

利用计算机辅助测量接地阻抗

孙怡¹, 姚广平²

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东山大华特科技股份有限公司, 山东 济南 250061)

摘要: 描述了一种计算机辅助测量接地阻抗的设备, 该设备引入了测量接地点与辅助接地点之间的瞬时电流, 通过测量被测接地点的接地电势差, 利用校正的方法消除外部噪声的影响, 再用估测的方法, 测得接地电势的升高值和接地阻抗值, 从而克服了传统的电压测量法的种种弊端。

关键词: 接地阻抗; 噪声过滤; 误差校正; 接地电势差

中图分类号: TM930.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)17-0056-04

0 前言

接地阻抗的传统测量方法是采用电势差法, 它是以接地系统无限远处作为参考电位, 以避免接地系统的其它干扰和影响。这种方法需要很长的线路, 而线路越长则越容易受到电力系统频率电流的干扰, 使整个处理过程变得很复杂。对于一个大的具有低阻抗的接地系统, 采用这种测量方法就变得非常麻烦, 特别是 50 Hz 频率噪声和谐波干扰使测量更加繁杂。为了消除 50 Hz 的噪声干扰和谐波电压的影响, 克服传统测量法的种种弊端, 这里采用了一种新型计算机辅助测量设备。它首先测量接地电势差, 然后用数字信号处理方法处理采集数据, 以消除外部噪声, 并推算出精确的接地电势上升值, 最后计算出接地阻抗。

1 测量方法

计算机辅助接地阻抗测量装置的操作方法如下所述: 引入被测接地系统与临时安装电极之间的瞬时电流并持续稳定一段时间(典型做法为 0.5 s)。在此期间, 测量注入电流和瞬时接地电势差, 其中接地电势差用来测量相对于距被测系统较远距离的地面上几个点的接地电势上升值。这些测量数据通过编制好的计算机软件来处理, 其作用是: 过滤噪声; 校正由电压和电流传感器引起的误差; 估算被测系统相对于无限远点接地电势的上升值;

计算接地阻抗相对于频率的值是否超出用户给定的频率范围。

测试系统需要对噪声进行过滤, 因为整个测量过程是在有噪声的环境中进行的, 就像供变电过程中要消除在电力系统中出现的来自工频电流及高次谐波的干扰一样。校正算法用来消除由电压、电流

等测量信道以及变频器、仿真过滤器等测量信道带来的误差。经过过滤和校正后的测量值作为一个频率函数, 被用来估测接地阻抗值。出于上述考虑, 用来估测过程的参数充分考虑到了电压和电流探测器(以下均称为探针)的几何排列。下面对精确接地阻抗测量仪的硬件和软件简介如下。

1.1 测量系统的硬件简介

测量系统的硬件由 4 个主要部分组成: PC 机、信号采集和控制模块、电流源模块以及外部硬件, 其中外部硬件包括两组电压探针(每组 3 个探针)和一组电流回流极探针。接地阻抗测量仪的原理框图如图 1 所示, 其中信号采集、控制模块和电流源模块均安装在一个控制箱内。

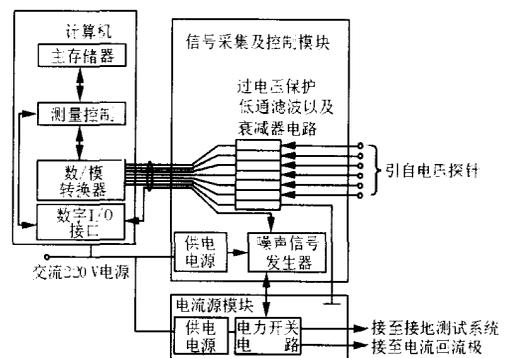


图 1 “精确”接地阻抗测量仪功能模块原理图

Fig. 1 Functional block diagram of the "smart" ground impedance meter

信号采集和控制模块用来处理来自系统的 6 个电压探针和 1 个电流极的信号。上述电流和电压信号先通过 1 个过电压保护电路, 然后通过低通滤波器以消除在设定频率范围以上(如 1 kHz)的所有的噪声。它们按一定的比例缩小到对合适电子设备的水平, 接着经模/数转换器转换成数字量, 最后将这

些信号存储到内存中以便信号处理及接地阻抗计算软件处理。

数据的采集和存储是由计算机来控制的。此外,计算机还将持续监视被测信号,如果被探测的信号不合适会向操作人员发出报警。特别应指出的是,计算机能确保被测信号的水平保持在最佳范围内,从而使信号处理组件的信噪比达到最优而不会产生超载。

电流源模块由供电电源(交流 220 V)和电力开关电路组成。开关信号取自信号采集模块,当信号为 ON(或称高电平)时,在被测接地点和电流探针之间就会有一个大小在 2~20 A 范围内的环流流过,并通过电流极检测环流的大小。此外,还测量被测接地点与几个电压探针区域周围及距接地点一定距离的电势差。这个测量过程的周期大约为 0.5 s,收集的数据被存储在一个大容量的内存中,以便由精确接地阻抗测量仪软件进行后续处理。

测量数据通过 7 个输入信道进行采集,其中 6 个用作接地电势差通道,而另外一个用作注入电流信道,每个信道的硬件框图如图 2 所示。由电压探针采集的信号通过带有过电压保护的低通滤波器滤除那些有可能损害信号处理电子系统的峰波。滤波器还将设定范围以上的频率部分衰减掉,使这些信号经模/数转换器转换为数字量后不产生混淆。在低通滤波器之后加有衰减器,衰减器的作用是使被测量的信号保持在 A/D 转换器的范围之内,同时还应考虑到 A/D 转换器的动态特性。具体地说,衰减器应调整到最大水平以避免模数转换器超载,其衰减水平可设置为输入信号的 1/5、1/10、1/20 和 1/40。同时还在模/数转换器电路前加入了过电压保护。

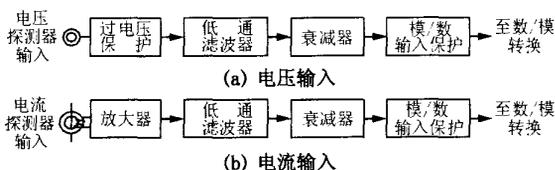


图 2 输入信道硬件框图

Fig.2 Input channel hardware

电流信号是从接在电流源输出端的电流互感器上获得的。电流互感器连接着一个外部呈阻性的支路,其变比通常为 0.02V/A,输出结果为电压。由于电压很低,因此在输出电路中采用了一个积分放大器,以提高输出电压的幅值。在放大器的输出端连接一个无源低通滤波器以及与电压探针输入电路相

类似的衰减器,每一个衰减器的输出通过模/数输入保护电路后接至模/数转换器的输入端。模/数转换器的输出直接连接至测量控制计算机的数据总线上,以便数据在总线上快速传输。

PC 机是一台测量控制计算机,它从 A/D 转换器获得数字化的电压和电流信号并将其存储。计算机检测这些信号是否在设定的范围内,若不在测量范围之内,将向操作人员发出报警信号。

电流源模块的作用是向被测接地系统注入自激的电流,该电流源接在被测接地系统与距被测接地点几百米远的接地极(电流极)之间。注入电流的波形应覆盖要求频率范围内的所有虚拟随机噪声(典型的频率范围为 0~1 kHz)。

上述产生电流的方法如图 3 所示。设想一个电流源通过一个电阻 R 和开关与接地系统相连,当开关随机地间隔重复闭合时,就会有一个瞬时电流在接地系统中流过,其频谱覆盖的频率范围的截止频率取决于最大开关速度(电流波形和波形频谱略)。

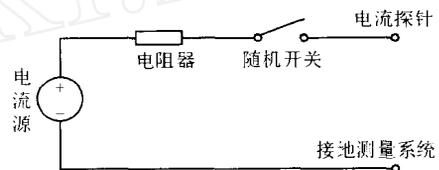


图 3 噪声电流发生器示意图

Fig.3 Schematic diagram of noise current generator

电流源的执行电路采用了 4 只绝缘门极双极型场效应管(IGBTs),并用一组电阻器与 IGBT 桥串联,电阻器用来限制总的输出电流以防止输出电路短路。IGBTs 驱动电路的输出信号由伪随机噪声源提供,其运行操作如下:由 555 定时器与一个多谐振荡器相连产生时钟信号,时钟频率由一个与 RC 回路连接的 555 定时器指标选定,并可通过控制箱前面板上的波段开关选择 4 种不同的频率(1,2,4,8 kHz)。

需要说明的是,测量仪在测量接地阻抗时,其外部设施和测量仪中的各个模块会不同程度地产生暂态响应,其响应特性会影响系统监测的性能、稳定性和测量精度。为消除其影响,在设计测试仪的硬件电路时,充分考虑了系统结构和各个环节的性能指针构造及参数,并通过对系统参数的调整及采用系统综合校正(或补偿)来改善系统性能,消除稳态误差及减少设备暂态响应的的影响,以确保接地阻抗测量的精度。

1.2 精确接地测量软件简介

测量系统的软件主要包括 4 个部分:

- 1) 测量数据采集程序;
- 2) 误差校正及噪声减少程序;
- 3) 接地阻抗估算算法;
- 4) 人机界面。

数据采集软件主要完成测量数据的采集和数字化,并将采集到的数据存储在计算机的内存中以备后续处理。误差校正及噪声减少软件主要给模拟滤波器以及测量仪输入输出模块动态响应带来的误差提供补偿。另外,它还用于消除仪器中的所有噪声以提高测量精度。这些噪声来自外部干扰电源,例如信号采集引入的工频电流及其谐波等。在正常情况下,上述干扰只存在于接地系统中。接地阻抗估算算法主要用来测量数据和在接地模型中估测接地系统的阻抗,其结果是接地阻抗对频率的函数。人机界面保证了用户与 PC 机之间有一个良好的对话接口,以确保用户获取所需的信息。例如电压探针或电流极的位置、显示测量到的接地电势差及电流的大小以及接地阻抗对频率的大小等。对用户来说,人机对话程序可以使用户获得在线帮助。

在数据采集过程中,电流源向被测接地系统注入电流 $i(t)$ 。利用设置在 6 个区的电压探针,来测量相对于接地系统电压的大地电压,这些电压即接地电势差和注入的电流,均作为采样波型被储存在控制计算机中。

采样波型是按下列步骤完成的:接地测量系统按恒定的采样速率同时对 6 个电压探针和一个电流探针进行采样,并将采集到的数据直接存储到随机内存中。一旦对每个探针的采样达到 N_s 次时,将对采集到的数据进行处理,而这个处理过程要重复进行。我们把每一组采样定义为一个区,这样,在每个区都含有持续采样的数据。但由于在顺序区之间处理采样信号需要花费时间,因此在整个采样过程中将存在采样空缺。

接地测量装置对采集到的数据进行处理的过程主要是通过接地阻抗估算算法建立数学模型以及阻抗相对于频率的函数关系。首先设定 I_j 作为注入电流采集样本的第 j 个参数,然后将 V_j 设定为被测接地电势差 (GPD) 采集样本的分区的向量,那么就有:

$$V_j = [V_{1j} V_{2j} V_{3j} V_{4j} V_{5j} V_{6j}]$$

在这里,每一路输入的 V_{ij} 都表示由电压探针 i 得到的一系列采样数据, j 表示整个测试区的数量。

由于被采集的电流和电压信号是离散、截止的,并且会由于噪声干扰而出现波型的畸变。因此,在数据处理过程中首先用傅里叶变换将上述信号转换为频率的函数,然后进行计算。以下对数学模型的建立、公式的推导以及流程图从略。

2 输入通道的校验

如上所述,精确接地测量仪是基于 6 个接地电势差和注入电流的基础上进行测量的。每个采样得到的数据均通过输入信道输入到测试设备中,其中包括过压保护、噪声滤波器、衰减器以及 A/D 转换器等部分。这些通道的示意图已在图 2 中示出。为了得到接地电势差和注入电流的精确测量值,需要知道每一个信道确切的传递函数。实际上,每个输入通道是不同的,这是因为它们是由不同精度的组件组成。因此,分别测量所要求的频率范围内的每个信道的传递函数是非常必要的。为此,系统设计了一个简单的程序,并专门设计了一个包括 2 个电阻器和 6 个电位器的辅助设备(校验箱),其电路图如图 4 所示。

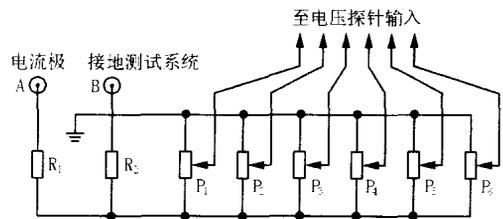


图 4 校验箱电路

Fig.4 Calibration box circuit

在图 4 所示的电路中, R_1 是一个高精度电阻器,它代表一个假设接地测试系统的接地电阻; P_1 至 P_6 是高分辨率的可调电位器,它们可被调整到某个预定的设置(如 50%)。通过在 R_1 上施加一个已知的电压就可得到和测量出每一个电位器上的输出电压。电阻 R_2 是一个限流电阻器,表示假设接地测试系统中电流返回极的接地电阻。现在,把校验箱连接到精确接地阻抗测试仪上就可以完成输入通道的校验。以下对注入电流输入信道以及 6 个电压输入信道的传递函数的推导从略。计算出的传递函数被储存在 PC 机的内存中,并将应用于实际测量过程中。

另外,采样通道中选用了较多的电阻、电容和运算放大器等电子元器件,为减少由此带来的线性度和温漂的影响,接地阻抗测试仪在信号采集及控制模块中除了利用传统的硬件电路的精心设计来消除

上述影响外,还采用了线性最小二乘原理(理论推导、通道校正及测试结果从略)进一步解决采样通道校正问题,利用上述措施来确保测量仪的测量精度。

3 精确接地阻抗测量仪的实验室及现场调试

精确接地阻抗测量仪已经通过实验室和现场调试。实验室中的实验是应用一个与接地系统大致相同的模型,该模型是由集成组件构成,相当于一个 $100 \times 100 \text{ m}$ 的接地网络。该模型配有中性线,中性线可以随意连接在接地网络中。通过测量已知模型的阻抗,就可以校验精确接地测量仪并修正误差校正算法。

经过实验室实验后,精确接地阻抗测量仪又在几个变配电接地系统和变电站中经过了现场调试,进行这些现场调试的目的是为了检验证明测量仪在实际现场中能否正确运行。下面以荣成变电站和马青变电站的测试结果为例加以说明:

1) 荣成变电站是一个 $220 \text{ kV}/10 \text{ kV}$ 变电站。1991年,采用传统的电势差法对该变电站的所有断开零线的接地阻抗进行测量,在其相位几乎为零(接近纯电阻)的情况下,测得其阻抗值为 1.12Ω 。1998年,仍采用上述方法再次对接地阻抗测量,其结果为 0.92Ω ,接地阻抗值减少的原因是在变电站附近新建了许多建筑物。2001年,使用精确接地阻抗测量仪分别对变电站的所有断开零线和连接零线路的接地阻抗和进行了测试,测试结果示于图5。从曲线图的记录可以看出,所有断开零线的接地阻抗在 50 Hz 时为 0.43Ω ,而连接零线时为 0.64Ω 。在测量期间,使用了不同的电流回流极和不同的电压探针。在各种情况下,都获得与图5中相同的阻抗-频率特性曲线值。与传统的电势差降测量到的 0.92Ω 接地阻抗值相比,用精确接地阻抗测量仪测量到的 0.43Ω 则更加准确。图中还记录了 $0 \sim 500 \text{ Hz}$ 范围的接地阻抗的阻值。

2) 马青变电站建于1969年。目前,该变电站由一条 110 kV 高压进线,一台 $110/35 \text{ kV}-25 \text{ MVA}$ 变压器和2条 35 kV 高压出线组成。所有馈电线路的零线均接至变电站的接地系统。1997年采用电势差法对变电站的接地阻抗进行测试,地阻仪摇表发出的频率大约 $50 \sim 60 \text{ Hz}$,电流约 10 mA ,用该方法测试得出的阻抗值结果为 0.174Ω 。2002年,采用精确接地阻抗测量仪对马青变电站的接地阻抗进

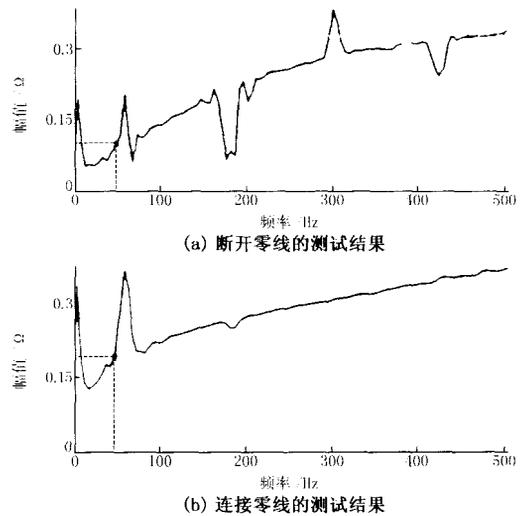


图5 在荣成变电站测试接地阻抗

Fig. 5 Measured ground impedance at Rongcheng station

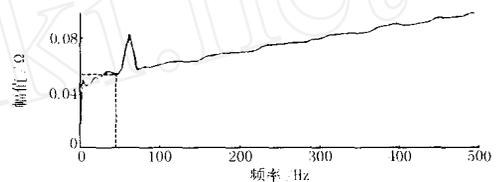


图6 马青变电站接地阻抗测试

Fig. 6 Measured ground impedance at Maqing station

行了测试,在 50 Hz 时的接地阻抗值为 0.054Ω ,比用传统的地阻仪测量的结果低 3.2 倍(参见图6)。

现场运行结果表明,使用精确接地阻抗测量仪对上述接地系统进行接地阻抗的测试(测试过程中的数据分析、程序运算以及计算结果从略),其测试精度及测试效果均优于传统的接地阻抗测量方法。系统经过调试,硬件和软件系统均工作正常,运行效果良好。

参考文献:

- [1] 杨洪涛,赵海蓉(YANG Hong-tao, ZHAO Hai-rong). 浅析发电机转子绕组交流阻抗的测量(Method for Measuring AC Impedance of Generator Rotor and Effects on Decision of Turn-to-turn Short Circuit Fault)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(11): 58-59.
- [2] Papalexopoulos A D, Meliopoulos A P. 接地系统的频率特性曲线(Frequency Characteristics of Grounding System)[J]. 电气电子工程学会学报(IEEE Trans on Power Delivery), 1987, 11(4): 1073-1081.

(下转第 63 页 continued on page 63)

- 质量远程在线实时监测系统研究(Study on the On-line and Real-time Power Quality Remote Monitoring System) [J]. 铁道学报(Journal of the China Railway Society), 2003, 25(4): 42-47.
- [2] 刘君华, 贾惠芹, 丁晖, 等(LIU Jun-hua, JIA Hui-qin, DING Hui, et al). 虚拟仪器图形化编程语言 Labview 教程(A Course of Virtual Graphics Language Labview) [M]. 西安:西安电子科技大学出版社(Xi'an: Xidian University Press), 2001.
- [3] 李永臣, 艾欣(LI Yong-chen, AI Xin). 基于虚拟仪器技术的电能质量在线监测系统(On-line Monitoring System of Power Quality Based on Virtual Instrument Technique) [J]. 现代电力(Modern Electric Power), 2002, 19(1): 50-54.
- [4] 张鹏展, 艾欣(ZHANG Peng-zhan, AI Xin). 应用 PcAnywhere 的电能质量在线监测(On-line Power Quality Monitoring Based on PcAnywhere Technique) [J]. 华北电力大学学报(Journal of North China Electric Power University), 2003, 30(3): 9-12.
- [5] 全国电压电流等级和频率标准技术委员会(National Standardization Technical Committees of Standard Voltages, Current Ratings and Frequencies). 电压电流频率和电能质量国家标准应用手册(The National Standard Application Manual of Voltages, Current, Frequencies and Power Quality) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 2001.

收稿日期: 2004-06-29; 修回日期: 2004-07-26

作者简介:

孙毅(1972-),男,讲师,长期从事电力系统通信方面的研究工作;

唐良瑞(1966-),男,博士,副教授,研究方向为多媒体通信、电力系统通信、图像处理等; E-mail: tangliangrui@163.com

龚钢军(1974-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统通信。

Design and realization of on-line monitoring system of power quality

SUN Yi, TANG Liang-rui, GONG Gang-jun

(Dept of Information Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To the tendency of on-line monitoring, this paper puts forward a design scheme of the on-line monitoring system of power quality. The characteristics of the data monitoring subsystem, communication subsystem and Server subsystem of the proposed system are detailed. With its employment, electric power departments can master power quality timely and accurately and assess the power quality of power grid properly.

Key words: power quality; virtual instrument; on-line monitoring

(上接第 59 页 continued from page 59)

- [3] 西安交通大学(Xi'an Jiaotong University). 电力系统计算(Calculation of Electric Power System) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1981.
- [4] 刘钦圣, 等(LIU Qin-sheng, et al). 最小二乘问题计算方法(The Calculation Method of Problem About the Least Square) [M]. 北京:北京工业大学出版社(Beijing: Beijing

University of Technology Press), 1996.

收稿日期: 2004-02-09; 修回日期: 2004-04-14

作者简介:

孙怡(1960-),女,本科,工程师,主要从事电气技术应用; E-mail: lsanzh@sdu.edu.cn

姚广平(1968-),男,硕士,工程师,主要从事信息通讯和工业控制的开发及应用。

Ground impedance assistant measuring based on computer

SUN Yi¹, YAO Guang-ping²

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061;

2. Shandong University WIT Science and Technology Co., Ltd, Jinan 250061, China)

Abstract: This paper presents a PC based instrument for ground impedance measurement. The instrument injects a transient current between the ground point under measurement and an auxiliary ground point, and measures ground potential differences (GPDs) around the ground under measurement. The GPDs measurements are processed with software which rejects external noise using correction methods. Subsequently, estimation methods are used to extract the ground potential rise and ground impedance and to overcome the shortcomings in traditional voltage drop measurement.

Key words: ground impedance; noise filtering; error correction; ground potential difference