

一种应用于交流 IT 系统的高精度绝缘监测仪设计

周赞强¹ 沈标² 李平³

(1.中国联合工程公司, 浙江 杭州 310052)

(2.安科瑞电气股份有限公司, 上海 嘉定 201801)

(3.安科瑞电气股份有限公司, 上海 嘉定 201801)

摘要: IT 系统配电方式应用在一些重要场所(如矿井、玻璃厂和集会场所的安全照明等),在这些场所,因意外导致的断电将会造成惨重的人员伤亡和财产损失。装设绝缘监测装置可以解决由于系统对地绝缘性能降低导致断电的问题。介绍了一种用于工业 IT 系统的绝缘监测仪(IMD),并详述了绝缘监测仪的硬件和软件设计原理。目前该绝缘监测仪已通过试验验证,并在市场上大量销售,为工业 IT 配电系统提供了可靠的绝缘监测。

关键词: 交流 IT 系统 绝缘监测装置 高压 IT 配电系统

引言

在一些重要的工业场所(如:矿井、玻璃厂和某些集会场所的安全照明,某些电炉的试验设备,冶金厂和化工厂等),意外断电会造成人员伤亡和重大的财产损失,因此需采用安全性和可靠性较高的 IT 系统供电。在 IT 系统中,随着时间的推移,系统对地的绝缘程度下降,当出现第一点接地故障时,IT 系统仍能正常运行,但此时 IT 系统已存在安全隐患,如果再出现不同相上的第二点接地故障,将会产生很大的短路电流,造成前端的断路器脱扣,致使系统出现断电事故。根据(JGJ 16-2008)《民用建筑电器设计规范》第 7.2.3 条规定,IT 配电系统必须配备绝缘监视仪。在系统出现第一点接地故障时,装置产生警告或报警信息,及时提醒维修人员对系统进行故障排查,短时间内无需跳闸,从而保证了 IT 系统供电的可靠性和连续性。

国外对电力系统监测与故障诊断技术的研究始于 20 世纪 60 年代,各个发达国家都很重视,但到了 20 世纪七八十年代,随着传感器技术、信号采集技术、数字分析技术和计算机技术的发展与应用,在线诊断技术才得到迅速发展。传统的测量方法有平衡电桥法、差流检测法以及 555 定时器测量电阻法等。这些测量方法都有各自的优

势，但由于应用场所的不同以及受现场环境的影响，上述测量方式还存在着可靠性不足、测量范围较窄和测量精度不高等缺点。针对这些问题，本文提出一种基于交流 IT 的绝缘监视装置的设计：硬件上采用 STM32 内置的 12 位 A-D 采样、四阶低通滤波电路和 128x32 液晶显示，软件上采用软件滤波和最小二乘法求斜率与偏移量。最大限度的提高了测量精度（3%）、测量范围（0—999K），并且在不同环境都能满足精准监测的需求。

绝缘监测仪工作原理

绝缘监测仪的工作原理如图 1 所示：

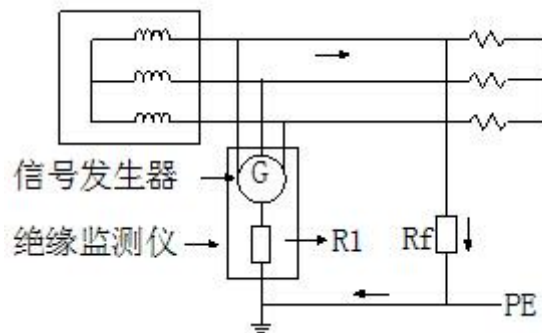


图 1：绝缘监测仪工作原理

图中 R_1 为分压电阻， R_f 是绝缘监测仪监测的对象——系统对地电阻，电源端的带电导体不接地，只作设备外壳的保护接地。正常情况下，系统与地是绝缘的，此时 R_f 等效于无穷大；当系统出现绝缘故障时，如系统导线与外壳直接接触，则导致系统与地直接连接，此时的 R_f 等效于 0。绝缘监测仪向系统注入直流信号，经过 R_f 进入绝缘监测仪，构成一个闭合回路，通过简单的欧姆定律即可算出 R_f 的大小。该测量原理简单可靠，适用于不含直流分量的 IT 系统，又因采用直流信号可以有效地避免系统电容造成的影响，使其测量的阻抗具有较高的准确度，可以很好地反映系统的绝缘性能。

硬件设计

本设计中，中央处理模块选用 ST 公司生产的 32 位 ARM cortex-M3 内核的芯片（STM32F103RBT6），该芯片处理速度快，主频可达 72MHz，并且具有丰富的片内外围资源，内部具有 20KB 的片内 SRAM 和多达 64KB 的 FLASH 闪存，带有多通道的 12 位 A-D 转化模块，以及多个 SPI、IIC、CAN 等通讯接口，大大简化了外围电路的设计。

该仪表除了最基本的测量系统对地电阻外，自带两路继电器输出，采用 128x32 液晶模块作为人机接口，带有 RS 485 通讯，遵循 Modbus-RTU 协议，有预警报警功能，各个参数可以自行设定。

本装置硬件功能模块主要包括电源模块、信号注入模块、信号测量模块、人机接口、铁电存储模块、通讯模块和开关量输出模块等组成。硬件框图如图 2 所示：

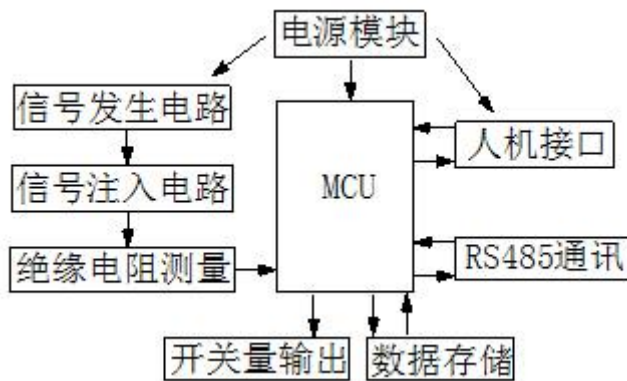


图 2：绝缘监测仪硬件模块设计

1 信号测量电路

在交流 IT 系统中，具有不同电压等级，如 400V 和 760V（更高电压等级的需要配合高压耦合器使用）。因此绝缘监测仪内部需要具有满足这些不同电压等级的降压电路。绝缘监测仪上电之后，信号注入模块会持续注入一个特定的直流电压到被监测系统中，系统测量的是 R_1 、 R_2 、 R_f 的和，由于 R_1 、 R_2 的值是已知的，所以只要减去 R_1 、 R_2 ，即可求出 R_f 。测量电路如图 3 所示：

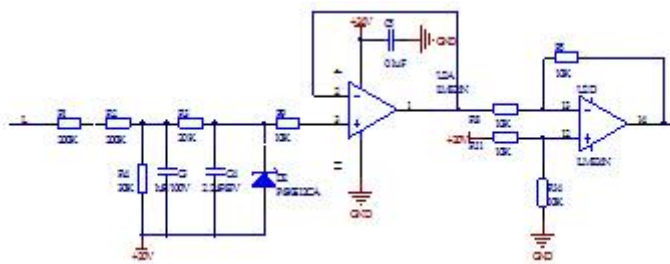


图 3. 信号测量电路

2 滤波放大电路

在实际的电力系统中，由于高频信号的存在，可能会对信号采样造成干扰，所以要对采样信号进行滤波处理，该设计采用四阶低通滤波电路，电路截止特性好，曲线的衰减率陡，同时提高了测量准确度，滤波电路如图 4 所示：

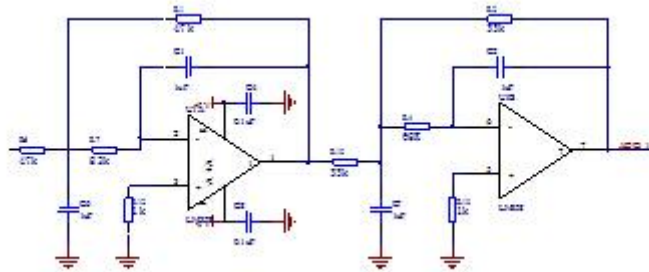


图 4：四阶低通滤波电路

由于此电路由两个相同二阶电路组成，因此只需分析一个即可。对第一个二阶电路：当频率 $f=0$ 时， $C1$ 和 $C6$ 均开路，通带放大倍数

$$\dot{A}_{up} = -\frac{R_1}{R_6} \quad (1)$$

设 $R6$ 、 $C6$ 和 $R7$ 相交的点为 M ，输入电压信号为 U_i ，输出电压信号为 U_o 。根据放大器虚短虚断，对 M 点列电流方程：

$$\frac{U_i(s) - U_m(s)}{R_6} = \frac{U_m(s) - U_o(s)}{R_1} + \frac{U_m(s)}{R_7} + U_m(s) \cdot sC_6 \quad (2)$$

其中

$$U_o(s) = -\frac{1}{sR_7C_1} \cdot U_m(s) \quad (3)$$

解上面两个方程可得：

$$A_u(s) = \frac{A_{up}(s)}{1 + sC_1R_7R_7\left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_1}\right) + s^2C_1C_6R_7R_7} \quad (4)$$

对比压控电压源二阶低通滤波电路模型可得：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1C_6R_1R_7}} \quad (5)$$

式中， f_0 表示截止频率，代入数据得 $f_0 \approx 2.567\text{Hz}$ ，该滤波器允许频率低于 f_0 的波形通过，大于该频率的波形将会不同程度的衰减。

下面针对该电路进行仿真。输入是一个杂波，其输入含有直流信号，高频信号。其波形如图 5 所示：

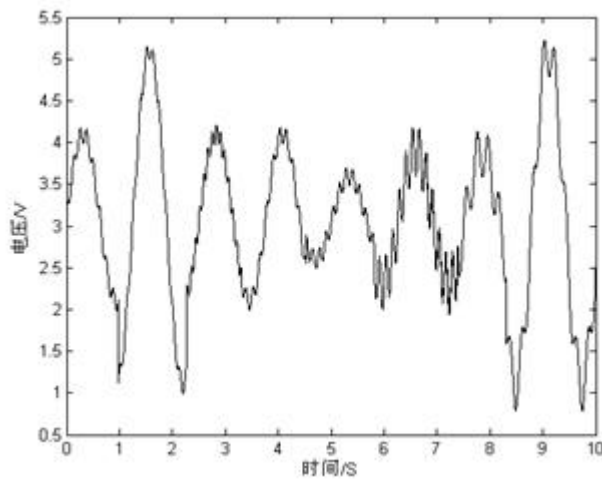


图 5：输入波形

从图 5 可以看出，除了我们注入的直流波形外，还有一些高频杂波信号，经过滤波电路之后，波形如图 6 所示：

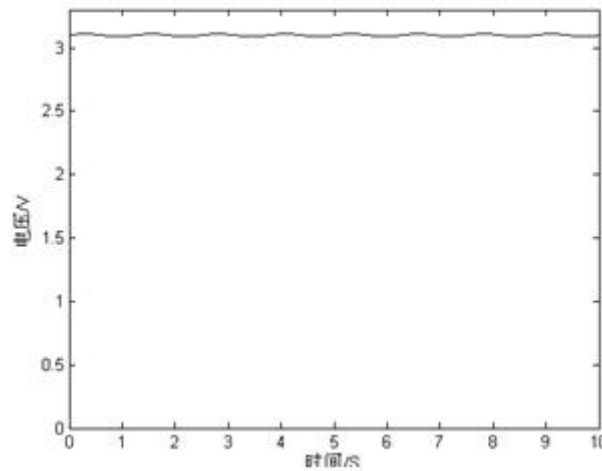


图 6：滤波之后的波形

对比图 5 和图 6，高频杂波信号被滤除，滤波效果良好达到试验预期要求。

2.3 自检电路

根据 IEC61557-8《交流 1000V 和直流 1500V 以下低压配电系统中的电气安全防护措施的试验、测量和监控设备》第 8 部分:IT 系统中绝缘监控装置第 4.2 规定，绝缘监视装置应包括一个测试装置或装有测试装置连接器，以测试该绝缘监控装置是否能完成其功能。

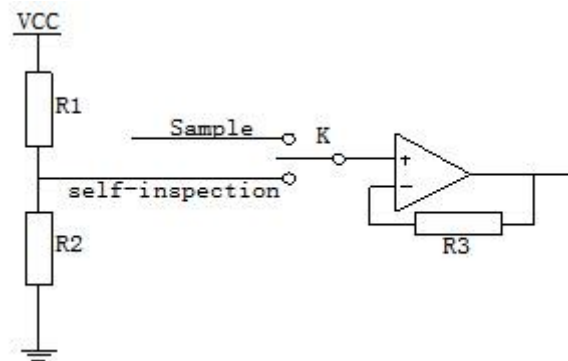


图 7：最小二乘法进行线性拟合示意

针对这个要求，在仪表内部设计了自检电路，且内置了高精度电阻 R2。如图 7 所示。当启动自检时，继电器动作，在测试电路中取样信号 Sample 和 self-inspection 之间作了切换。自检的目的是为了模拟正常的信号，测试装置是否能测量出内置电阻阻值，并且发出自检正常信息。

软件设计

绝缘监测仪采用结构化程序设计思想，采用 C 语言进行编写。装置在上电时对内部时钟和所需要的外设进行初始化，然后开始读取存储在铁电中出厂调试的校准参数，校准系数存放在铁电存储器中，无须担心掉电导致数据丢失。当装置自检了所有电路时，开始进入正常的监控模式。程序流程图如图 8 所示：

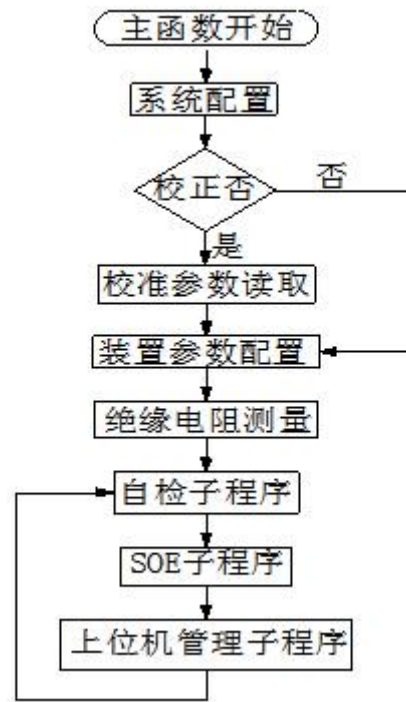


图 8：软件处理流程图

1.最小二乘法进行线性拟合

理想情况下，绝缘监测装置在整个测量范围内都应该是线性的，但由于电路内部元器件参数的差异，电阻测量值可能成曲线分布，此时需要用最小二乘法找出某个范围内最接近校准点的直线。最小二乘法线性拟合示意图如图 9 所示：

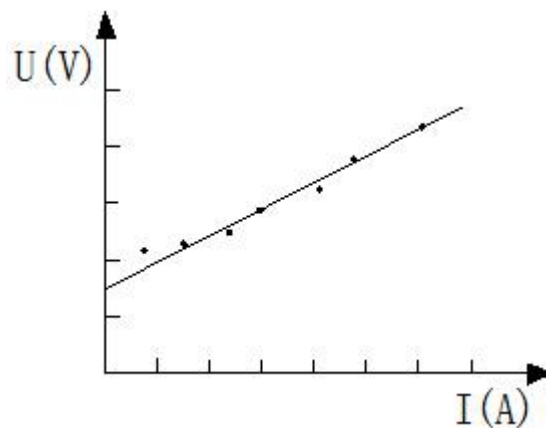


图 9：最小二乘法进行线性拟合示意

若已知： $y = ax + b$ ，则方程为

$$\begin{bmatrix} m & \sum_{i=1}^m x_i \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i \end{bmatrix}$$

把坐标值代入，求得系数 a 和 b，并将系数保存起来，当求另一点纵坐标时，只需代入各参数即可。对于此监测仪，图中各点代表各校准点，代入数据即可求得斜率与 0 偏移量。传统方式多是求关于两点的斜率和偏移值，这样测量精度就比较低。具体对比如图 10 所示：

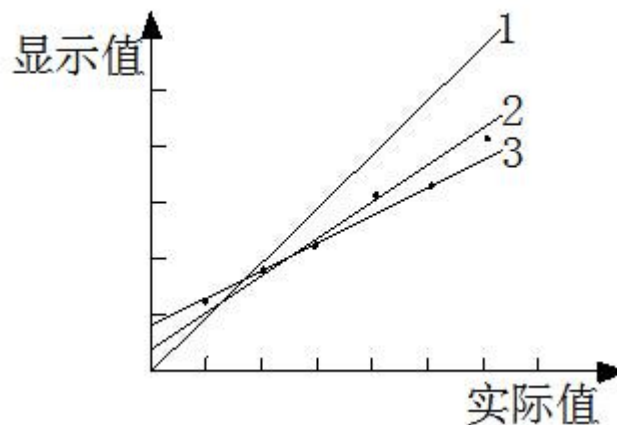


图 10：示意图

1-理想仪表曲线 2-本文介绍仪表线性曲线 3-某市售仪表线性曲线

由图 9 可以看出，该仪表所采用的最小二乘法所得出的线性曲线更接近于理想曲线。

2.数字滤波算法

在工业 IT 配电系统中，多数用电设备会产生很多的干扰信号，因此装置需要滤除信号中的噪声干扰，让需要的信号参与结果运算。绝缘监测仪在采集了数据之后，通过内部数字滤波算法滤除掉噪声干扰，再计算出绝缘电阻的大小。在此采用中位值平均滤波法，其基本过程是：首先对数据进行由大到小排序（冒泡法），去掉最小和最大的几个值，保留中间的那些值（中位值滤波法）。如此进行几次运算，取这几次的平均值即可。（平均值滤波法）

试验结果

绝缘监测仪已通过相关的型式试验，包括电气性能试验和电磁兼容（EMC）试验。性能参数皆超过国际标准要求。在 60℃ 的温度下，绝缘监测仪测得的数据与标准的阻值、某市售仪表的对比如下表所示。

表 60℃ (空气湿度 95%) 对比

标准电阻 值 (K)	测量值 (555 定时器测量 电阻法)	测量值 (高 精度仪表显 示值)
10	7	9
100	87	98
200	179	197
450	416	441
650	603	636
810	783	801
999	956	983

根据 IEC61557-8《交流 1000V 和直流 1500V 以下低压配电系统中的电气安全防护措施的试验、测量和监控设备》第 8 部分:IT 系统中绝缘监控装置第 4.6 表 1 规定,相对不确定度必须在 $\pm 15\%$ 以内。由上表可是,555 定时器法测量误差波动范围比较大,高准确度仪表显示误差均保持在 3%以内,测量精度明显高于该仪表,因而在不同环境中的使用效果更为稳定、可靠。

结束语

由于 IT 系统的安全性和供电连续性好,所以在国内有良好的发展前景,其安全性和连续性都是建立在实时对其监测的基础上。然而市售的绝缘监测仪表种类少,测量范围窄,在不同环境下的测量精度不一致。针对这种情况,设计了高精度的绝缘监测仪。该仪表采用的软硬件测量和处理方式综合性能较高,测量范围广(0-999K),测量精度高(-20-65℃空气湿度 95%的条件下精度均能控制在 3%范围内),这是传统仪表所不具备的。

文章来源:《电气应用》2015 年 8 期。

参考文献

- [1] 王厚余.论 it 系统的应用.中国航空工业规划设计研究院(北京).
- [2] JGJ 16-2008 民用建筑电气设计规范[S].
- [3] 刘国平.船舶电气与通信.第一版.北京:海洋出版社,2004.

- [4] 黄盛洁, 姚文捷, 等. 电气设备绝缘在线监测与状态维修. 第一版. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [5] 华成英, 童诗白. 模拟电子基础. 第四版. 高等教育出版社, 2006.
- [6] 何静等. 基于单片机和 555 定时器的电阻测量电路的设计. 电子工程师, 2008 (2) .
- [7] IEC 61557-8 Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1000V a.c. and 1500V d.c. Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures – Part 8: Insulation monitoring devices for IT systems