

接地电阻测量方法的改进

赵 智, 吴希再, 刘宏君

(华中理工大学电力系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 详细总结分析了接地电阻测量中引起测量异常和测量误差的各种因素, 得出克服测量异常及减小误差的方法, 提出构成新接地电阻测量仪的新思路。

关键词: 接地电阻; 地电阻率; 集肤效应

中图分类号: TM93

文献标识码: B

文章编号: 1003-4897(2001)05-0030-04

1 引言

电流从接地体向周围的大地散流时, 土壤呈现的电阻称接地电阻。接地电阻对人身安全和电力系统设备及运行有重大意义, 但当前其现场测量却不尽如人意。

当前接地电阻的测量主要有接地摇表法, 0.618 法及等腰三角形法, 接地摇表法由于抗干扰能力、固有误差、稳定性等因素的制约, 一般只用于小型发电厂和变电站的测量。0.618 法和等腰三角形法实质上都是交流电压电流表法, 依电流极和电压极间位置的调整补偿掉极间互阻后测得真值, 在原理上补偿时, 这两种方法都先假定土壤电阻率各向同性, 而实际情况远非如此, 单纯靠加长测量引线长度无法解决由此引入的误差。现场条件下还存在自然电场和人工电场的干扰, 如何排除这些干扰使测量结果更准确, 也是现场实验人员经常面对的问题。此外, 带不带架空地线、地下水管、互感电势、大地的集肤效应和极化效应等都会引入误差, 这些误差常达到真值的 20% 以上, 极个别情况下甚至高达真值的几十倍, 故接地电阻的测量方法必需作改进。

本文总结分析了接地电阻测量中引起测量异常和测量误差的各种因素。提出了改进测量精度的方法以及具体实现的措施。

2 当前接地电阻的主要测量方法及其存在的问题

当前电力系统测量接地电阻主要采用 0.618 法和等腰三角形法, 其原理如图 1 所示。

这两种方法都先假设大地电阻率各向同性, 再利用接地网和电流极、电压极之间互阻抗相补偿。从而得到测量结果。但现场测量时受各种因素制约, 测量的误差较大。

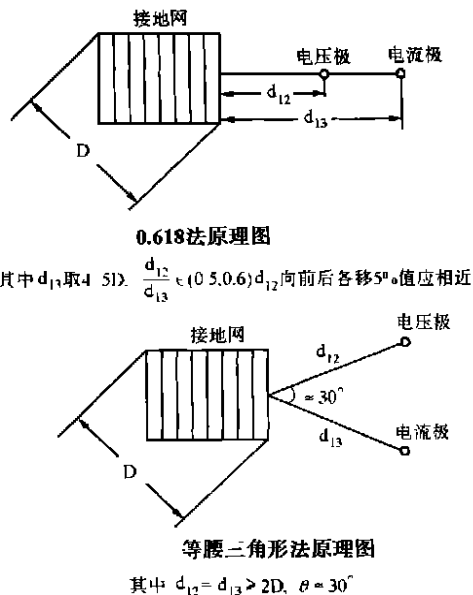


图 1

2.1 由大地电阻率不均匀引起的测量异常

现场的大地电阻率很少是各向同性及均匀的, 测量中必须根据实际情况适当选取测量放线方向, 以使结果更接近真值, 但效果并不理想。

首先是跨越垂直接触的断面测量, 干涸的河床、大的岩石都有与周围土壤不一样的电阻率, 其接触面往往可视为垂直接触的断面, 如图 2(a)、(b) 所示, 其次, 软土层下面的粘土层、沙砾层等可视为水平接触的多层断面如图 2(c) 所示。

现分别作各情况下 0.618 法布极测量的定性分析, 图 2 中, x 为接地电网, y 为电压极, z 为电流极, ρ_1 、 ρ_2 为土壤电阻率。各电极视为与地面平齐的半圆球电极。

(1) 图 2(a) 中, 当 x 在 ρ_1 区, z 、 y 在 ρ_2 区时, 由镜像法可得各极间互阻

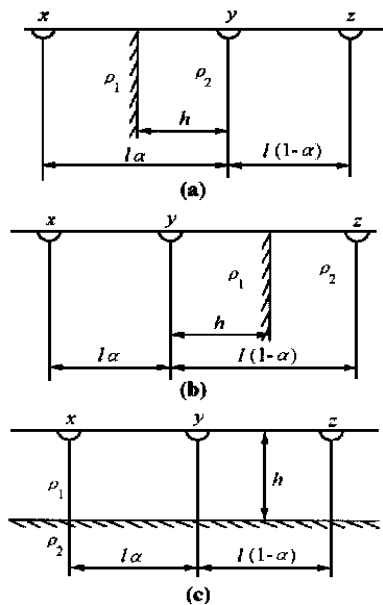


图 2

$$\begin{cases} R_{xy} = \frac{\rho_2(1 - k_{12})}{2\pi\alpha} \\ R_{xz} = \frac{\rho_2}{2\pi l}(1 - k_{12}) \\ R_{yz} = \frac{\rho_2}{2\pi} \left[\frac{1}{l(1 - \alpha)} - \frac{k_{12}}{2h + l(1 - \alpha)} \right] \end{cases} \quad (1)$$

其中 k_{12} 为反射系数, $k_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = -k_{21}$

此时欲补偿使 $R_{yz} - R_{xy} - R_{xz} = 0$

$$\text{则: } 2h' + 1 - \left(\frac{2h'}{H} + 2 \right) \alpha - 2h\alpha^2 + \alpha^3 = 0 \quad (2)$$

其中: $H = 1 - k_{12}$, $h' = \frac{h}{l}$

(2) 如图 2(b) 所示, 当 x, y 在 ρ_1 区, z 在 ρ_2 区时, 取 $H' = 1 - k_{21}$, 同样可以由镜像法得:

$$\alpha^3 + (2h' + 1)\alpha^2 - \alpha - \frac{2h'}{H}(1 - \alpha) = 0 \quad (3)$$

以上两种情况下 α 的取值由 ρ_2/ρ_1 决定, 当 $\rho_2/\rho_1 = 1$ 时, $H' = H = 1$, 式 2 和式 3 的解都是 $\alpha = 0.618$, 然而一般情况下 $\rho_2/\rho_1 \neq 1$, 若一直选取 0.618 处布极, 从原理上就引入了误差。

(3) 如图 2(c) 所示。此时仍使用镜像法, 利用电荷分析法, 可求得电极周围地表距电流极 l 远处 M (如图 3 所示), 电位分布函数为:

$$U_M = \frac{\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{l} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{12}^n}{\sqrt{l^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (4)$$

图 3 中镜相电荷的取值:

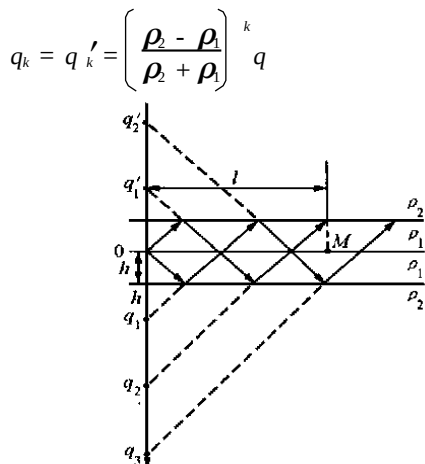


图 3

显然, 极间互阻可得

$$\begin{cases} R_{xy} = \frac{\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{l\alpha} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{12}^n}{\sqrt{(l\alpha)^2 + (2nh)^2}} \right] \\ R_{xz} = \frac{\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{l} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{12}^n}{\sqrt{l^2 + (2nhx)^2}} \right] \\ R_{yz} = \frac{\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{l(1 - \alpha)} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{12}^n}{\sqrt{l^2(1 - \alpha)^2 + (2nh)^2}} \right] \end{cases}$$

此时由 $R_{yz} - R_{xy} - R_{xz} = 0$ 可知: α 取决于 h 和 l , 只有在 $h \gg l$ 时 α 的取值才接近 0.618。

2.2 由自然电场和人工电场干扰引起的测量异常

地中的自然电场成因很多, 如电化学电场, 过滤电场、扩散电场、大地电流场及雷暴电场等都会影响测量出的结果。

电化学电场由矿体形成, 大小从几分之一毫伏到几百毫伏, 一般是不随时间变化的值。高处的水向低洼处过滤, 将形成过滤电场, 其强度决定于地下水流速、流量、矿化作用、水流范围及深度等因素。强度可达每公里几百毫伏的量级, 在 0.5 欧数量级及较长测距情况下自然电场的干扰就变得明显起来。

大地中的人工电场, 主要由大地回路中的地电流产生, 接地系统中的零序电流, 中性点不接地系统中经地的不平衡电容电流等都会在接地网和测量极间产生干扰电压。

由自然电场和人工电场产生的干扰有很宽频带, 实际测量中不能完全排除。

2.3 带架空地线测量引入误差

大接地短路电流系统中的电力设备, 接地装置的接地电阻用 $R \leq \frac{2000}{I}$ 规定^[2]。其中 I 指流经接地装置的入地短路电流, 已经考虑了“地线——杆塔”接地系统的分流作用。所以如果测量时不把架空地

线与接地网断开的话,测量的接地电阻就会偏小。

2.4 电流线和电压线间互感电势引起的误差

为减小干扰常需在电流线中加很大的电流,如 100A,此时对 0.618 布极法,由于导线相互平行,当测距很长时就会在接地电阻的测量中引入很大的感应误差。

$$\Delta R = \frac{2\pi f M}{R}$$

两导线间互感 $M = \mu_0 l (\ln \frac{2l}{d} - 1) \times 10^{-7}$ (亨),其中 l 为两导线平行长度(米), d 为导线间距离(米)。

当然,可通过避免电流线和电压线的平行或接近来降低感应误差,但现场测量时往往无法做到或者代价昂贵。这就需要一精确的算法来进行补偿。

2.5 地的集肤效应和激发极化效应引起的误差

用“导线—大地”回路来测量接地电阻时,电流线中有很大的电流在接地网和电流极之间的广大区域流动,在此区域内产生很大的磁场,该磁场将对地中电流的分布发生显著的影响,现设导线距地面的高度 h_1 ,如图 4 所示,则距导线 h_2 处电流密度为:

$$\delta_h = \sqrt{j} \frac{\beta}{\pi h_1} \frac{H_0(\sqrt{j}\beta h_2)}{H_1(\sqrt{j}\beta h_1)} I e^{-\mu_0 \beta h_2}$$

$$\text{其中, } \begin{cases} \beta = 2\pi \times 10^{-3} \sqrt{\frac{f}{10\rho}} \\ H_0(\sqrt{j}\beta x) \approx \frac{1}{2} - j \frac{2}{\pi} \ln \frac{2}{1.7811\beta x} \\ H_1(\sqrt{j}\beta x) \approx -\frac{2\sqrt{j}}{\pi\beta x} \end{cases}$$

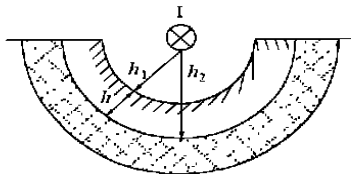


图 4

由公式可见电流密度随深度的增加而降低,随着频率的增加集肤效应就更明显,结果就是使接地网的接地电阻增加一与频率有关的分量,所测得值较真值偏大。

交流电流通过大地时,大地的视在电阻率因电流频率的增大而减少,这种现象叫做激发极化效应。该效应与地中矿物含量有关,经验证明当频率位于 10~100Hz 时,土壤电阻率为:

$$|\rho| = \frac{\rho_0}{1 + k \log \frac{f}{f_0}} \quad [3]$$

其中 k 为经验常数, ρ_0 为 f_0 时的土壤电阻率,在矿化地区由于 k 取值较小,大地视在电阻率随频率的变化较显著。

3 接地电阻测量方法的改进

对接地电阻的测量方法的改进,已经有了很多探讨,例如改用“四极回归法”。随着电源技术、计算机及滤波理论的发展,接地电阻的测量可以达到更理想的状态。

3.1 减小由大地电阻率不均匀引起的测量误差

实际测量中往往对大地结构有一些定性了解,在一些资料完备的地区,由于通讯手段发达,定量的数据也很容易获得,如该地网的几何尺寸、以往接地电阻的测量值、大地的剖面结构、土壤电阻率等。利用这些资料往往可以迭代解出较准确的放线长度和放线方向,得出准确的测量值。这就需要将各种测量的经验和电磁场方程综合形成数据库,存入测量装置中。

3.2 消除电流线和电压线间互感引起的测量误差的影响

在利用数据库确定出放线长度和放线方向时,尽量避免电压线和电流线的平行或接近,这样两线间互感所造成的误差很小,可以忽略。

3.3 研制新型接地电阻测量装置

显然,若无新型装置接地电阻测量中很多问题是无法从根本上解决的,必需研制新型测量装置。由对引入测量误差的各原因分析可见,新装置必须包含以下部分:

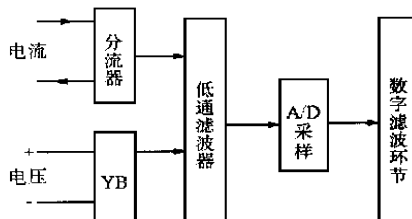


图 5

a. 可变频电源,该电源频率可在 0~50Hz 可调,并能提供 100A 以下的电流。

在电源输入端必须三相平衡,从而减少人工电场对测量结果的影响。在电源频率低于 50Hz 时所测量结果会大于工频接地电阻真值,但是偏于安全的一面,其次两者测得结果差别很小,故可以小范围

变频测量。

b. 具有选频测量功能的数据采集和处理系统。

如图 5 所示,该系统的模拟低通滤波器和 A/D 采样的频率相匹配,即其平缓通频带至 50Hz,而到达 Nyquist Interval 边际时其衰耗到达 40dB 以上。

由于人工电场的干扰和测量信号的频谱混叠,所以对数字信号的处理不能采用经典数字滤波器,必须采用卡尔曼滤波或者维纳滤波来处理。

自然电场的干扰在短时间内可认为是不变的,频域较宽。而人工电场所引起的干扰主要是工频量及其各次谐波量,在数据采集和处理过程中,先经模拟低通滤波器和数字带通滤波器滤去干扰中的高频和直流分量,由于采用了三相平衡的变频电源,可认为噪声 W 和信号 X 是不相关的,从电流 I_0 开始(有效值),每隔 ΔI 采集一次数据,可得到一电流序列 $\{I_k = I_0 + k\Delta I, k=1, 2, 3, \dots\}$ 和电压序列 $\{U_k, k=0, 1, 2, \dots\}$ 。由于电流的测量误差和电压误差相比很小,可忽略。

根据系统的电磁性质,可得到:

$$\text{系统模型: } X_{k+1} = \begin{bmatrix} U_{k+1} \\ R_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta I \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_k \\ R_k \end{bmatrix}$$

$$\text{测量模型: } Z_k = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} U_k \\ R_k \end{bmatrix} + n_k$$

(n_k 是第 k 次测量时的噪声)

由卡尔曼滤波过程,递推求出:

$$\text{预测估值: } X_{k+1/k} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta I \\ 0 & 1 \end{bmatrix} X_k$$

$$\text{残差: } \tilde{Z}_{k+1} = Z_k - [1, 0] X_{k+1/k}$$

$$\text{预测协方差: } p(k+1/k) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta I \\ 0 & 1 \end{bmatrix} p_k \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \Delta I & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{最佳权值: } K_{k+1} = p(k+1/k) \cdot \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \left[[1 \quad 0] p(k+1/k) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \sigma_r \right]^{-1} \right\}^{-1}$$

$$\text{滤波估值: } X_{k+1} = X_{k+1/k} + K_{k+1} \tilde{Z}_{k+1}$$

滤波估值协方差:

$$p(k+1) = [I - K_{k+1} [1 \quad 0]]$$

由上一次的估值 X_k 得到的预测估值 $X_{k+1/k}$ 开始,根据每次测量值 Z_{k+1} 可依次求出残差 $\tilde{Z}_{k+1}$,预测协方差 $p(k+1/k)$,最佳权值 K_{k+1} ,滤波估值 X_{k+1} ,滤波估值协方差 $p(k+1)$,从而完成一次循环。在实际测量中,常常无验前统计。这时的起始

条件可由多种方法得到。例如可以取一次测量值 Z_1 可求得:

$$\left. \begin{aligned} P(1) &= [E I + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} R^{-1}(1) [1 \quad 0] [1 \quad 0]]^{-1} \\ X_1 &= [E I + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} R^{-1}(1) [1 \quad 0]]^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} R^{-1}(1) Z_1 \end{aligned} \right\}$$

这样求得 $P(1)$, X_1 就可作为起始条件。其中, $\sigma_r^2 = E[n_r^2] = R(k)$ 为测量误差方差。

反复递推后可滤去人工电场和自然电场的干扰。

c. 小型数据库。

数据库由一些相关数据构成,如该地网的几何尺寸、以往接地电阻的测量值、大地的剖面结构、土壤电阻率等。在测量中加以利用,确定出最合理的具体测量方式,例如放线方向、放线长度等,以提高测量精度等。从而使得测量的数学模型更精确。

4 结论

在接地电阻测量中,引起测量异常和误差的因素很多,为了克服这些异常和误差本文主要提出三种解决的方法。首先,用卡尔曼滤波滤去被污染信号中的噪声;其次,采用了原方三相平衡的可变频电源,既消除了测量本身造成的人工电场干扰,也为卡尔曼滤波提供了较好的条件;第三,新型测量装置中包含了一数据库,从而可根据现场条件,譬如以前的测量值等可得到比较合理的放线长度和放线方向,使得测量的数学模型更加精确。

参考文献:

- [1] 中国电力行业标准 DL475-92, 接地装置工频特性参数的测量导则.
- [2] 国家标准 GB165-83, 工业与民用电力装置的接地设计规范.
- [3] 傅良魁. 电法勘探教程. 地质出版社, 1983.
- [4] Sharick G 著, 侯景韩译. 接地工程. 人民邮电出版社, 1988. 5.
- [5] 冯慈璋. 电磁场(第2版). 高等教育出版社, 1983. 10.

收稿日期: 2000-09-17

作者简介: 赵智(1972-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统微机保护; 吴希再(1940-), 男, 教授, 研究方向为电力系统继电保护及变电站综合自动化; 刘宏君(1974-), 男, 硕士, 研究方向为变电站综合自动化。(下转第36页)

时,系统零序电压的基波分量和零序电流的基波分量满足判据 3 的特征,可据此与单相接地区分开来。

3 选线、消谐装置的工作原理

装置的硬件组成如图 3 所示,装置首先采样各段母线的零序电压,如果某段母线出现大于门限值 U_0 的零序电压则认为出现故障,如果零序电压的频率为分频或倍频则发生的是铁磁谐振,进行消谐。否则需进一步判断是基波谐振还是单相接地,即同时采样该段母线的零序电压和其对应所有线路的零序电流,经快速傅立叶变换后,按基波或谐波(如中性点不接地系统采用基波判据,中性点经消弧线圈接地系统采用谐波判据)幅值大小将各线路的零序电流排队,并选出前 3 条线路,再进一步比较这 3 条线路零序电流的方向,如某线路零序电流方向与其它路相反,则认为该条线路是故障线路,如果 3 条线路同相,则再比较 3 条线路的幅值,如果 3 条线路的幅值很小且彼此接近,则认为是基波谐振,进行消谐。否则为母线接地故障。

消除 PT 铁磁谐振最理想的方法是将开三角绕组瞬间短接。本装置即是利用可控硅瞬时短接 PT 开三角绕组,使铁磁谐振在强阻尼作用下迅速消失达到消谐目的。

4 结论

本文总结了单相接地和 PT 铁磁谐振的故障特征,提出了接地选线与铁磁谐振的综合判据,圆满解决了长期以来困扰配电网的小电流接地选线及基波铁磁谐振的判别问题。并依据此原理开发出了微机选线、消谐装置,该装置具有单相接地故障选线和智能消除 PT 铁磁谐振双重功能,实际运行效果良好,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 张树文,李文毅,等. 小电流接地系统单相接地保护原理和技术综述. 电力情报, 1994, (4): 1 - 3.
- [2] 朱子述. 电力系统过电压. 上海交通大学出版社, 1995, : 88 - 92.
- [3] 郝玉山,杨以涵,等. 小电流接地微机选线的群体比幅比相原理. 电力情报, 1994, (4): 15 - 19.
- [4] 陈维贤,鲁铁成,花涛. 配电网网络互感器谐振及抑制新方法. 高电压技术, 1993, (9): 3 - 6.

收稿日期: 2000-09-28

作者简介: 王建颢(1972 -),男,讲师,主要研究方向为数字信号处理技术及电力电子技术在电力系统中的应用; 吴启涛(1974 -),男,博士研究生,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用; 纪延超(1962 -),男,教授,博导,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用; 柳焯(1929 -),男,教授,博导,主要研究方向为电力系统分析与控制、灵活交流输电技术。

A novel detector of ground fault and ferro-resonance in ungrounded distribution system

WANG Jian-ze, WU Qi-tao, JI Yan-chao, LIU Zhuo

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In ungrounded distribution system the single - phase - grounding and the ferro - resonance caused by the PT (Potential Transformer) are of the frequent accidents. In both of the cases above, the shift voltage of neutral point often appears. So one does not differ from the other easily, especially for the fundamental frequency ferro - resonance. It is the primary cause that the present fault - feeder detector and the PT - resonance - eliminator judge wrongly sometimes. To overcome the disadvantage above, a new general criterion, which applies to detect both the fault - feeder and the PT resonance, is presented in this paper. This criterion utilizes the character of the zero - sequence current in the both cases. And the novel detector of ground fault and ferro - resonance, which is developed based on it, works efficiently in practice.

Keywords: ungrounded distribution system; single phase grounding; ferro-resonance

(上接第 33 页)

The improvement on measurement method for the grounding resistance

ZHAO Nai-zhi, WU Xi-zai, LIU Hong-jun

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The different factors that cause abnormal and error measurement in measuring grounding resistance are described and analyzed in this paper. And the measures against them are presented. An idea that is to develop a new grounding resistance measuring instrument is proposed.

Keywords: grounding resistance; grounding resistivity; skin effect