

# 一种应用于交直流不接地系统绝缘监测装置的设计与开发

赵雪莲<sup>1</sup> 沈标<sup>2</sup>

(1.青海三佳工程设计咨询有限公司, 青海 810000)

(2.安科瑞电气股份有限公司, 上海 嘉定 201801)

**摘要:** 介绍了一种用于工业不接地系统的绝缘监测装置(IMD), 针对现有技术的不足, 提供了一种新的硬件平台, 可监测 400V 等级的交直流不接地系统, 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, 为工业不接地配电系统提供了可靠的绝缘监测。

**关键词:** 交直流不接地系统 绝缘监测装置 自适应 IMD

## 0.前言

在一些对供电连续性要求较高的场所(如:矿井、化工厂、玻璃厂、冶金厂、某些集会场所的安全照明和某些电炉的试验设备等), 设备故障断电会带来巨大的损失, 因此采用不接地系统可以有效减少断电发生的频率, 这是由于在不接地系统第一次出现接地故障时, 系统还能够继续使用, 不会出现断电的状况, 如果第一次接地故障是人为导致, 则对人体基本没有太大的伤害, 但此时系统已经存在安全隐患, 如果不及时排除故障, 当再次出现异相接地故障时, 系统就有可能断电, 从而造成严重后果。安装绝缘监测装置, 可以实时显示系统对地绝缘电阻, 在系统第一次出现绝缘故障时, 发出报警信号, 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<sup>[1]</sup>。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<sup>[2]</sup>。国外对此也很重视, 在上世纪六十年代, 各个发达国家已经开始对电力系统的研究, 但是其快速发展是在上世纪七十至八十年代。这十年间, 数字电路的集成、计算机的迅速发展、各类传感器的出现推动了电子测量领域的发展。目前国内一些厂家愈发重视对绝缘监测产品的研究, 主流的测量方式有直流信号注入法、交流信号注入法、平衡桥测量法等等。以上测量方式有各自的优势, 但由于应用场所环境的差别(泄露电容、直流信号的存在等等)较大, 可能存在着测量范围较窄、测量精度不高、系统中允许泄露电容较低、测量

周期长、只能用于交流系统等缺点。本文提出一种新型绝缘监测装置的设计原理，该装置采用自适应系统频率的方法，有绝缘电阻测量范围广，允许系统泄露电容大，响应快，测量周期短等优势。

### 1.绝缘监测装置原理概述

图 1 所示为测量电路简图：

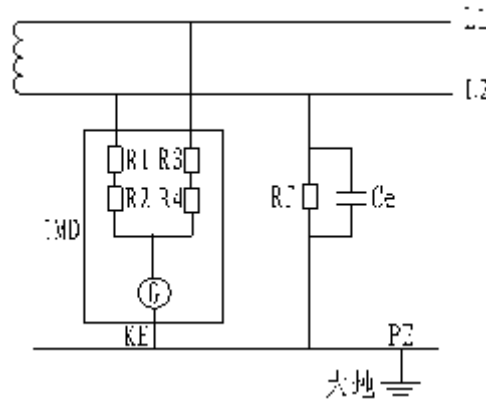


图 1：绝缘监测装置原理简图

图 1 中  $R_1$  和  $R_3$  是阻值相等的耦合电阻， $R_2$  和  $R_4$  是阻值相等的采样电阻， $R_f$  是系统对地电阻， $C_e$  为系统泄露电容， $G$  为信号发生器。电源端的带电导体不接地，只作设备外壳的保护接地。绝缘监测仪通过  $G$  向系统注入  $+20V$  和  $-20V$  脉冲信号，经过  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  返回到绝缘监测仪，构成一个闭合回路，对  $R_2$  和  $R_4$  电压进行信号处理、采集，即可算出系统对地电阻和系统泄露电容。

### 2.硬件设计

本装置硬件电路主要包括中央处理器模块、断线监测模块、信号注入模块等。中央处理器选用 ARM cortex-M3 内核的单片机，该芯片主频高，外设丰富，大大简化了外围电路的设计。

下面对硬件电路进行讨论：

#### 2.1 信号控制电路

CPU 通过控制模拟开关决定信号的输出。其中  $+2.5v$  信号来源于基准芯片， $-2.5v$  经  $+2.5v$  进行反相后得到，随后进入信号发生电路。

## 2.2 信号发生电路

信号控制电路中所述的+2.5v 或-2.5v 信号经过高压运放放大后产生+20v 或-20v 脉冲信号，即为注入不接地系统的信号。

## 2.3 信号检测电路

信号发生电路中的±20v 信号通过图 1 中耦合电阻和系统对地绝缘电阻后构成回路，通过检测两个采样电阻的信号来计算系统绝缘电阻；通过检测 PE 上的信号电压，判断 PE/KE 是否断线；在装置运行过程中，对系统类型进行实时检测，根据系统是否存在直流分量选择适当的测量方法。

### 2.3.1 交流系统或离线状态

信号从采样电阻流经截止频率小于 10Hz 的低通滤波电路。当系统是交流系统或处于离线状态时，由于存在的干扰信号主要来源于不接地系统的 50Hz 信号，而该频率远大于该滤波器的截止频率（小于 10Hz），则干扰信号将会衰减到可忽略的幅度，而后通过信号处理电路分别对两路信号进行相加、放大、抬升，最终被单片机 ADC 采样。

滤波效果可参考仿真结果。本电路在 PSPICE 中进行仿真，在 L1 和 L2 之间加 300V（频率 50Hz）电压（模拟不接地系统），信号经过四阶低通滤波电路前后的效果对比如图 2 所示。图 2 中波形是注入的±20v 与 300v 系统电压叠加后的结果，可以看出，300v 电压对采样电阻上的信号电压影响很大。参照图 2 的下图可知，经过低通滤波电路以后，300v（频率 50Hz）的信号衰减到可以忽略的幅度。

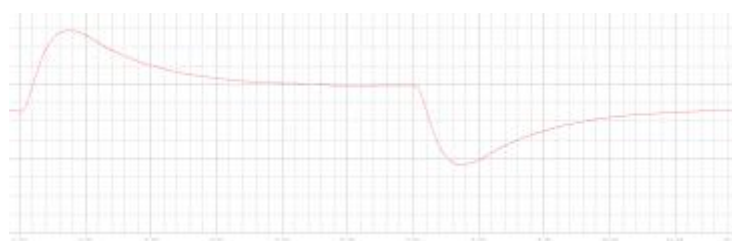


图 2. 滤波前后信号对比

图 2 中两段信号分别是+20V 和-20V 交叉变换的结果，由于系统存在泄露电容，波形呈现一个缓慢充放电的曲线，这个过程也是采样电阻分压趋于稳定的过程。而分压电阻上的最终电压只跟系统电压和其所占比例有关，跟电容无关，故电阻的测量与波形正负半周稳定后的电压有关，下面简要陈述计算过程：

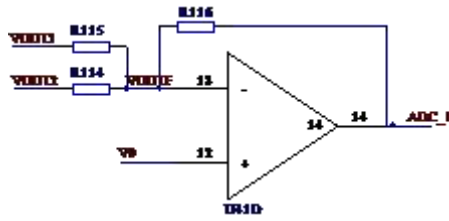


图 3. 两路信号合成

设图 3 中 “ADC\_R”（采样电压）稳定后电压是 V1，此时的 “VOUTF” 处电 V2，“VOUT1” 和 “VOUT2” 电压 V3，则在 +20v 时，有：

$$\frac{V2 - V1}{R116} = \frac{V3 - V2}{R114} + \frac{V3 - V2}{R115} \quad ①$$

V1 和 V2（抬升电压）已知，可以求出 V3。设采样电阻电压为 V4，由于从 V4 到 V3 只有低通滤波电路和一个信号抬升电压 V6，低通滤波电路对信号幅度影响很小，则：

$$V4 = V3 + V6 \quad ②$$

V4 也是图 1 中 R2 和 R4 的分压，设电源电压 V5，则：

$$V5 * \frac{R2}{(R1 + R2) // (R3 + R4) + Rf} = V4 \quad ③$$

联立①、②、③式，即可求出绝缘电阻 Rf。

电容的计算则依赖于电阻的大小和波形的曲线。假设电压在关于时间 t 的波形上存在两个点 M1 和 M2，对应的坐标是 (V1, t1)，(V2, t2) 根据电容充电公式：

$$Vt = E * e^{-\frac{t}{RC}}$$

对应 M1 和 M2：

$$V2 = E * e^{-\frac{t2}{RC}}$$

处理后有：

$$C = \frac{t2 - t1}{R * \ln \frac{V1}{V2}}$$

在实际计算的过程中，可以多次取点计算，求平均值，提高测量精度。

在 -20v 时，绝缘电阻 Rf 和泄露电容计算方式与此类似。

### 2.3.2 系统存在直流分量

当系统存在直流分量时，仍然需要四阶滤波电路滤除系统交流信号（此时直流信号仍然存在），之后经过一个

如图 4 所示的信号保持电路：

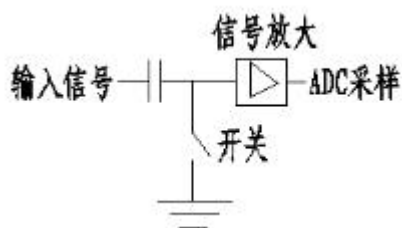


图 4. 信号保持电路

输入信号分为正、负半周信号，但两者均含有系统中的直流分量，通过开关的断开与闭合，可以实现正负半周信号相减，由于系统的直流电压幅度变化很小，相减后的信号中不再含有直流分量，此时的采样信号中只是 $\pm 20V$ 电压作用在采样电阻的结果，最后信号经过放大，进入单片机 ADC 采样模块。进入 ADC 采样的波形可以参照 PSPICE 仿真结果如图 5：

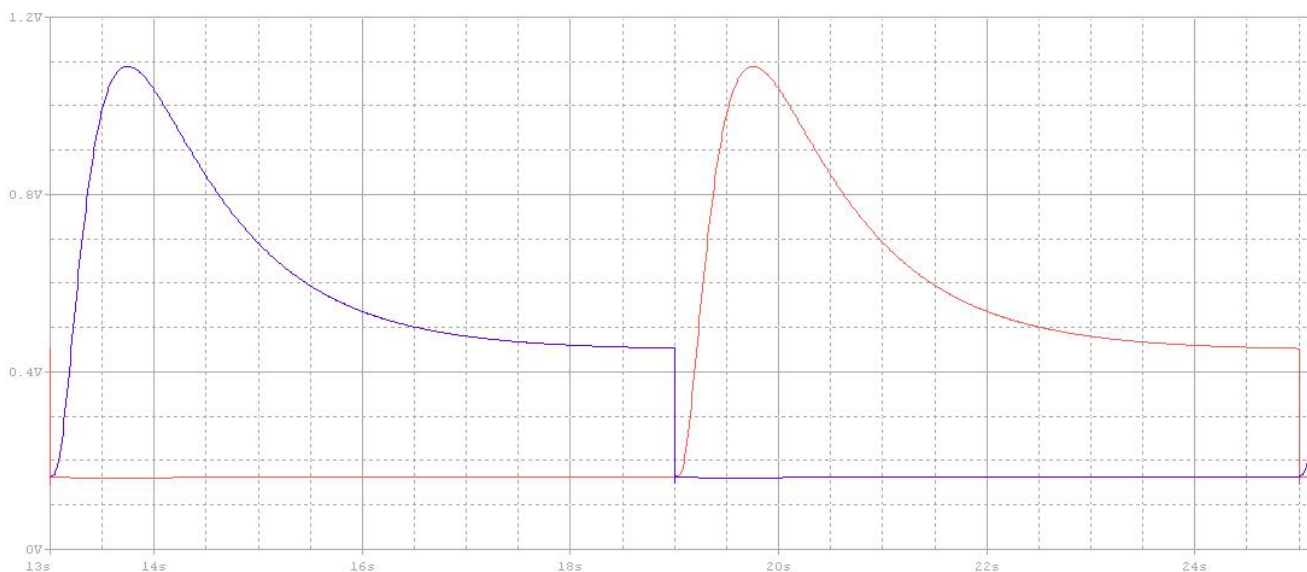


图 5. 两路独立信号波形

无论是在 + 20v，还是-20v，系统都能独立监测绝缘状况，如此，测量周期至少比固定周期产品测量周期小一半。直流系统中电阻的计算同交流系统所述一样，电阻的大小取决于波形稳定后的电压值，电容的计算仍然依赖于电阻，计算方法类似于通过 ADC 采样信号可以反推出在+20V 和-20V 时图 1 中 R2 和 R4 的分压，即可求出绝缘电阻值与泄露电容值。

## 2.4 仪表其它电路

除了上述电路外，还有断线检测电路（PE/KE 断线、L1/L2 断线检测功能）、485 通讯电路、其他通讯电路等等。

## 3.软件设计

### 3.1 软件流程

该绝缘监测装置采用结构化程序设计思想，采用 C 语言进行编写。主函数通过查询标志位的状态，决定是否执行对应的模块，各个模块的标志位在定时器内改变。这种方式提高了软件的实时性，后期的软件维护相对来说也比较方便。

### 3.2 自适应频率

目前市场上同行产品多数采用向系统注入固定周期信号的方法，这种方式必须考虑系统最大电阻及电容，测量周期必须满足最大电阻和最大电容的要求，因此这时的周期也是最长的，且不能改变。自适应频率是一种新型的周期调节的方式，通过监测系统信号波形来调整周期大小。在信号波形上取两个点的电压信号，当信号电压变化很小时，视为稳定，这时翻转脉冲信号，并保存该周期运行的时间作为下一次脉冲的周期。由于在正负半周都会对波形监测和计算，所以信号波形的调整会很及时，电阻的计算结果更新的相对也比较快。此外，一旦电阻和电容测量结果稳定，系统会计算理论周期，并与实际测量周期作对比，然后把理论测量周期赋值给下一次脉冲周期。该方式保证了在测量结果精度达标的前提下，测量周期能够达到最短。

### 3.3 响应时间

IEC61557-8 第 8 部分“IT 系统中绝缘监控装置”中第 4.6 表 1 规定，在纯交流系统中，当泄漏电容 1 $\mu$ F、绝缘电阻为 0.5 倍报警值时，响应时间应小于 10s。在测量精度达标的前提下，本装置响应速度能小于 6s。下面就电阻突变对波形的影响作简要分析，详见图 6：

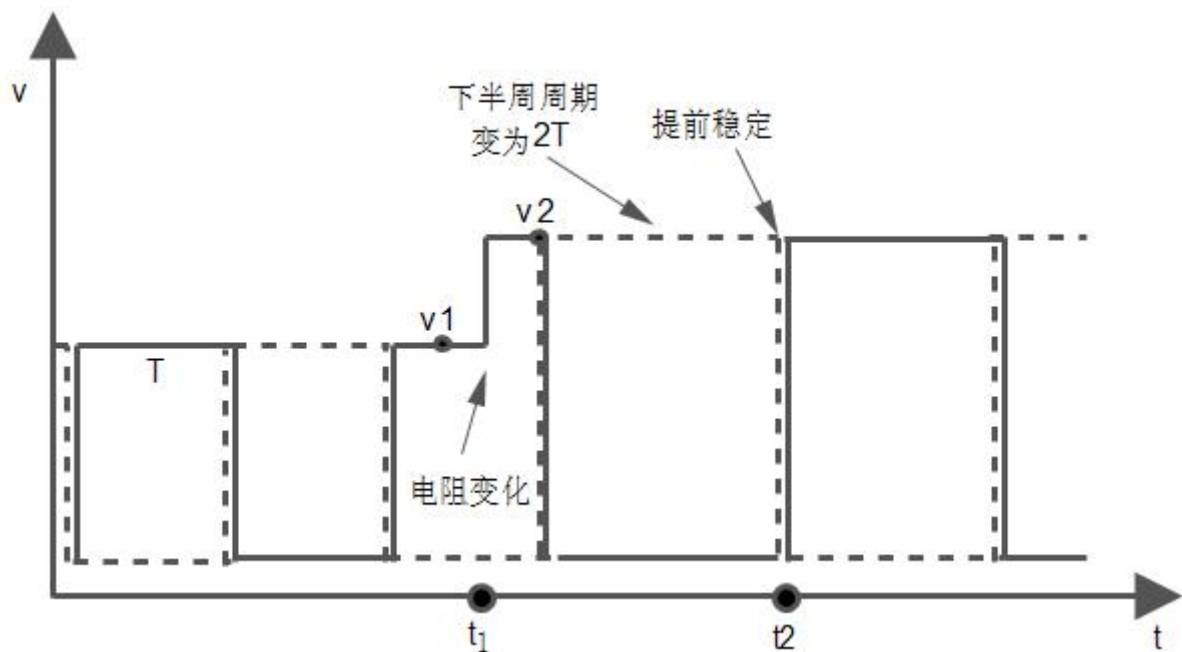


图 6. 故障模拟波形图

实线：波形一 虚线：波形二

$t_1$  之前系统周期已经稳定，假设在  $t_1$  时刻（电压  $V_1$ ）电阻突然减小到报警值以下，波形发生变化，当到达采样时刻  $t_2$  时，测得此时电压  $V_2$ ，CPU 判断两者之差大于设定的值，下半周周期加倍，变为  $2T$ （之前为  $T$ ），由于电容很小，系统会在  $2T$  时间运行结束之前提前稳定。虽然系统会在周期完成之前提前结束，但响应时间会增大，如果取一个完整的正负周期的信号作报警响应的依据，则大大增加了响应时间。为了解决这个问题，系统在半周结束之后计算电阻值（独立信号），如果该电阻值小于设定的报警值，则发出报警信号，响应值即为图 6 中的  $t_2 \sim t_1$ ，经实际测试，响应时间基本维持在 5s 以内，最长不超过 6 秒。

### 3.4 软件其它描述

软件校准采用线性分段式校准法，共 8 个校准点，保证了仪表的精度；为了滤除信号中的噪声干扰，数字滤波依次采用冒泡法（对数据排序）、中位值滤波法、平均值滤波法对数据进行处理，保证了信号的可靠性和稳定性。

## 4. 试验结果

该产品已通过许昌开普检验中心的型式试验，功能和性能均满足国际标准要求。经试验验证，该仪表在电阻 1K-5M、电容 0-150uF 的条件下，显示值与实际值的比值均保持在 10%以内，测量精度达标，能满足各种环境中不接地系统绝缘监测的需求。

## 5. 结语

本文介绍了一种新型绝缘监测装置，与市场绝缘监测仪表相比，其优势在于可监测直流不接地系统、允许系统泄露电容大、测量周期短、响应时间短等。经过试验，本文介绍的绝缘监测装置在交流、直流不接地系统均可可靠工作，可以为不接地系统提供一种可靠的监测。

文章来源：《智能建筑电气技术》2016 年 3 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] 王巍，王金全，杨涛，等.低压 IT 系统几个关键问题探讨[J].建筑电气，2011（11）：47-50.
- [5] 马涛，王金全，金伟一，等.三相四线制 IT 系统绝缘监测技术方案研究[J].船电技术.2008（5）：277-280.
- [6] IEC 61557-8Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1000Va.c.and1500V d.c. - Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures – Part8:Insulation monitoring devices for IT systems