (12)：47-48.

[12] Zeng Rong，Gong Xuehai，He Jinliang，et al. Lightning impulse performances of grounding grids for substations considering soil ionization [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2008，23 (2)：667-675.

[13] 孙结中，刘力. 运用等值复数镜像法求解复合分层土壤结构的格林函数 [J]. 中国电机工程学报，2003，23 (9)：146-151.

[14] Guemes-Alonso J A，Hernando-Fernandez F E，Rodriguez-Bo-na F，et al. A practical approach for determining the ground resistance of grounding grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2006，21 (3)：1261-1266.

（收稿日期：2016－05－17）EA

(上接第30页)

[9] 李洪珠，孙佳月，马文涛，等. 基于半桥变换器与次序耦合变压器超级电容均压 [J]. 电气工程学报，2015，10 (6)：41-46.

[10] 中华人民共和国工业和信息化部. QC/T 741—2014车用超级电容器 [S]. 北京：中国计划出版社，2006.

[11] 方崇智，萧德云. 过程辨识 [M]. 北京：清华大学出版社，2006.

[12] 王志贤. 最优状态估计与系统辨识 [M]. 西安：西北工业大学出版社，2004.

（收稿日期：2016－04－11）EA