

# 直流系统在线绝缘检测装置的研制

杨波<sup>1</sup>, 张宝生<sup>2</sup>

(1. 南京国电自动化研究院, 江苏 南京 210003; 2 东南大学电气工程系, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 对直流系统常用的几种接地电阻测试方法进行了比较分析, 指出了它们在使用中的缺点。研制了一种新的直流系统接地电阻检测仪, 集检测、显示、记录于一体。该仪器以 MCS-51 单片机为控制核心, 以 CPLD 为辅助控制单元, 采用乒乓式变电桥测量法, 实现了接地电阻的准确在线测量。着重介绍了仪器的工作原理以及软硬件设计。该仪器具有测量精度高、抗干扰能力强、人机界面友好以及成本低等优点。

**关键词:** 直流系统; 在线检测; 接地电阻; 乒乓法

**中图分类号:** TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)17-0042-05

## 0 引言

发电厂和变电站的直流电源一般作为主要电气设备的保安电源及控制信号电源, 是一个十分庞大的多分支供电网络, 其常见的故障是一点接地。一般情况下, 一点接地并不影响直流系统的运行, 但若不能及时找到并排除接地点, 在系统出现多点接地时, 就可能引起信号回路、控制回路、继电保护装置等的误动作, 从而破坏电力系统的安全运行, 甚至造成大范围的停电事故。

现有检测直流系统接地电阻的方法主要有电桥法、交流信号注入法和直流漏电流法。电桥法的思路是, 用直流系统正负极对地电阻和人为设置的两个电阻组成电桥, 系统正常时, 电桥平衡。当系统出现某一点接地时, 电桥失去平衡, 产生报警信号。该方法存在以下缺陷: 正负极接地等效电阻同等下降或数值接近时, 即使已经超越报警界限, 装置也不动作; 正负极接地等效电阻数值都很大, 但差值较大时, 装置会误报警。交流信号注入法又称低频信号法, 采用定时在直流系统母线和大地之间注入低频交流信号, 根据交流电流信号的流向查找接地故障来实现接地监测。此种方法具有受直流系统分布电容影响大、易受相近频率的交流信号干扰等缺点, 检测精度和灵敏度都不太理想。直流漏电流检测法主要是通过检测直流系统支路对地直流不平衡电流, 选择接地故障所在支路来进行接地监测。它无需向直流系统注入低频交流信号, 因此不受直流系统分布电容的影响。但因漏电流较小, 难以测量, 严重限制了故障检测的精度和灵敏度的提高。

为克服现有检测仪器的不足, 笔者研制了新型接地电阻检测仪。对漏电流法和电桥法进行改进,

采用乒乓式变电桥检测原理, 实现了接地电阻的准确在线测量。

## 1 乒乓式变电桥检测原理

乒乓式变电桥检测的设计思想是: 通过切换电桥两臂电阻值的大小, 使电桥没有一个固定的平衡点。通过测量  $U_0$ 、 $U_1$ 、 $U_2$  的电压, 可以计算出直流系统对地的绝缘电阻。

### 1.1 直流系统接地故障等效电路

如图 1 所示,  $R_x$ 、 $R_y$  分别为母线正、负两端对地绝缘电阻, 即被测量;  $R$  为限流电阻, 阻值已知;  $R_1$ 、 $R_2$  为正、负两端采样电阻, 本装置采用数字电位器作为采样电阻, 其阻值在程序中可以求出。  $U_0$  为母线电压, 由蓄电池提供;  $U_1$ 、 $U_2$  为采样电压。由于蓄电池在充放电时电压会有微小变化, 浮动范围在  $\pm 10\%$  内, 故需要对母线电压进行检测。  $U_0$ 、 $U_1$  和  $U_2$  均可由后续采样网络测得。

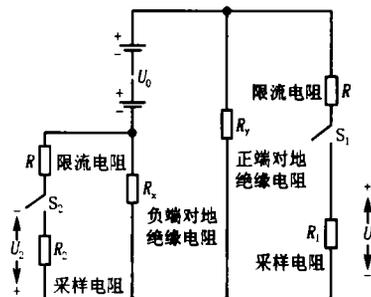


图 1 等效电路图

Fig 1 Equivalent circuit of system

### 1.2 公式推导

当  $S_1$  闭合,  $S_2$  断开时, 为状态一, 如图 2 所示:

由  $I_2 = U_1 / R_1$ ,  $U = I_2 (R + R_1)$ ,  $I = I_1 + I_2 = U / R_y + I_2$  和  $U_0 = U + I \times R_x$  得到:

$$U_0 = \frac{U_1}{R_1} (R + R_1) + R_x \times \left[ \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_1}{R_1 \times R_y} (R + R_1) \right] \quad (1)$$

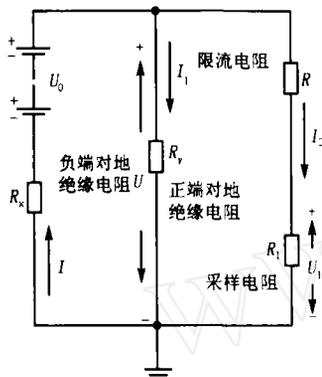


图 2 S<sub>1</sub>合 S<sub>2</sub>开 (状态一)

Fig 2 S<sub>1</sub> close and S<sub>2</sub> open (status 1)

当 S<sub>1</sub> 断开, S<sub>2</sub> 闭合时,为状态二,如图 3 所示。

由  $I_2 = U_2 / R_2$ ,  $U = I_2 (R + R_2)$ ,  $I = I_1 + I_2 = U / R_x + I_2$  和  $U_0 = U + I \times R_y$  得到:

$$U_0 = \frac{U_2}{R_2} (R + R_2) + R_y \times \left[ \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_2}{R_2 \times R_x} (R + R_2) \right] \quad (2)$$

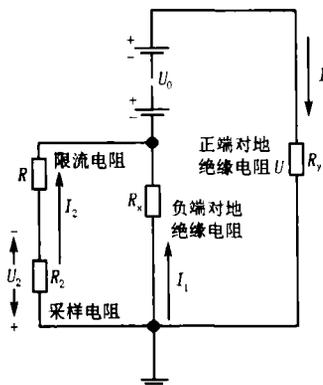


图 3 S<sub>1</sub>开 S<sub>2</sub>合 (状态二)

Fig 3 S<sub>1</sub> open and S<sub>2</sub> close (status 2)

联立式 (1)和式 (2),得到正负端对地绝缘电阻的阻值:

$$R_x = U_0 \times \frac{(U_0 - U_1 - U_2) \times R_1 R_2 - R \times (U_1 R_2 + U_2 R_1)}{U_0 U_1 R_2 - U_1 U_2 R_2 + U_1 U_2 R_1} \quad (3)$$

$$R_y = U_0 \times \frac{(U_0 - U_1 - U_2) \times R_1 R_2 - R \times (U_1 R_2 + U_2 R_1)}{U_0 U_2 R_1 - U_1 U_2 R_1 + U_1 U_2 R_2} \quad (4)$$

## 2 检测仪硬件设计

检测仪硬件原理框图如图 4 所示。它以 MCS - 51 单片机为主控单元, CPLD 为辅助控制单元。该系统用户接口完善,具有 3 × 3 键盘、图形点阵式液晶显示模块、RS - 485 通信接口、声光告警及故障输出。下面分别对主控芯片、采样放大电路、隔离电路以及 A/D 做一介绍。

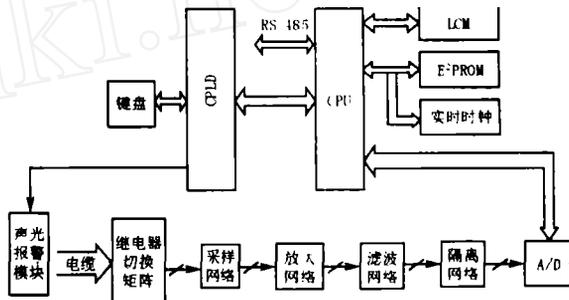


图 4 检测仪硬件原理框图

Fig 4 Hardware structure of measuring instrument

### 2.1 控制芯片

仪器选用 WNBOND 公司的 MCS - 51 单片机 W78E58B 作为主控芯片,负责计算接地阻值、读写 E<sup>2</sup> PROM、显示与通信。其指令同标准 8052 指令集完全兼容,内含的 32 K 字节的 ROM 和 512 字节的 RAM 使系统无需扩展程序存储区和数据存储区。

此外,选用了 ALTERA 公司的 CPLD——EPM7128SLC84 - 15 作为辅助控制器,实现地址分配和按键扫描,底层用 VHDL 语言,顶层用逻辑框图。当有键按下,CPLD 进行逐行扫描并读出相应的值,组合在一起得到键码值。CPLD 有一个管脚直接连到单片机的外部中断引脚,得到键码后,CPLD 给单片机一个信号,通知单片机去读取键码值。

### 2.2 采样放大电路

为得到幅值适中的模拟信号,仪器选用 Xicor 公司的数字电位器—X9C103 作为采样电阻,总阻值 10 K,包含 99 个电阻单元。在每个单元之间和二个端点都有可以被滑动单元访问的抽头,每个抽头间的阻值为 101。滑动端的位置可以被储存在一个非易失性存储器中,因而在下一次上电工作时可被重新调用,数据能够保持 100 年。使用中,由单片机控制滑动端,通过调节数字电位器的档位来改变其阻值。

经采样电阻得到的电压只有 70 mV 左右,因此在该检测仪中采用了高精度的仪表放大器—

NA128,其内部核心为三运放电路,有较高的共模抑制比,温度稳定性好,噪声系数小,只需配置一个外部电阻 $R_g$ ,即可实现从 $1\sim 10\ 000$ 的任一增益选择。电路中, $R_g=1\text{ K}$ ,小电压信号放大51倍后进入A/D转换器—MAX197,8通道模拟信号输入, $6\ \mu\text{s}$ 转换时间, $100\text{ kbps}$ 采样速率,可软件选择测量范围。

### 2.3 隔离电路

为了消除系统中模拟信号回路因共地引起的噪声干扰及其它原因引起的干扰信号,仪器采用了HP公司的高线性模拟光耦HCNR200隔离并传递模拟信号,如图5所示。HCNR200是一种由三个光电元件组成的器件, $0\sim 15\text{ V}$ 的输入输出电压范围,具有 $\pm 0.05\%$ 的最大线性误差和 $\pm 15\%$ 的最大传输增益偏差(1:1传输信号的情况下)。当一只HCNR200被制造出来后,其传输比 $K$ 就是一个恒定值,在 $1\pm 0.05$ 之间。本电路中,通过试验,测得 $K=1.061$ ,调节电位器 $R_6$ ,可使 $AOUT=A\text{ N}$ 。

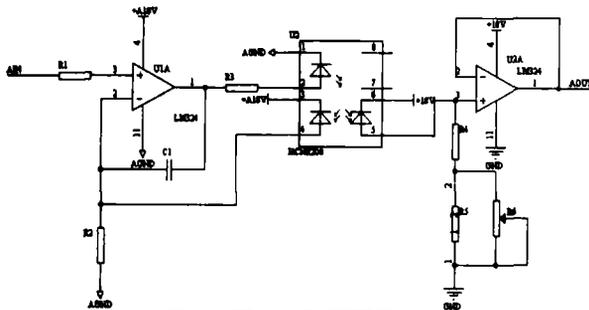


图5 隔离电路原理图

Fig 5 Principle of insulation circuit

## 3 检测仪软件设计

本系统主要完成的软件包括四大部分:监控主程序;按键响应子程序;显示子程序;通讯处理子程序。

这四部分的工作配合模式如下所述:启动装置电源,系统运行于监控主程序,采样并计算接地阻值,若绝缘不合格则报警,同时液晶处于运行菜单,实时显示接地阻值和时钟。若无按键和通讯请求,系统便一直工作于这种模式。当有按键按下时,系统响应按键中断,此时退出测量同时进入整定菜单,根据不同的按键做相应的处理;当上位机向本装置发出命令时,系统响应上位机的通信中断,根据通信协议上传信息。设定本系统的中断优先级从高到低依次为:与上位机的通信中断、按键中断。两个中断同时发生时,系统先响应通信中断,处理完该中断后再响应按键中断。系统主流程如图6所示,监控主

程序框图见图7。

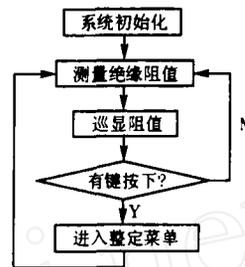


图6 系统主流程框图

Fig 6 Main flow chart of system

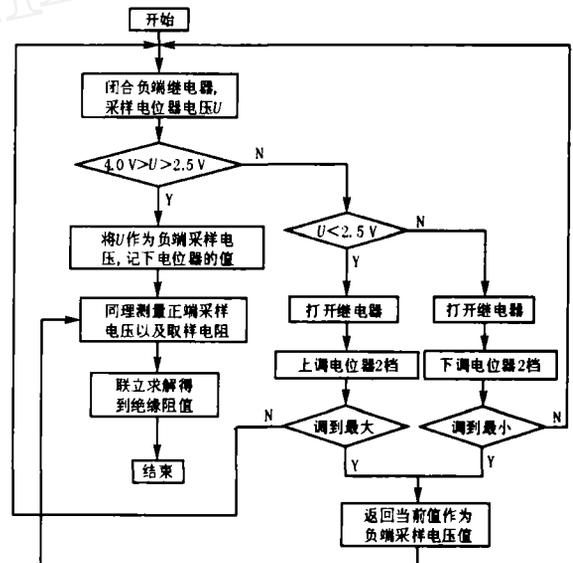


图7 监控主程序框图

Fig 7 Flow chart of monitoring & controlling system

## 4 系统测试

### 4.1 实验室数据

主要试验方法:在正、负端与地之间并接精密电阻,用来模拟绝缘电阻,再将仪器测得的阻值与实际阻值相比较即可。由于篇幅有限,仅给出由实验数据绘制成的图形。

图8(a)是在正负端与地之间分别并接 $2.3\text{ M}$ 和 $2.8\text{ M}$ 的电阻,图8(b)是在正负端与地之间分别并接 $750\text{ k}$ 和 $620\text{ k}$ 的电阻,横坐标表示测量次数,纵坐标为测量得到的阻值,单位 $\text{k}$ 。从图形中看出,每幅图中的数据波动小,说明仪器测量重复性好,其稳定性高。将精密电阻的标称值作为测量真值,分析其相对绝对误差,得到其精度误差在 $3\%$ 以内。

### 4.2 现场试验

试验时,直接将供电系统的正负母线引入装置,

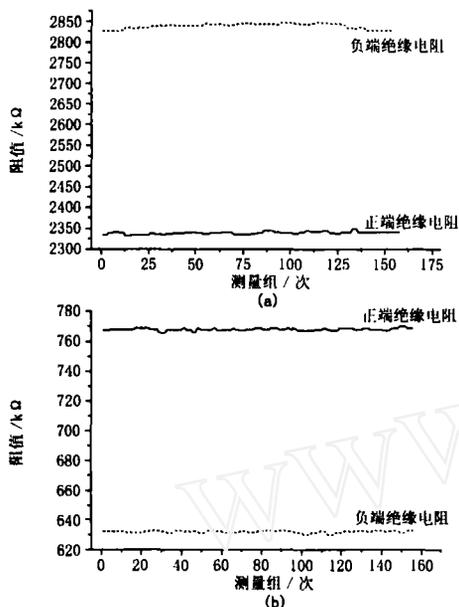


图 8 实验室数据示意图

Fig 8 Diagram of experimental data

将仪器的基准地外接大地。上电,进行测量,如图 9 所示。

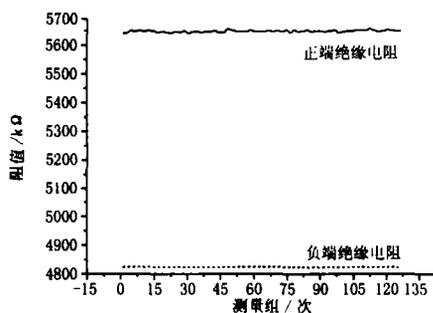


图 9 现场实验数据示意图

Fig 9 Diagram of spot data

由于绝缘电阻值是在线测量得到的,也即带电检测,所以不能用兆欧表来验证测量值是否正确。鉴于此,与实验室中试验方法类似,在正负母线端与地之间并接一些精密电阻,再进行测量,然后算出绝缘阻值,与直接测得的阻值相比较,以此来验证。

图 10是在母线正负端与地之间并接精密电阻后测得的绝缘阻值。图 10(a)是在正负端母线与地

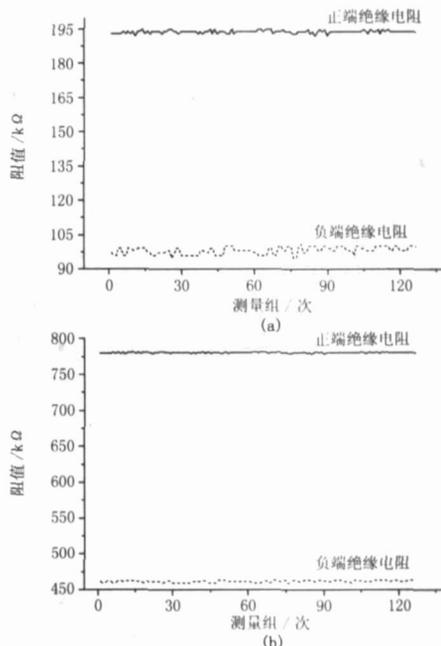


图 10 并接精密电阻后的绝缘阻值示意图

Fig 10 Diagram of insulating resistance paralleled to precision resistance

之间分别并接 200 k、100 k 精密电阻后测出的绝缘电阻示意图;图 10(b)是在正负端母线与地之间分别并接 910 k、510 k 精密电阻后测出的绝缘电阻的示意图;图 10(c)是在正负端母线与地之间均并接 680 k 精密电阻后测出的绝缘电阻的示意图。

现计算未并联精密电阻前的绝缘阻值。如表 1 所示,  $R_1$  为在母线和地之间并接的精密电阻的阻值,  $R_2$  是并接精密电阻后由装置测得的绝缘阻值,  $R$  是未并精密电阻前的绝缘阻值。由  $R_1 // R = R_2$  得

$$R = R_1 \times R_2 / (R_1 - R_2) \quad (5)$$

所以可由式 (5) 计算出原始状态下的绝缘电阻值  $R$ 。

与图 9 进行比较,可见装置测得的绝缘阻值比较准确,实际相对误差在  $\pm 5\%$  以内。

### 5 结论

根据上述设计思想开发研制的样机经实际测

表 1 并接电阻数据一览表

Tab 1 Schedule of all insulating resistance

正端并接电阻 $R_1$	负端并接电阻 $R_1$	测得正端绝缘电阻 $R_2$	测得负端绝缘电阻 $R_2$	未并电阻前正端电阻 $R$	未并电阻前负端电阻 $R$
200	100	193	98	5 514	4 900
910	510	780	462	5 460	4 909

试,其主要性能指标为:适用于 48 V、110 V、220 V 直流系统;接地电阻测量范围:范围 10 ~ 10 000 k,精度  $\pm 5\%$ ;电阻报警值设置:10 ~ 1 000 k;检测时间:小于 500 ms

该在线绝缘仪是一种自动化监测装置:它集检测、显示、记录于一体,无需在直流系统中注入任何信号,因此对直流系统无任何影响;能够抑制直流系统分布电容对检测结果的干扰;利用数字电位器和仪表放大器,实现宽范围测量;采用 WNBOND 公司的微控制器 W78E58B 作为主机,结合简洁的可编程逻辑器件,提高了装置性能和处理速度;采用带看门狗的 E<sup>2</sup>PROM,可记忆 255 组接地故障,装置掉电后信息不丢失;留有 RS485 对外通信接口,可实现远程监控;采用汉字液晶显示和触摸式按键,直观明了,操作简单,使用户能够在无需说明书的情况下熟练使用本装置。现场运行表明,该仪器具有在线测量速度快、测量精度高、可靠性高、人机界面友好等显著优点。

#### 参考文献:

[1] 白忠敏,於崇干,刘百震. 电力工程直流系统设计手册

[M]. 北京:中国电力出版社,1999.

BAI Zhong-min, YU Chong-gan, LU Bai-zhen Design Manual of DC Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.

[2] 施慧,贾秀芳. 对现有检测直流系统接地故障几种方法的比较 [J]. 东北电力技术,1999,(9):48-50.

SHI Hui, JIA Xiu-fang The Comparison of Present Several Methods for Detecting the Grounding Faults of DC System [J]. Northeast Electric Power Technology, 1999, (9): 48-50.

[3] 贾秀芳,赵成勇. 直流系统绝缘监测综合判据 [J]. 电力系统自动化,1999,23(16):47-49.

JIA Xiu-fang, ZHAO Cheng-yong Synthesized Criteria of DC System Insulation Monitoring [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (16): 47-49.

收稿日期: 2006-03-21; 修回日期: 2006-07-10

作者简介:

杨波(1977-),男,硕士,工程师,主要从事电厂自动化设备的开发和研究工作;E-mail: cblueocean@163.com

张宝生(1982-),女,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力拖动。

### Research and realization of online insulating resistance measuring instrument in DC system

YANG Bo<sup>1</sup>, ZHANG Bao-sheng<sup>2</sup>

(1. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** After comparing and analyzing several conventional insulating resistance measuring methods, their shortcomings are pointed out. A new kind of insulating resistance measuring instrument in DC system is presented, integrating of the functions resistance measuring, displaying and recording. The instrument takes MSC51 as kernel and CPLD as accessory controlling unit, adopts Ping-Pong variable bridge method, and accomplishes online measuring insulating resistance exactly. Its principle, hardware and software design are introduced in detail. The practical operation shows that the instrument has the advantages of high precision, better anti-interference and low price.

**Key words:** DC system; online measurement; insulating resistance; Ping-Pong method

(上接第 41 页 continued from page 41)

**Abstract:** It is necessary for power supply company to increase reliability investment cost in order to improve power supply reliability of distributed network and decrease consumer unserved energy cost on distribution network planning, however, if the power company blindly pursuit power supply reliability, it certainly results in sharp increase of reliability investment cost. In order to pursuit the balance between power supply reliability and reliability cost, this paper considers reliability cost and unserved energy cost, and introduces reliability cost-benefit regressive model with which the company can decides optimum reliability scheme in numerous power distribution network planning schemes. It is convenient and efficient that the model and method can decide best reliability scheme on power distribution network planning with the example.

This project is supported by Shanghai Leading Academic Discipline Project (No. P1301).

**Key words:** reliability cost; unserved energy cost; power network planning; cost-benefit; optimum reliability