[绝缘监测]

一种多功能绝缘监测仪的开发

文/山西省医药规划设计院　盖琪彦
安科瑞电气股份有限公司　沈　标

简述了一种用于交直流不接地系统的绝缘监测仪的设计，针对其他绝缘监测类产品响应速度慢、测量范围低、适用系统有限、允许系统泄漏电容小、功能单一的缺点，提出了一种新型多功能绝缘监测仪的设计。目前该绝缘监测仪已通过试验验证，并在市场上销售，为工业不接地系统提供了可靠的绝缘监测。

在一些对用电连续性要求较高的工业场所，意外断电可能会导致人员伤亡和重大经济损失的严重后果，所以在这些场所大多采用不接地系统供电。国家电网公司《十八项电网重大反事故措施》第五项规定：防止变电站全停及重要客户停电事故。在变电站中，意外断电可能造成大面积停电。然而随着环境的变化（如尘土堆积、系统线路老化），系统绝缘程度降低，当发生一个接地故障时，在保证电气安全的前提下其装设的绝缘监测器报警而不必切断电源，从而保证了供电的不间断。此时的系统仍然能够正常运行，但是如果再出现异相接地故障，在系统两线之间将产生很大的电流，致使前端设备故障，导致供电中断，此时的用电设备（如炼钢炉、玻璃炉、大型集会场所的照明供电设备等）将不能正常运行，造成严重的后果。

德国、英国等欧洲的一些国家对不接地系统的研究和应用比较早，尤其是在德国，不接地系统的使用得到广泛的应用，绝缘监测方面的技术已经相当成熟。反观国内的绝缘监测类产品，由于市场需求等原因，在产品种类和质量方面都存在较大差距。目前国内厂家常用的测量方式有平衡电桥和非平衡电桥结合法、固定低频信号注入法和直流检测法等。上述测量方式都有其独特的优势，但是由于应用系统类型不同、现场环境的差异较大，此类测量方式存在测量范围较小、测量精度低、允许泄露电容小、适用系统类型少、监测周期长、功能单一等缺点。针对这些问题，本文提出一种新型多功能绝缘监测装置的设计，该装置可应用于交直流系统，绝缘电阻测量范围广（1 kΩ到10 MΩ），允许系统泄漏电容大（最多允许系统泄漏电容500 μF），响应时间短（小于5 s），测量周期短（至少比固定周期测量方式时间少一半），功能丰富：预报警值可调，能记录最近发生的20条故障记录，具有仪表有效性自检功能，互联功能，断线检测功能。

绝缘监测仪测量原理

工作原理如图1所示。

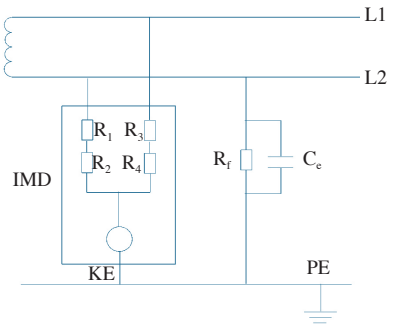


图1　绝缘监测仪工作原理

测量流程：信号发生器G通过耦合电阻R_1和R_3向系统注入频率可调的测量信号，单片机从采样电阻R_2和R_4处采样，由于注入的信号大小相等，极性相反，最终的信号是正负周期相减的结果，

因此测量精度不受系统泄漏电容和系统类型（交流、直流、交直流混合）的影响。

功能设计

本装置丰富的功能设计可以满足现场大部分需求。

1．手动/自动复位功能

产品可设预报警手动/自动复位功能。在手动复位设置下，当系统出现绝缘故障时，绝缘监测仪报警，经人工解决接地故障或者系统由于接触问题自动恢复绝缘状态时，绝缘监测仪并不会自动恢复监测状态，必须手动解除仪表报警。自动复位与此相反，当故障解除后，仪表自动恢复主界面。在现场运行的过程中，前者的优势在于，防止由于系统接触不良导致绝缘故障被忽略的问题，后者的优势在于实时性比较好。

2．自检功能

除了标准规定的自检功能外，该仪表可以通过输出接口进行仪表有效性自检的功能。当仪表检测到两个相关外接端子短接时，仪表会对此时的电阻进行双通道的测量，当两种通道的测量结果不同时，仪表会提示硬件故障，提醒用户把仪表返厂维修（使用该功能时必须把仪表从系统中断开）。该功能可以保证仪表在现场正常运行，杜绝误报警或者是由于仪表本身造成的其他测量问题。

3．互联功能

两套不接地系统互联示意如图2所示。

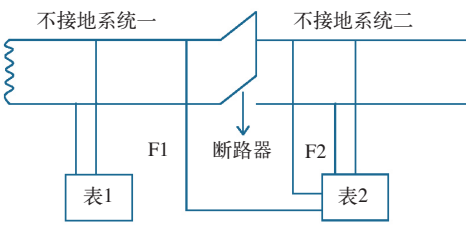


图2　系统互联示意图

开始时断路器是断开的，两套系统各自工作，互不影响，当断路器闭合时，不接地系统二与不接地系统一共属一套不接地系统，若两只表同时向系统注入测量信号，则测量结果会出现偏差。因此把表一或者表二的F1和F2端子分别接在一根线的两侧（如图2所示），当表二接收到F1和F2短接信号后，会停止向系统注入测量信号，而表一仍然处于正常工作状态。

4．PE/KE断线监测功能

为了提高绝缘监测的可靠性和减少由于接线造成的问题，配备了PE/KE断线监测功能。如图3所示，注入信号V1经过电阻分压进入电压跟随器，由于正负周期信号大小相同，极性相反，为了在正负周期均能识别PE/KE信号，必须加提升电压V2，经过放大器放大后进入单片机采样。该方式反应速度快，结果可靠，在断线后的0.5 s内即能识别。该功能同时配套一组继电器输出，保证测量数据真实有效。

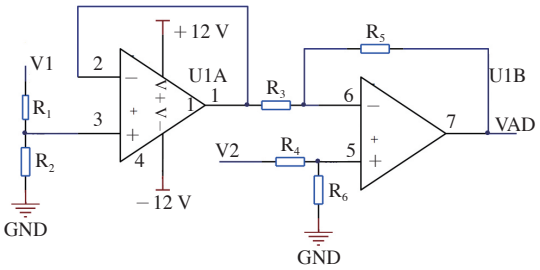


图3　断线监测电路

5．反应时间

IEC 61557－8《交流1 000 V和直流1 500 V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，在纯交流系统中，泄漏电容1 μF、绝缘电阻为0.5倍报警值时，响应时间应小于10 s。在系统出现绝缘故障时，及时提醒工作人员排除故障非常重要，早一秒发出报警，可能就会避免一次重大安全事故的发生。该仪表经过反复测试，其反应时间均维持在5 s以内。下面结合图4对系统出现绝缘故障的情形进行分析。

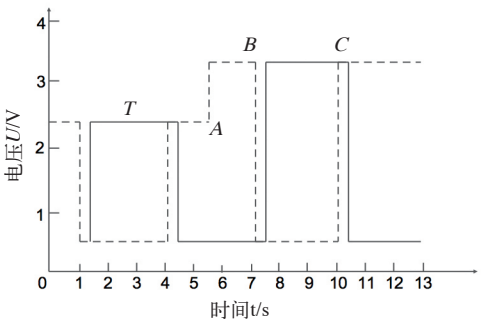


图4　电阻突变时，采样电压变化

仪表的最短测量周期大概为4.6 s（周期的设定在后文讨论），包括正半周期2.3 s和负半周期2.3 s。在*A*点时，电阻突然变小，电压上升，当2.3 s结束之后，如果稳定了，则进入相反的周期，此时从*B*到*C*可以计算一次电阻（实际应用下，会取正负周

期对电阻值进行计算），若此时电阻显示值在报警值以下，则进入报警界面。此时的报警时间为

$$t=t_{AB}+t_{BC}$$

很明显，反应时间t小于5 s。测量周期的选择不能太大，也不能太小。由于硬件电路四阶低通滤波电路和后续耦合电容的存在，新的信号注入的初期，进入单片机AD的电压波形是一个缓慢上升的过程，电压稳定需要的时间跟系统截止频率有关。该仪表电路截止频率为2 Hz，经过测量，在电容为1 μF时，电压上升至稳定点需要1.2 s左右；还有一个影响电压稳定的因素是系统电容的存在，电容会使电压的下降变得缓慢，周期太短不太容易判断是否有大电容（有大电容则需要增大测量周期）。所以，周期太大，反应时间变长；周期太小，容易导致误报警的产生。

6．误报警的产生、判断和处理

（1）误报警的产生

当不接地系统中负荷过大，或者是系统线路过长，都会使泄漏电容增大，由于该电容与绝缘电阻呈并联关系，所以在刚注入信号的时候，相当于电阻非常小，采样电压变大，达到报警警戒线，如果不对此情况加以处理，就会导致误报警的产生。误报警的产生导致仪表持续报警（实际上不存在绝缘故障），影响用户的正常生产。

（2）误报警的判断

判断过程如图5所示。

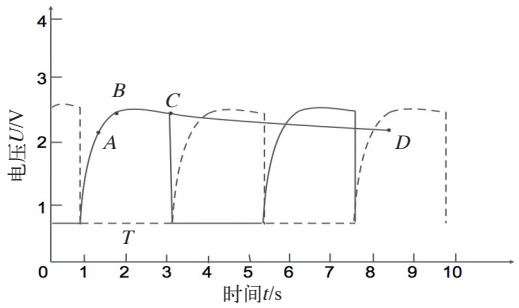


图5　大电容时采样波形

当系统因电容过大引起误报警时，采样波形就是除去CD段的图形，这种测量结果是不准确的，因为波形还处在下降阶段，由于采样时间到了（大电容导致波形下降缓慢），误以为此时波形已经稳定，这种情况应该延长测量周期。在此提出一种判断真实故障与误报警的方式。结合图5，每隔一段时间（100 ms即可）记录一次采样值，判断从A点到B点、从B点到C点的波形是上升还是下降。如果两次结果都是上升，则系统存在绝缘故障；如果前一个上升，后一个下降，则不应该发出报警信息，而应该继续延长测量周期。

（3）误报警的处理

在仪表识别系统存在大电容之后，需要增大测量周期，使信号完全稳定，以达到测量精度要求。

7．报警及故障记录流程

为了保证预报警信息能真实有效地存储在铁电存储器，需要做一些处理，流程如图6所示。

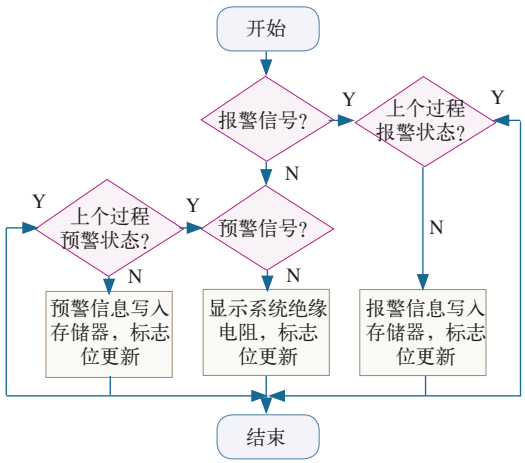


图6　故障信息记录流程简图

仪表的预报警与故障信息保存采取状态机迁移的方式，在故障信息被保存到铁电存储器之前，会与上个状态对比，如果不一样，才会被保存，同时更新状态标志位。这种方式简单有效，防止误报警的同时，可以保证故障不会被重复记录。

周期处理

1．最小周期的设定

上文中已简单地对最小周期的设定做了叙述，在此详细分析。最小周期的设定在不同电容值设定（可进入菜单进行设置）的情况下有所不同。当电容范围设置为100 μF时，其最小周期是上文中提到的4.6 s；当电容值设为500 μF时，其相应的最小周期为10 s。通过上文的叙述不难发现，周期之所以随电容范围的延长而增大，是由于，在与之并联的电阻大小相同时，电容越大，其波形下降到稳定值的速度越缓慢（时间常数$\tau=RC$）。在波形检测的前期，不一定能检测到波形的下降，此时就可能会出现误报警的情况，所以必须延长最小周期。

2．最小周期、反应时间与误报警

最小周期与反应时间之间存在着冲突关系。增大最小周期，反应时间会变长。减小最小周期，可能会出现误报警的情况。所以必须在精度允许、小电阻（此时电压最高，容易出现误报警的情况）和最大电容的情况下进行选择，并且同时满足反应时间最小又不能出现误报警的情况。

3．周期的调节

（1）短周期调整到较长周期

短周期调整到较长周期的过程就是，增加一短周期，然后重新选择测量点计算（随着周期的增长，两次采样点的位置也会后移）。如果稳定，则开始下半周期信号的注入，如果不稳定，再继续下去，直到稳定为止。根据仪表的测量范围（与电阻和电容有关），可规定一个最大的测量周期。

（2）长周期恢复至较短周期

长周期恢复至短周期的过程是，当到达测量点的时候，用该点的采样值与上次的采样值对比，如果在精度允许范围之内，则记下此时的测量周期，并开始下一周期的测量。

4．电阻与稳定尺度

电阻越大，对应的采样电压越小；电阻越小，对应的采样电压越大。由于不同电阻值对应的采样电压值不同，故不同的电阻时，对应的稳定尺度也不同。在采样电压大的时候对应的尺度可以稍大；在采样电压小的时候，对应的尺度则要减小。

5．实际周期与理论周期

对RC电路来说，电容电压在零输入响应在任意时刻t_0的值，经过一个时间常数τ可以表示为：

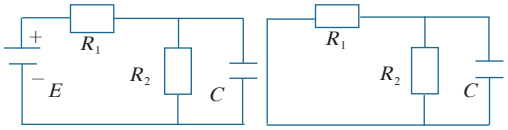
$$u_c(t_0+\tau)=0.368\,u_c(t_0)$$

即经过一个时间常数τ后，衰减了63.2%，或为原值的36.8%。其中u_c为该时刻的电压值。

当时间为5τ时，电压的变化量就非常小了，这里选取6τ作为理论周期。

在前后两次电阻测量结果相同时，可以根据理论周期调节注入信号的实际周期。在理论周期小于实际周期且两者相差很小的时候，对实际周期不做处理。其他情况时，把理论周期作为下一个周期的实际时间。对每个测量周期都要进行采样、处理。经过测量对比，可以在满足精度的前提下，测量周期达到最短。

如图7a所示的电路，首先将E短路，就变成了放电电路见图7b，显然此时R_1和R_2并联，等效电阻$R=R_1R_2/(R_1+R_2)$，时间常数$\tau=RC=CR_1R_2/(R_1+R_2)$。



(a)　(b)

图7　混联电路

测量数据如图8所示。

实际电阻值	显示电阻值	电容值/μF	理论周期/s	实际周期/s	电阻精度(%)
100k	98 k	500	193	208	2
500k	486 k	500	399	430	2.8
1M	950 k	500	460	498	5
2M	1.91M	500	498	518	4.5
4M	3.76M	500	519	563	6
6M	5.56M	500	527	581	7.3
8M	7.48M	500	531	593	6.5
10M	9.22M	500	533	612	7.8

图8　测量数据对比

通过数据对比发现，电阻精度都在10%以内；实际周期比理论周期稍大，是为了满足测量精度的需要。在实际测量过程中发现，完全使用理论周期是不可取的，应在前面乘以一个系数（增大周期），特别是在电阻达到兆欧级别的时候。

试验验证

该绝缘监测仪经检验满足国际标准，包括电气性能试验和EMC电磁兼容试验、反应时间、测量精度达标（具体可参考图8），功能丰富，能满足各种环境中不接地系统绝缘监测的需求。

结束语

经实际使用证明，本文介绍的绝缘监测装置在交流、直流不接地系统均能可靠工作，可以为不接地系统的安全稳定运行提供一层可靠的保障。EA

（收稿日期：2017.01.20）
（编辑：杨得润）

（上接第91页）

结束语

详细的分析和仿真计算是保证黑启动方案具有实际可操作性的重要条件。本文通过对某地区电网黑启动方案的仿真比较，优选出了合理有效的黑启动方案，其对于该地区应对可能出现的电网全停电事故、保证电网的安全稳定运行具有重要的意义。EA

（收稿日期：2016.08.11）
（编辑：杨得润）