

文章编号:1000-582X(2009)11-1280-05

# 缩短测量引线测量大型接地网接地电阻的方法

刘渝根<sup>1</sup>,余晓东<sup>1</sup>,宋兹楠<sup>2</sup>,苏玉萍<sup>1</sup>,田金虎<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400030;

2. 贵州安顺供电局,贵州 安顺 561000)

**摘要:**针对 0.618 法测量大型接地网接地电阻存在测量引线过长的缺点,采用计算机数值方法对大量不同形状、不同面积及不同布置方式的接地网地面电位分布进行计算和分析,提出将接地网等效为直径等于接地网长边长度的圆盘接地极,取测量电流极引线长度为 1 倍地网长边长度,电压极引线为 0.509 倍电流极引线长度来测量接地电阻的新方法。通过对实际接地网接地电阻的测量结果表明:该方法克服了 0.618 法测量引线过长的缺点,且测量结果准确,适用于大型接地网接地电阻的测量。

**关键词:**接地网;接地电阻;测量;数值方法

中图分类号:TM835

文献标志码:A

## Grounding resistance measurement method of large grounding grids with short current wire

LIU Yu-gen<sup>1</sup>, YU Xiao-dong<sup>1</sup>, SONG Zi-nan<sup>2</sup>, SU Yu-ping<sup>1</sup>, Tian Jin-hu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. Anshun Power of Guizhou Grid Corporation, Guizhou Anshun 561000, P. R. China)

**Abstract:** The 0.618 method for grounding resistance measurement has long wire lead defect. By calculating and analyzing the ground-potential of a large number of grounding grids which are different in shape, area and rod-arrangement style using computer numerical method, it presents that the grounding grids can be equivalent to disc shape grounding electrodes. A new method of grounding resistance measurement is presented that taking the current-electrode wire as long as the longer side length of grounding grids and voltage-electrode wire as 0.509 times long as the current-electrode wire. The measurement accuracy of this method is testified by experiment in field. The proposed method has much shorter wire than 0.618 method, it is suited to grounding resistance measurement of large grounding grids.

**Key words:** grounding grid; grounding resistance; measurements; numerical method

目前,工程上常采用 0.618 法测量发、变电站接地网的接地电阻<sup>[1]</sup>,该方法要求将辅助电流极置于距地网边缘 4~5 倍地网对角线长度的地方,当接地

网规模较大时测量电流极引线将会很长,这将给现场测量带来一系列的麻烦,如:1)布线困难;2)测量引线越长,损耗越大,测量所用电源容量、体积、重量

收稿日期:2009-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59677016)

作者简介:刘渝根(1963-),男,重庆大学副教授,主要从事电力系统过电压及接地技术研究,(Tel)023-65103183;  
(E-mail)cd\_yugen\_liu@yahoo.com.cn。

均增加,使现场测量更为困难<sup>[2]</sup>;3)采用架空输电线路作为测量电流极和电压极引线要求线路停电,影响供电可靠性。可见,研究用较短测量引线准确测量大型接地网接地电阻的方法具有重要的理论价值和现实意义<sup>[3]</sup>。

## 1 接地网电位分布规律及等效接地极

### 1.1 新建接地网等效接地极的必要性

0.618 法的基础是将接地网等效为半球接地极,而发、变电站的接地网大多是外缘闭合、内部敷设若干均压导体的网状结构,只有在待测接地网与辅助电流极之间有足够距离的前提下接地网才能等效为半球接地极。因此,研究缩短电流极引线测量接地网接地电阻的方法,首先必须研究接地网的电位分布规律,建立新的接地网等效接地极。

### 1.2 不同接地网的电位分布规律

根据接地理论,当土壤电阻率及埋深一定时,接地网接地电阻主要与接地网面积、形状以及导体布置方式等因素有关<sup>[4-6]</sup>。因而,只需对不同面积、不同形状及不同布置方式的接地网地面电位进行计算并分析其分布规律。由于实际接地网形状大多为方形或者近似于方形,所以,仅对正方形接地网和长方形接地网进行研究。接地网地面电位采用由重庆大学开发的接地参数计算软件来计算,该软件基于对接地网导体分段的思想,能计算接地网外任意一点的电位<sup>[7-10]</sup>。

#### 1.2.1 正方形接地网地面电位分布规律

设正方形地网面积为 50 m×50 m,土壤电阻率为 250 Ω·m,入地短路电流为 10 kA,从接地网边缘注入,水平接地导体半径为 0.01 m,埋深为 0.6 m,垂直接地极为 8 根半径 0.04 m、长度 2 m 的圆钢,均匀分布在地网边缘。分别对实际工程中常见的几种接地网(包括均压带根数分别为 5×5、5×10、10×10 三种情况下等间距与不等间距、有垂直接地极与无垂直极共 12 种)的地面电位进行计算,如表 1 所示。

表 1 50 m×50m 接地网不同布置方式下的地面电位

s/m	$U_{\max}/V$	$U_{\min}/V$	$\Delta U/V$	$\eta/\%$
0	23 636.35	19 491.43	4 144.92	21.30
10	12 526.68	12 264.29	262.39	2.10
20	9 406.34	9 324.57	81.77	0.88
30	7 560.96	7 525.39	35.57	0.47

续表 1

s/m	$U_{\max}/V$	$U_{\min}/V$	$\Delta U/V$	$\eta/\%$
40	6 328.81	6 308.35	20.46	0.32
50	5 446.03	5 421.64	24.39	0.25
60	4 779.57	4 768.08	11.49	0.24
70	4 259.79	4 251.34	8.45	0.20
80	3 842.88	3 836.48	6.40	0.17
90	3 500.90	3 495.93	4.97	0.14
100	3 215.23	3 211.29	3.94	0.12
110	2 972.95	2 969.77	3.18	0.11
120	2 764.83	2 762.23	2.60	0.09
130	2 584.09	2 581.93	2.16	0.08
140	2 425.64	2 423.83	1.81	0.07
150	2 285.58	2 284.04	1.54	0.07

表 1 中,s 表示接地网外电位计算点距离接地网边缘中心点的距离, $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$  分别表示在 s 一定时,各种接地网地面电位中的最大值与最小值。电位差  $\Delta U=U_{\max}-U_{\min}$ , 电位差百分比  $\eta=\Delta U/U_{\min}$ 。从表 1 中可以看出面积相同、布置方式不同的正方形接地网在距离接地网边缘较近的位置地面电位差别较大,而在距离接地网边缘约 80% 地网边长(约 40 m)以后各点的电位差均小于 1%,也就是说,此时的电位分布可以近似认为与接地网布置方式无关。对不同面积的接地网,采用同样的分析方法可以得出相似的结论,即无论接地网的水平接地导体和垂直接地极如何布置,在距离正方形接地网边缘 80% 接地网边长以后,不同布置方式的接地网的地面电位差已小于 1%,此时地面电位分布可以近似认为与接地网布置方式无关。

#### 1.2.2 长方形接地网地面电位分布规律

设长方形接地网面积为 100 m×50 m。如图 1 所示,其余参数与上例相同,取接地网边缘中心为坐标原点,沿垂直于接地网短边的方向 1 和垂直于接地网长边的方向 2 分别计算地面电位。采用与正方形接地网相同的分析方法可作出各种布置方式下接地网外地面电位差百分比与距离的关系,如图 2 所示。

从图 2 可以看出,长方形接地网具有和正方形接地网相似的电位分布规律。改变接地网面积,可以得出同样的结论。

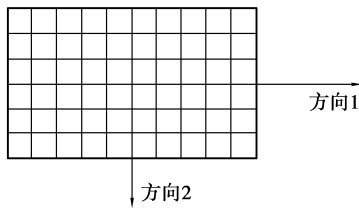
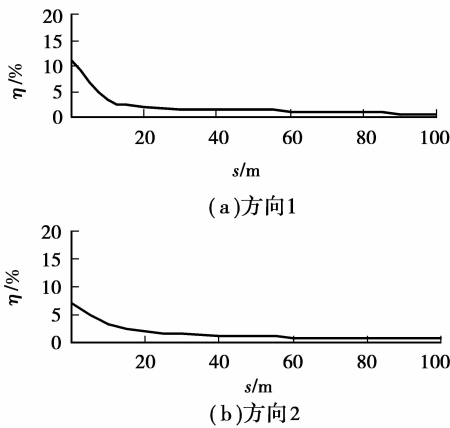


图 1 长方形地网地面电位计算方向

图 2 方向 1 与方向 2 的  $\eta$  与  $s$  关系

### 1.3 接地网等效圆盘接地极

如前所述,在距离接地网边缘一定距离之后,可以忽略接地网接地导体布置方式的不同给地面电位带来的差异,因此可以选取一种典型的接地网来分析其等效接地极模型。

#### 1.3.1 正方形接地网等效圆盘接地极

通过对大量正方形接地网地面电位的计算和比较,发现正方形接地网地面电位分布与以其边长为直径的圆盘接地极的电位分布最为相似<sup>[11-13]</sup>。分别计算面积为  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 、 $5 \times 5$  根水平接地导体等间距布置的正方形接地网,半径分别为  $25\text{ m}$  (正方形接地网边长的一半) 和  $35.5\text{ m}$  (正方形接地网对角线长的一半) 的圆盘接地极和半球接地极的地面电位,如图 3 曲线所示。

从图 3 可知,在离开地网边缘以后,正方形接地网的电位曲线与以其边长为直径的圆盘接地极的电位曲线接近速度最快,也最为接近,当距离地网边缘约 80% 地网边长(圆盘接地极直径)以后两者的电位差不超过 1%。改变正方形接地网的面积,可以得到同样的结论。因此,可以将正方形接地网等效为以其边长为直径的圆盘接地极,以圆盘接地极的电位公式来等效计算正方形接地网的电位。

#### 1.3.2 长方形接地网等效圆盘接地极

计算面积为  $100\text{ m} \times 50\text{ m}$ 、 $10 \times 20$  根水平接地

导体等间距布置的长方形接地网沿图 1 所示方向 1 与方向 2 的地面电位,然后与半径为  $50\text{ m}$  的圆盘接地极的地面电位进行比较,如图 4 所示。

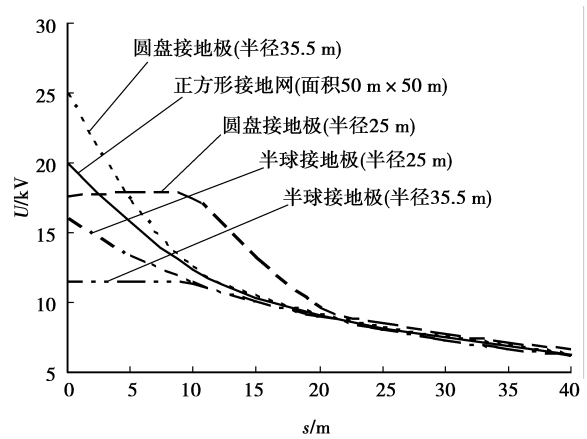


图 3 正方形接地网与其他接地极电位分布曲线

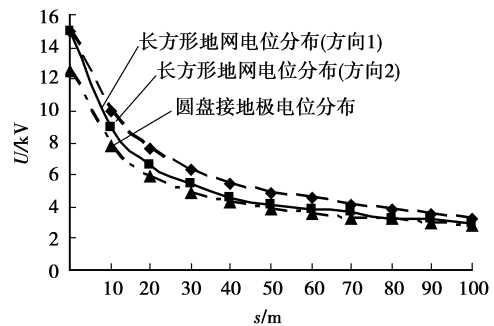


图 4 长方形接地网与圆盘接地极电位曲线

从图 4 可知,长方形接地网沿方向 1 和方向 2 的电位曲线与以其长边长为直径的圆盘接地极的电位曲线极为相似,并随着距离的增大,差别越来越小。但与正方形接地网不同,即使在距离接地网边缘 80% 接地网长边长(圆盘直径)的地方,电位差别也不能完全忽略,因此可以将长方形接地网等效为以其长边长为直径的圆盘接地极,但必须对测量结果进行适当的修正。

## 2 测量电流极布置位置

根据上述分析,将接地网等效为圆盘接地极,假设入地短路电流  $I$  从地网  $G$  流入,从电流极  $C$  流出,  $D_{GP}$ 、 $D_{GC}$  分别表示电压极和电流极距离接地网边缘的距离,  $D_{PC}$  表示电压极  $P$  与电流极的距离,  $r$  为圆盘接地极半径。接地电阻测量布线图如图 5 所示。

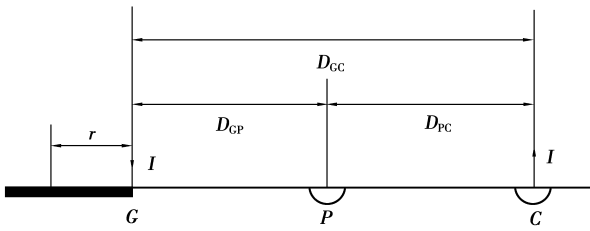


图 5 接地电阻测量布线图

已知圆盘接地极的真实接地电阻  $R_0$  为<sup>[14-15]</sup>

$$R_0 = \frac{\rho}{4r}, \quad (1)$$

式中  $\rho$  为土壤电阻率。按照图 5 所测得的接地电阻值  $R$  与接地网真实接地电阻值的差别为

$$R - R_0 = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{D_{PC}} - \frac{1}{D_{GC}} - \frac{1}{r} \sin^{-1} \frac{r}{D_{GP} + r} \right). \quad (2)$$

要测得真实接地电阻值应使式(2)等于零,即

$$R - R_0 = 0. \quad (3)$$

由前面的分析可知,在距离接地网边缘约 80% 接地网长边长之后,接地网的电位分布与其长边长为直径的圆盘接地极的电位分布相似,由此将接地网等效为圆盘接地极。为保证等效的正确性,应将测量电流极置于离接地网边缘 80% 接地网长边长以外的地方,推荐取电流极引线长度为接地网长边长  $D$ , 即:  $D_{GC} = D$ 。

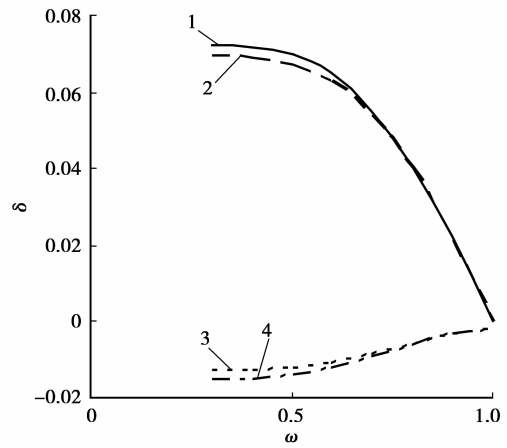
令  $D_{GP}/D_{GC} = \alpha$ , 将  $D_{GC} = 2r$  代入式(3), 有

$$\frac{1}{2(1-\alpha)r} - \frac{1}{2r} - \frac{1}{r} \sin^{-1} \frac{r}{2\alpha r + r} = 0. \quad (4)$$

由式(4)可以计算得:  $\alpha = 0.509$ 。因此,当缩短电流极引线长度为接地网长边长  $D$  时,电压极引线长度取为  $0.509D$ , 即可测量得到真实的接地电阻值。

### 3 长方形接地网接地电阻测量结果修正

前面提到,长方形接地网也可以等效为圆盘接地极,但必须对测量结果进行修正。设长方形接地网长边长度固定不变,短边长度可变以改变接地网面积和形状。电流极引线长度为接地网长边长  $D$ , 电压极引线长度为  $0.509D$ 。沿图 1 所示方向 1 和方向 2 分别计算接地电阻测量值  $R_c$ , 以地网短长边长之比  $\omega$  为横轴, 接地电阻测量误差  $\delta = (R_c - R_z) / R_z$  ( $R_z$  为接地参数计算软件计算所得接地电阻值, 设为真值) 为纵轴, 作出接地电阻测量误差曲线如图 6 所示。



1.  $D=200$  m、方向 2 测量误差曲线;  
2.  $D=100$  m、方向 2 测量误差曲线;  
3.  $D=100$  m、方向 1 测量误差曲线;  
4.  $D=200$  m、方向 1 测量误差曲线。

图 6 长方形地网接地电阻测量误差曲线

从图 6 中可知,接地网短长边长之比一定时,不同面积接地网接地电阻测量误差之间的差别都比较小,并且沿方向 1 测量的误差比沿方向 2 测量得小。经计算分析可知,不论沿方向 1 还是方向 2 测量产生的误差均不会超过 10%, 当对测量精度要求不高时是可以接受的。可见,0.509 法对于长方形接地网同样适用。当对测量精度要求较高时,可以对图 6 误差曲线进行拟合,得到如下测量误差表达式。

方向 1:

$$\delta = -0.1999\omega^2 + 0.1617\omega + 0.0406. \quad (5)$$

方向 2:

$$\delta = 0.0256\omega^2 - 0.0143\omega - 0.0149. \quad (6)$$

因此,真实接地电阻值计算的公式为

$$R_z' = R_c' / (1 + \delta), \quad (7)$$

式中:  $R_z'$  为长方形接地网真实接地电阻值;  $R_c'$  为初步测量得到的接地电阻值。

### 4 试验验证

为验证所提出的接地电阻测量方法(0.509 法)的准确性与实用性,选择 2 个接地网进行测量,试验中同时采用了 0.618 法进行了测量对比,测量数据如表 2 所示。表 2 中 A 表示接地网面积,  $R_1$ 、 $R_2$  分别为 0.618 法和 0.509 法的测量结果。从表中可以看出 0.509 法与传统 0.618 法相比测量误差很小,这证明了 0.509 法测量的准确性,同时 0.509 法相

比 0.618 法测量电流极和电压极引线大为缩短,使 测量更加方便。

表 2 0.509 法与 0.618 法的测量结果比较

站名	A/m <sup>2</sup>	0.618 法			0.509 法			误差/%
		D <sub>GC</sub> /m	D <sub>GP</sub> /m	R <sub>1</sub> /Ω	D <sub>GC</sub> /m	D <sub>GP</sub> /m	R <sub>2</sub> /Ω	
重庆 220 kV 大竹林变电站	226.2×138.2	1 038	636	0.36	240	122	0.340	5.56
内蒙海勃湾发电厂	450×300	1 620	1 000	0.18	450	230	0.185	2.78

## 5 结 语

采用数值计算的方法通过对不同接地网地面电位的计算和分析,得出可以将接地网等效为直径等于接地网长边长度的圆盘接地极,同时通过对圆盘接地极接地电阻测量位置的分析,提出了取测量电流极引线长度为接地网长边长度,电压极引线长度为 0.509 倍电流极引线长度的接地电阻测量方法。通过对两个实际接地网接地电阻的测量,验证了该方法测量的准确性,同时该方法相对于 0.618 法测量引线大为缩短,使测量更方便,适用于接地网面积较大和布线困难的发、变电站接地网接地电阻的测量。

### 参考文献:

- [1] 陈先禄,刘渝根,黄勇. 接地[M]. 重庆:重庆大学出版社,2002.
- [2] 周霞,郑港,周文俊. 大型地网接地电阻测量用变频电源的研制[J]. 高电压技术,2004,30(6):67-68.  
ZHOU XIA, ZHENG GANG, ZHOU WEN-JUN. The development of frequency-changing power used in ground resistance measurement of large-scale grounding grid[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(6):67-68.
- [3] 何金良,曾嵘,高延庆. 电力系统接地技术研究进展[J]. 电力建设,2004,25(6):1-3.  
HE JIN-LIANG, ZENG RONG, GAO YAN-QING. Progress of study on grounding technology of modern power system[J]. Electric Power Construction, 2004, 25(6):1-3.
- [4] 潘文霞. 不均匀土壤地网接地电阻的降低及效果分析. 南京理工大学学报[J]. 2001,25(5):504-508.  
PAN WEN-XIA. Effect analysis on decreasing grounding grid resistance in non-uniform soils [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2001, 25(5):504-508.
- [5] BALDEV T, VICTOR G, ARUN B. Evaluation of ground resistance of a grounding grid of any shape[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1991, 6(2):640-647.
- [6] MELIOPOULOS A P, MOHARAM M G. Transient analysis of grounding systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1983, 102(2):389-399.
- [7] 陈先禄,王长运,刘渝根,等. 接地极电流分布的一种简化计算方法[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2006,29(10):16-19.  
CHEN XIAN-LU, WANG CHANG-YUN, LIU YU-GEN, et al. Simplified method for calculation of current distribution on grounding electrodes [J]. Journal of Chongqing University: Natural science edition, 2006, 29(10):16-19.
- [8] ZENG R, HE J L, GAO Y Q. Grounding resistance measurement analysis of grounding system in vertical-layered soil[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4):1553-1559.
- [9] CHANG C N, LEE C H. Computation of ground resistances and assessment of ground grid safety at 161/23.9kV indoor-type substation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3):1250-1260.
- [10] ZENG R, HE J L. Novel measurement system for grounding impedance of substation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2):719-725.
- [11] 黄锐锋,李琳,张波,等. 变电站接地网接地电阻近距离测法与系统开发[J]. 高电压技术,2004,30(9):27-29.  
HUANG RUI-FENG, LI LIN, ZHANG BO, et al. Novel method for measuring the grounding resistance of the substation grid with short leads and the system development [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(9):27-29.
- [12] LUIS A D, VALENTINO T. Simplified calculation of ground losses in low-and medium-frequency antenna systems[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2006, 48(6):70-81.
- [13] GIUSEPPE P, MARIO L. Measurements of touch and step voltages adopting current auxiliary electrodes at reduced distance [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(6):1896-1901.
- [14] GUEMES J A, HERNANDO F E. Method for calculating the ground resistance of grounding grids using FEM[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2):595-600.
- [15] 徐华,刘黎,陈斌. 变电站接地网的精确测量探讨[J]. 高电压技术,34(10),2008:2205-2208  
XU HUA, LIU LI, CHEN BIN. Discussion on precision measurement for the grounding grid of substation [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10):2205-2208.

(编辑 王维朗)