

# 一种在线式智能直流绝缘装置的设计

李海建

(国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210032)

**摘 要:** 直流系统是发电厂、变电所控制和保护的基础, 为了防止由于两点接地可能发生误跳闸而引起严重的后果, 必须在直流系统中配置绝缘检测装置, 在线检测母线对地电阻。因此本文设计了一种利用 MSP430 单片机、不平衡电桥、接地漏电流传感器的智能直流绝缘检测装置, 该装置能检测出直流母线和支路正负平衡、不平衡接地时的电阻值大小, 提高了直流系统的绝缘检测可靠性和准确性。

**关键词:** 直流系统; 绝缘装置; MSP430; 不平衡电桥; 接地

## 0 引言

直流电源是为发电厂、变电站中的分合闸装置、微机保护装置、综合自动化系统和事故照明等提供可靠的操作和控制电源。由于远距离传输和多回路的供电方式, 系统对地绝缘下降是运行中常见的故障。如不能及时告警予以排除一旦形成多点接地时, 则可能引起信号或继保装置误动作而酿成事故。为了防止由于系统接地可能发生的误跳闸, 必须在直流系统中配置绝缘检测装置, 在线检测母线对地电阻。

对于接地故障检测的一般步骤是, 先实时检测直流系统正负母线对地绝缘电阻的阻值; 其次, 再判断接地故障所在支路<sup>[1]</sup>。多采用电桥平衡原理和低频信号注入法来检测直流正负母线对地绝缘电阻和支路, 由于受电桥平衡原理的限制, 此方法只能检测非对称性直流接地故障, 在正、负极绝缘电阻均等下降或其值相接近时, 装置不能正确测量, 使系统误认为绝缘水平下降; 其次低频信号注入法在使用中存在一定的缺陷, 在直流系统出现大量抗干扰电容时, 容易出现误报警。

基于上述情况, 设计了一套智能绝缘检测装置, 以 MSP430, 不平衡电桥和直流漏电流传感器搭建的硬件平台, 配以智能化管理软件, 构成原理先进、运行可靠、操作简单的智能绝缘检测装置, 用来在线检测直流母线及各馈线支路绝缘状况。将采集的数据处理后上送给中央监控, 也可以作为独立的绝缘监控单元, 纳入电站自动化系统。

## 1 功能简介

该装置利用 MSP430F149 处理器作为系统控制中心, 在设计中利用了该 MCU 数据存储器大和内部 12 位 A/D 转换器, 具有 RS485 串口, 能与 PC 机或上位监控装置通讯, 显示系统正、负母线和支路的对地电阻值, 接地支路的序号和绝缘情况。本装置最大可测量 32 路支路, 可通过 RS485 总线挂多台从机方式实现扩展功能, 构成分布式绝缘检测系统。其系统电路原理框图见图 1。

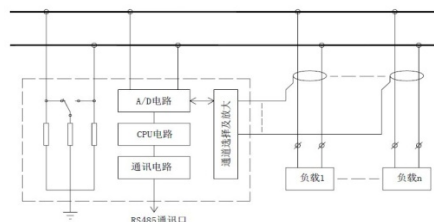


图 1 绝缘装置原理图

Fig.1 Insulation Supervisory schematic

主检测电路基于可控不平衡电桥原理, 支路是在各路直流回路正、负极上穿入高灵敏的直流漏电流传感器, 当回路绝缘水平正常时, 穿过传感器的直流电流大小相等, 方向相反, 即  $I_+ + I_- = 0$ , 此时传感器中的合成直流磁场为零, 其输出也就为零; 当回路绝缘水平下降到一定范围或出现接地故障时, 此时  $I_+ + I_- \neq 0$ , 该回路中出现合成直流电流, 对应该回路的传感器中合成直流磁场就不为零, 其输出也就不为零, 通过采集传感器的输出电压和母线对地电压即可算出各支路等效接地电阻<sup>[2]</sup>。各支路的传感器数据采集, 其 A/D 采样通道都是同一个, 通过单片机控制 4 个 CD4051 来采集 32 路支路传感器的输出电压, 以 01 路~08 路为例, 01 路~08 路

介入 CD4051 的 X0~X7, X 为公共输出端 COM, 检测电路如图 2 所示, 然后再等待一定 A/D 转换采样时间, 读取漏电流传感器的输出电压数据。

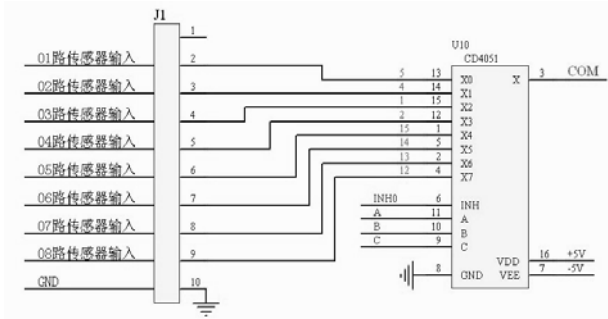


图 2 多路传感器采集示意图

Fig.2 Multiple Sensor output collect sketch map

## 2 测量方法

### 2.1 母线测量

母线电阻的测量采用平衡桥与不平衡桥相结合的方式<sup>[3]</sup>, 如图 3,  $R_+$  和  $R_-$  分别为正负母线接地电阻,  $K_1$  和  $K_2$  为单片机控制的继电器,  $R_7$  和  $R_9$  为测量电阻,  $R_{2C}$ ,  $R_{W1}$ ,  $R_{42}$  为正母线对地电阻,  $R_{1C}$ ,  $R_{W2}$ ,  $R_2$  串联为负对地电阻,  $INM$  接 MSP430 的 A2, 采集正母线对地电压,  $INI$  接 MSP430 的 A3, 采集地对负母线电压。

为了方便计算, 取  $R_{1C}=R_{2C}$ ,  $R_{W1}=R_{W2}$ ,  $R_{42}=R_2$ ,  $R_9=R_7$ , 令  $R_x=R_{2C}+R_{W1}+R_{42}$ ,  $R_y=R_9$

1) 当  $K_1$  和  $K_2$  断开, 正母线对地电压为  $V_{1+}$ , 地对负母线电压为  $V_{1-}$ 。

2)  $K_1$  闭合,  $K_2$  断开, 正母线对地电压为  $V_{2+}$ , 地对负母线电压为  $V_{2-}$ , 可得

$$\frac{V_{2+}}{V_{2-}} = \frac{R_+ // R_x}{R_- // R_y // R_x} \quad (1)$$

3)  $K_2$  闭合,  $K_1$  断开, 正母线对地电压为  $V_{3+}$ , 地对负母线电压为  $V_{3-}$ , 可得

$$\frac{V_{3+}}{V_{3-}} = \frac{R_+ // R_x // R_y}{R_- // R_x} \quad (2)$$

由公式(1)和(2)可得

$$R_+ = \frac{(V_{3-} - V_{2-})R_x R_y}{V_{2-} \times R_x - (V_{3-} - V_{2-})R_y}$$

$$R_- = \frac{(V_{3-} - V_{2-})R_x R_y}{V_{3+} \times R_x - (V_{3-} - V_{2-})R_y}$$

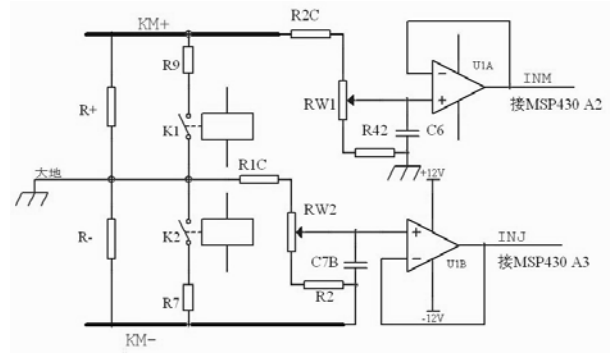


图 3 不平衡电桥原理图

Fig.3 unbalanced electric bridge schematic

### 2.2 支路测量

支路电阻的方法如下如图 4, 利用不平衡电桥, 采集两次漏电流传感器数据, 来计算接地电阻。假设 01 支路出现接地,  $R_{1+}$  为 01 路正接地电阻,  $R_{1-}$  为 01 路负接地电阻。I 为传感器检测到的漏电流大小。

4)  $K_1$  闭合,  $K_2$  断开, 正母线对地电压为  $V_{2+}$ , 地对负母线电压为  $V_{2-}$ , 漏电流值为  $I_1$ , 可得

$$\frac{V_{2+}}{R_{1+}} + I_1 = \frac{V_{2-}}{R_{1-}} \quad (3)$$

5)  $K_1$  断开,  $K_2$  闭合, 正母线对地电压为  $V_{3+}$ , 地对负母线电压为  $V_{3-}$ , 漏电流值为  $I_2$ , 可得

$$\frac{V_{3+}}{R_{1+}} + I_2 = \frac{V_{3-}}{R_{1-}} \quad (4)$$

由公式(3)和(4)可得

$$R_{1+} = \frac{V_{2+}V_{3-} - V_{2-}V_{3+}}{I_2V_{2-} - I_1V_{3-}}$$

$$R_{1-} = \frac{V_{2-}V_{3+} - V_{2+}V_{3-}}{I_1V_{3+} - I_2V_{2+}}$$

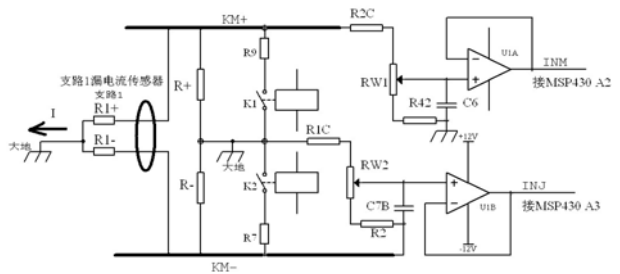


图 4 支路检测原理图

Fig.4 Branch detection schematic

考虑实际电路中采集的 I 电流值是经过传感器转换后的电压值  $0 \sim \pm 5V$ , 而 MSP430 内部 A/D 转化采用  $0 \sim +3V$  的模拟量转换, 需将采集的电压经

过电压处理, 电路图见图 5, R11、R12 为采集量分压电阻, 使 COM 端电源满足-1.5V~+1.5V, R13、R14 通过+5V 提供一个+1.5V 恒定电压, U3A 构成一个电压跟随器, U3B 构成一个同相加法器, INZ 接 MSP430 的 A0, INZ 测量电压为 VZ, 电路中取 R15=R16=R17=R18, VZ 输出为 0~+3V, 再经过分压处理, 满足 A/D 采样要求。

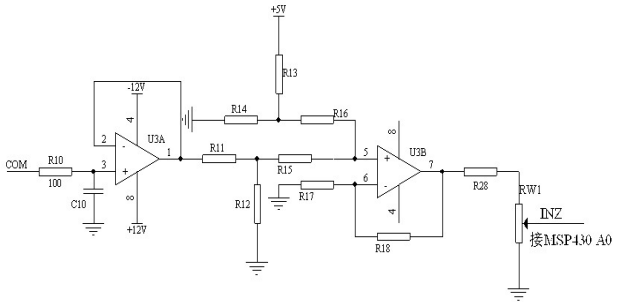


图 5 采集信号处理示意图

Fig.5 Acquisition signal processing sketch map

3 软件设计

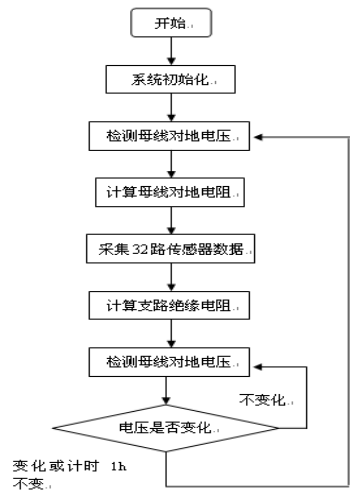


图 6 主程序流程图

Fig.6 main program flow chart

整个程序的编写均由 C 语言完成, 在程序设计中, 采用了结构化程序设计方法, 使各个模块程序相对独立, 便于程序代码的维护、移植和升级。主程序中首先完成的是各个模块的初始化和自检, 确保系统工作的可靠性, 确定系统中的各个部分硬件电路正常后, 将会自动进入直流接地检测状态, 系统的主程序流程图, 如图 6 所示。当母线的对地电压在一定时间内持续稳定在一种状态下时, 自动将此状态锁定, 锁定状态下绝缘仪只检测母线的对地

电压, 不启动支路巡检; 当母线对地电压发生变化超过一定限度时, 自动解除锁定, 重新启动巡检, 同时为保证系统检测的正确性, 当系统电压检测超过 1 小时未变, 系统将重新启动母线和支路绝缘检测。此方法减少了系统巡检时间, 降低了不平衡电桥继电器的使用次数, 具有较好的检测效率和功耗。

4 测试分析

在实际测试中, 直流母线电压为 DC220V, 支路漏电流传感器采用 0~±10mA/0~±5V 霍尔电流传感器, 采用数组电阻分别关联在正负母线与地线之间, 模拟正负接地的绝缘电阻, 测试结果母线数据见表 1, 支路数据见表 2。

表1 母线测试数据

Tab 1 Bus Test data

实际		测量	
R+/KΩ	R-/KΩ	R+/KΩ	R-/KΩ
1	1	1.1	1.1
2.7	2.7	2.8	2.8
5.6	5.6	5.3	5.3
10	10	10.4	10.2
20	20	20	20
28	28	27.9	27.6
51	51	51.7	52.2
82	82	80.8	83.8
10	20	10.2	20.1
16	82	16.1	81.9
82	16	81.5	15.7

表2 支路测试数据

Tab 2 Branch Test data

实际		测量	
R+/KΩ	R-/KΩ	R+/KΩ	R-/KΩ
1	1	0.9	1.2
2.7	2.7	2.6	2.8
5.6	5.6	5.6	5.8
10	10	10.4	10.6
20	20	19.6	20.2
28	28	27.9	27.6
51	51	50.7	50.5
82	82	80.2	82.7
10	20	10.5	19.8
16	82	15.9	83.5
82	16	80.8	16.3

由表 1 和表 2 数据可得, 测量母线接地电阻为 50K 以下, 支路接地在 10~50K 之间时, 能获得较好的测量精度, 当绝缘电阻大时, 测试相对误差略有增大, 这是由 A / D 采样和传感器的测量精度引

起的。在正常绝缘检测的环境下，要求绝缘水平下降到低于 25K 能可靠动作并能显示接地极性，本系统能够完全满足应用环境的需要。

## 5 结束语

从整体来看，整个装置与直流系统完全独立，直接利用直流漏电流传感器测量直流系统的接地漏电流，故直流系统对地电容对装置的工作没有影响；另外整套直流系统绝缘检测装置设计非常简单，在现场使用时安装简单，通过直流系统接地电阻数值检测和接地故障所在支路的判断，快速查找出接地

故障点，完全满足现场检测要求。

### 参考文献：

- [1] 李冬辉,史临潼.基于小波变换的直流系统接地故障检测中小波基的选择与比较[J].电力系统及其自动化学报,2004,16(6): 48-51.
- [2] 向小民,曾维鲁,崔志强.新型直流系统绝缘检测系统研究[J].武汉水利电力大学(宜昌)学报,1998 (4): 9-13.
- [3] 岳德坤.基于单片机的电源系统绝缘检测方法[J].电讯技术,2004(5): 179-182.