

基于ARM-DSP的10 kV配网接地状态检测装置开发研究

针对10 kV配网线路检修之后合闸送电时易发生接地事故,开发了基于DSP2812和ARM架构的接地线状态检测装置。装置采用DSP2812作为核心,并搭载高速ADC采样芯片及ARM智能芯片,设计了基于Android的嵌入式检测界面,可实现线路多种参数输入,具有多种友好人机交互功能。采用Boost升压+全桥逆变的技术方法产生信号源,提出基于直接信号注入式的检测方案,基于此通过向线路注入特定频率检测信号,利用FFT算法进行有效分解和提取,依据阈值电流和汇总的经验数据,可有效检测多种接地状态,包括三相短路、两相短路和单相短路接地及相间短路等,在技术上有效防止带地线合闸恶性事故的发生,装置具有测量线性度好、准确度高、携带方便、操作简单、成本低且易推广等优点,可为配网检修部门提供一定的借鉴和参考。

陈亮/广东电网有限责任公司肇庆供电局

程乐峰 殷林飞 余涛/华南理工大学电力学院

0 引言

10 kV配网线路在检修改造完成之后,在合闸送电之前,需要对线路是否存在接地线进行检查,而对于有些接地比较隐蔽的情况,如线路通过细铁丝直接与杆塔连接接地,这种情况很难察觉出来,容易发生带地线合闸送电这一恶性事故,因此,检测接地线,特别是对于临时的挂接地线,显得尤为重要^[1]。文献[2]中统计出2003~2009年间,我国在110 kV以下配电网中仍时常发生带地线合闸送电情况,这种恶性操作事故大约占到所有恶性操作事故的25%^[3]。2010年10月30日,国内某供电局发生了一起带接地线合闸送电的恶性误操作事故,究

其原因,调度人员由于疏忽,在送电前未确认线路的接地状态,部分接地线未拆除,导致发生合闸接地短路事故。

目前,国内主要通过微机“五防”装置来抑制一些误操作行为,然而配电线路改造、检修存在工作点多、面广的特点,漏、拆接地线或人为恶意设置短路线的概率很高,这就容易导致所谓的“带接地点合闸送电”事故^[4-6]。

国内外相关技术研究中,对于接地线状态的检测主要集中在110 kV以上的高压输电线路中,如各类故障选线装置、行波检测装置等,但这类装置主要应用在高压电网中,且对于故障线路的判断准确率也不是很高,而对于10 kV及以下电压等级的配网,鲜有接地线检测装置的出现,而是主要集中在接地线状态管理系统方面^[7-8],如通过建立管理系统规范化接地线的管理,并引入GPRS等通信技术,对接地线的使用状态进行监控等^[9-11],但准确性一般都不高。在调研过程中,发现广东电网各地方基本靠电阻测试仪(摇表)测试绝缘电阻来进行低压配电网接地线检测,但误差往往很大,准确率不高,且对于非可靠性接地、隐蔽接地情况很难判断出来,对于电网复杂的电气环境的适应性较差,难以满足工程上大规模推广的实际需求。

基于此,本文以DSP作为数据处理核心,采用高速高准确度A-D采样芯片,并搭载ARM嵌入式架构,形成多功能的友好互动操作界面,开发基于DSP+ARM的接地线状态检测装置,同时,在



陈亮/高级工程师

关键词/Keywords

配网检修·
接地线·
信号注入·
接地状态检测·
配网自动化·
带地线合闸·

中国南方电网科技项目资助(K-GD2014-204),国家自然科学基金项目(51177051, 51477055)。

检测手段上采用特定频率的谐波或间谐波信号直接注入检测,利用电流阈值判据和经验数据,可有效检测出多种类型的接地状态,并具有检测准确度和准确率高、成本低、方便携带且易推广等特点。

1 接地状态检测装置硬件设计

1.1 接地状态检测装置

基于DSP的接地状态检测装置硬件设计方案有如下四种。

1) 采用感应注入式来检测信号,选用DSP2407芯片,信号源采用6 V电池组输入,检测回路之中设计了一个增益可调的微弱信号放大器。

2) 采用直接注入式检测信号,相比方案一,空间更大,集成在一块板,同时添加数据缓存芯片,纠正了液晶驱动,并简化了检测回路;采用光电耦合隔离,并采用多个DC-DC电源隔离芯片,有效排除干扰,增大了逆变器的输出功率。

3) 同样采用直接注入式检测信号,并采用小信号光电隔离放大器HCPL-7480,选取某一中频段偶次倍工频作为信号源;采用Boost升压+全桥逆变的技术方案,并加入仪器自检功能,同时检测算法采用快速傅里叶变换FFT算法;采用DSP2812芯片,带字库液晶,并利用芯片进行供电。

4) 基于方案三,采用复杂嵌入式芯片ARM架构,并嵌入Android操作系统,可实现复杂参数输入;采用触屏化界面,可实现多种接地故障检测,包括接地线三相接地、两相接地、单相接地和相间短路等,并显示接地线状态,与手机设备实现实时通信等。

本文采用第四种方案,该方案主要单元包括:数据采集模块、信号调理模块、自动量程切换电路、数据分析判断模块、电压源发生器、电池监控电路、液晶显

示及按键输入电路等。方案以DSP2812芯片作为核心CPU,完成数据分析判断、A-D采样、PWM输出控制、量程切换控制及人机交互等功能^[12-13]。其中,DSP作为数据处理核心,一是控制逆变器产生特定频率的谐波或间谐波检测信号,二是对检测回路的采样电压电流信号进行处理和判断分析,三是与基于ARM芯片进行数据通信,并通过Android界面反映接地线检测状态及相关参数设置。装置内部采用高准确度高速采样A-D转换芯片MAX1324,可对经数据采集模块和信号调理模块处理的模拟信号进行高速A-D采样,并由DSP进行数字滤波和基于FFT的数据处理分析。装置配置双电池,一个专门用于对DSP供电,另一个则为DSP之外的其他电路供电,采用这种供电方式的好处是避免DSP由于供电电压不稳定导致电路异常,判断出错。

装置总体原理框图如图1所示,在该设计方案中,装置通过电压环线圈感应电压到被测输电线路中的某一相,通过对回路采样电流的采样和分析,判断检测回路是否导通,从而判断远方接地线的状态,与现有技术相比,该设计方案具有如下优点。

1) 携带方便,操作简单,生产成本低,容易推广实施。

2) 测量线性度好,测量准确度高,抗干扰能力强。

3) 引入模糊聚类 and 模糊推理智能判断技术,有效排除变压器或TV的影响,检测可靠性高。

4) 采用梳状数字滤波技术,排除线路上感应

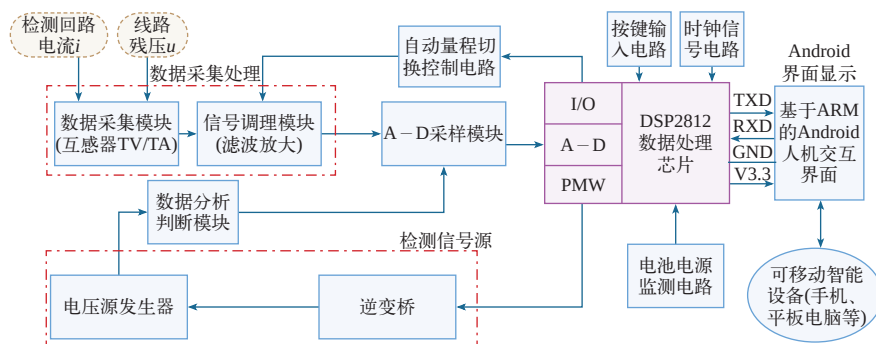


图1 基于硬件设计方案四的接地线状态检测装置总体原理框图

电压或残压对信号采集和有效判据的干扰。

1.2 主功能单元设计

根据图1,检测回路电流信号和线路残压信号分别通过电压互感器TV和电流互感器TA进行取样,取样信号经过滤波放大等一系列信号调理,并经A-D转换后送入DSP数据处理芯片进行数字滤波,通过计算输出电流电压有效值,结合拥有经验数据的智能判据,从而判断所检测线路的接地线连接情况,并通过基于ARM的Android显示屏显示出来,显示内容包括所测电压电流值、判断结果及相关辅助信息,同时通过显示屏可手动输入当前线路的参数和型号,为以后的故障距离判断累积基础数据库。DSP芯片自带的PWM输出模块与PWM驱动模块连接,并通过控制电压电源的开关管导通情况从而控制输出电压的幅值和频率。液晶显示屏可实现灵活互动的人机交互功能,电池电源检测电路可用于监测电池电量状态并实现充电功能。DSP芯片采用TMS320F2812,其外围电路主要包括内存模块和电源模块,内存模块采用ISSI61LV6416,电源模块包括6 V转 ± 5 V隔离稳压模块电源WRA0505CS-2W、5 V转3.3 V电源模块SPX117和电源管理芯片TPS7333Q,其中SPX117提供的3.3 V电源主要作为采样所需的模拟电源,TPS7333Q提供DSP芯片所需的工作数字电源,同时也起到电源监控和复位的功能,模拟地和数字地通过磁珠L1连接。增益切换控制电路采用SN74LVC4245作为控制信号电压等级转换,用于将3.3 V控制信号转换为5 V控制信号,从而控制模拟电子开关CD4051切换放大电路的增益倍数。

输出电压电源模块主要采用Boost升压电路+全桥逆变电路的技术方案。其中Boost升压电路将输入的6 V电压升压为18 V的直流电压,再经全桥逆变电路逆变为高频交流方波,然后经LC滤波电路得到10 V有效值的标准正弦波。Boost电路和全桥电路的开关管均采用DIP8封装的双MOS管AP9971GD。PWM驱动电路则首先通过LM339比较器构成的比较电路抬高驱动输出电压至12 V,再经过MOS管驱动模块控制电压电源模块中的MOS

管的痛断状态,其中MOS管驱动模块芯片采用高性能的全桥MOS管专用芯片IR2110。

1.3 CPU主程序设计

图2为CPU主程序工作流程图,具体来说,检测装置开始工作后,首先初始化硬件系统和系统自诊断,一切正常后响应人机交互命令,这里的系统自诊断包括仪器自检和线路残压检测,若仪器自检不合格或线路残压过高,仪器将会自动切断检测回路,停止检测。待检测条件正常后,仪器开始测量,起动ADC转换器进行数据采样,并根据采样值的大小控制增益切换控制电路,保证采样准确度。所采样数据经数字滤波器进行数据处理后,将计算得到相应的电压电流信号值,一方面通过所得电压值控制PWM输出间隙变化,形成闭环控制系统,从而改变仪器输出电压的电压幅值和频率,另一方面通过所得到的输出电压和所采集的电流值,基于汇总的经验数据及阈值电流法,判断所检测电流在特定电压下是否越限。经验数据要求包括可能存在的长距离最小短路接地电流和最大感应电容电流值,通过理论分析和多次现场试验,得到一组可靠的越限范围。所采集的电流在输电线路远方未接地时应大于感应电容电流值最大值,小于短路接地值;在存在远方接地时,输电线上的电流将远大于所设定的越限值,根据判断电流值大小即可判断被检测线路的接地线状态。最后通过控制液晶显示和读取按键状态实现人机交互,用以显示测量结果或保存相关参数设置。

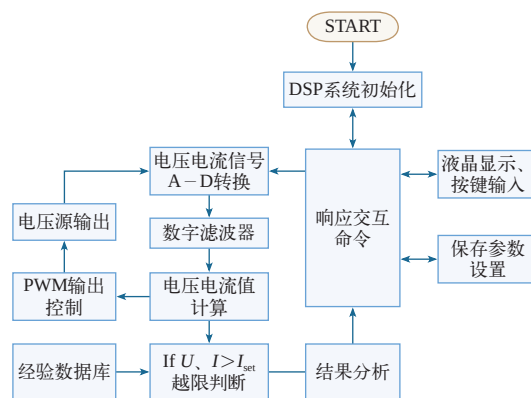


图2 CPU主程序工作流程图

1.4 基于ARM的Android检测界面设计

检测界面采用ARM芯片和ARM操作架构，其中搭载嵌入Android操作系统，Android操作系统架构如图3所示。



图3 Android操作系统架构图

可见，开发Android的上层应用，通过Java即可开发，可以通过Log进行查看程序运行的状态，可以通过Java和JNI操作Android基层的硬件资源，这样可很方便地与DSP2812芯片进行串口通信。而JNI底层操作串口的驱动则为C代码的底层驱动，之间通信如图4所示。

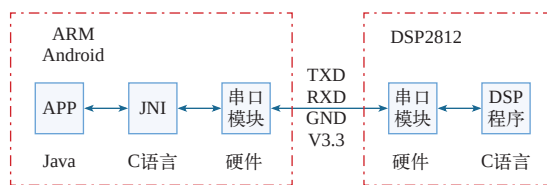


图4 Android系统和DSP2812通信示意图

从图4可看出，DSP2812和ARM通过通信模块进行通信，可进行4G通信，在4G信号不够强时，自动通过3G和2G信号进行处理数据，因此具有远程控制和传输数据的功能，符合智能电网的要求。若搭载的是Linux系统，则可采用Qt设计程序检测界面。通信协议采用IEC 61850标准协

议，且能对IEC 61850标准中的多种协议进行自动的识别区分。图5为基于ARM的Android检测设计界面，相应地DSP与ARM之间的串口电路如图6所示。

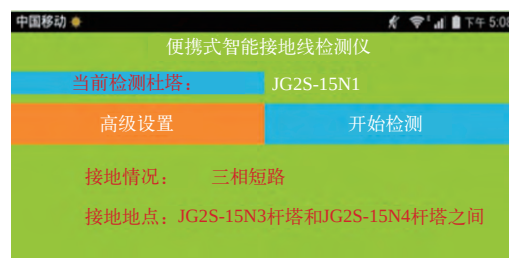


图5 基于ARM的Android检测界面设计

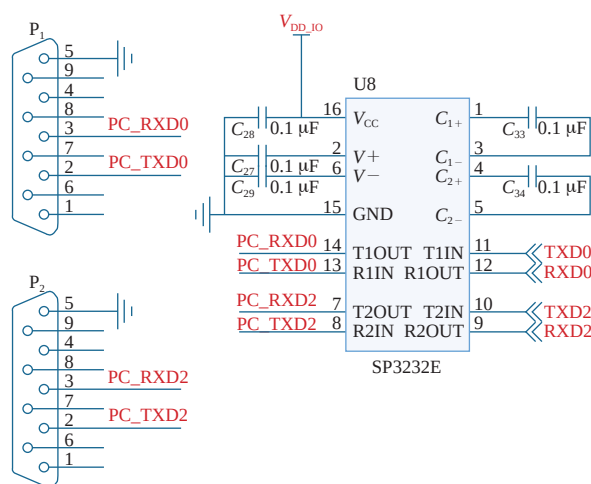


图6 串口电路设计

2 判据设计

采用以上FFT算法来对电压电流信号分离50 Hz基波和对应的谐波。为了检测注入信号频率，同时排除工频感应信号的干扰，所设计的装置充分利用FFT算法快速准确的优势，将叠加到工频信号上的有用信号分离，便于进一步的分析处理。由于输电线路中主要感应信号为工频信号，一般情况下不含有偶次谐波，因此该特定的频率可有效排除干扰，同时也不受电容电流的影响。

利用FFT快速傅里叶算法，不仅提高计算速度和准确度，最为重要的是为了防止感应电压或电流的影响需要投入比较大的硬件或软件滤波，然而在感应电压电流过大的情况下，单纯的滤波效果不明显反而会衰减有用信号，因此在采用FFT算法的情况下可有效避开这方面的影响，同时计算

分离出50 Hz基波和对应的谐波，只用分离出的谐波（有效信号）作为判断标准，这样就可以减少滤波的硬件投入简化电路，同时完全排除了工频信号的干扰。

为了提高检测准确度，数据处理芯片每周周期采样128个点，再分别对采样点有效值做平方累积和开方运算得到等效的电流有效值 X 。电流有效值的计算公式为

$$X = \sqrt{\frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} x_i^2} \quad (1)$$

根据上述检测方法，当输电线路远端存在未拆除接地线时，所检测的等效电流信号有效值在大约100~1 000 mA范围；当输电线路不存在接地线时，检测信号仅为微弱的干扰信号。

因此可设定判据为

$$T > \alpha I_{\text{out}} = \alpha \frac{U_{\text{out}}}{Z} \quad (2)$$

式中， T 为待测线路中传递回来的实际电流值； I_{out} 为实际输出电流有效值，mA； α 为影响因子，其值可根据现场实际试验情况作适当调整； U_{out} 为实际输出信号电压有效值； Z 为等效接地阻抗。当传递回来的检测信号 T 超过限值 αI_{out} 时，则存在未拆除接地线。在待测线路中输入特定的多种中频段频率为 $f_1, f_2, \dots, f_n$ 的信号，可得到对应频率的多个电流有效值 $I_1, I_2, \dots, I_n$ ，若得到的电流值 $I_1, I_2, \dots, I_n$ 都超过式（2）中的电流信号判据 $\alpha I_{\text{out}(i)}$ （ $i=1, 2, \dots, n$ ）时，则可判断线路存在接地线，否则远方正常，不存在任何接地线。

3 检测方案设计

在设计检测方案时，需要考虑保留一组接地线的方式，以保证现场操作人员的安全，然而通过多次现场试验，发现存在以下几个问题。

1) 线路中存在很高的工频感应电压和感应电流，尽管所设计的硬件电路有涉及滤波处理，然而由于感应信号过大，以致不能很好地判断检测结果。

2) 感应电压检测法所感应的电压信号很弱，容易被干扰信号湮没，由于近处接地线有用阻抗

很小，有很大的分流作用，导致注入输电线路中的信号微弱。

3) 由于功率受限制，检测范围有限，同时感应注入式样机采用紧凑结构，存在抗干扰能力弱、电池不耐用等缺陷。经过理论分析、仿真验证以及反复的现场试验，最终确立了如下检测方案：不用改进接地线，采用直接接触式的检测方法。

为了安全问题，在操作流程中增加与“验电”相对应的“验地”的概念，确保在合闸送电前，输电线路不再存在接地线，故需额外提供绝缘棒，图7为对A相进行接地状态的接触式识别检测原理图。

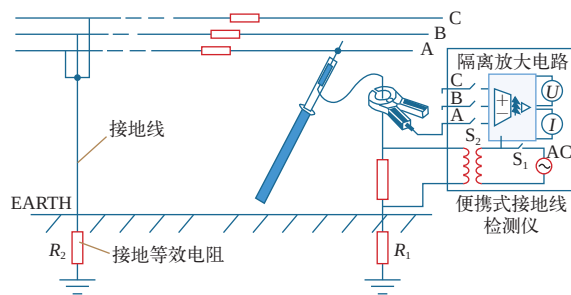


图7 A相接地状态接触式识别检测原理

对于图7的接触式检测方案，具体操作描述如下。首先，将仪器的检测信号输出端通过高压绝缘棒挂接到检测线路的某一相，如A相。仪器接地端则通过自带接地线接地，检测接线稳固后，即完成接线步骤；然后，起动仪器，选择“仪器自检”项，使仪器进入自检，待仪器自检通过，表明线路残压正常后，起动测量，仪器发射特定频次信号到待测线路，不断对检测回路进行扫频采样，最终识别A相线路是否存在接地线；同理，从仪器B、C相信号发射端出来的信号通过高压绝缘棒注入到待测线路的B、C两相，可分别同时完成对B、C相待测线路接地线状态的识别；最终，A、B和C三相待测线路的接地线状态识别完毕即在Android检测界面显示，至此，检测完毕。

4 现场试验

针对肇庆市高要区金利镇10 kV朗淘乙线大

等支线的线路进行现场测量试验，分别对其西塍站淘甲线的6[#]和9[#]杆塔进行人为设置三相接地、两相接地、单相接地、两相短接和无接地情况，并在距离该接地点3 km之外的榄树站10 kV榄淘乙线13[#]塔处接上仪器进行测量。通过现场试验，装置可分别有效检测到三相接地、两相接地和单相接地三种接地线接地情况，以及识别相间短接和无接地情况，从而证明所开发接地线状态检测装置的实用性与有效性。具体检测情况，如下表所示的装置实际检测情况统计。通过下表发现，装置可有效识别接地线的接地状态和类型，但在此基础上的定位还存在一定的误差，定位显示的结果比接地点的实际位置超出1~2个杆塔的距离，因此，在接地点定位功能方面，装置还有待进一步改进和提高。

表 现场检测情况统计

实际设置情况	检测结果		
	检测结果	判断结果	定位结果
6 [#] 杆塔	三相接地	三相接地	6 [#] 杆塔
	两相接地	两相接地	5 [#] 杆塔
	两相短路	两相短路	5 [#] 杆塔
	单相接地	单相接地	6 [#] 杆塔
	无接地	无接地	无接地
9 [#] 杆塔	三相接地	三相接地	9 [#] 杆塔
	两相接地	两相接地	7 [#] 杆塔
	两相短路	两相短路	8 [#] 杆塔
	单相接地	单相接地	9 [#] 杆塔
	无接地	无接地	无接地

5 结束语

本文介绍了所开发的基于DSP2812和ARM架构的10 kV配网接地线接地状态检测装置，用于在配网检修后合闸送电前，对线路上是否存在漏拆接地线进行检测，辅助检修人员识别并拆除接地线，防止发生带地线合闸恶性操作事故发生。检测装置采用信号直接注入扫频检测技术，利用阈值电流法判据，可有效检测三相接地、两相接地及单相接地情况。在实际应用中，需要对防止强感应信号干扰、防潮、防震及电池寿命等方面做进一步完善和改进，并针对多分支线路、多组接

地的情况，开展下一步的研究。本文开发的检测装置对于防止发生带地线合闸送电、提高线路故障检测效率等具有重要意义。

参考文献

[1] 李丹, 张义军, 吕伟涛. 风力发电机叶片姿态与雷击概率关系模拟分析 [J]. 应用气象学报, 2013, 24 (5) : 585-594.

[2] 刘仁琪, 吕晓俊, 黄进, 等. 临时接地线综合管理系统的开发和应用 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (22) : 109-112.

[3] 李哲. 电气误操作事故100例及原因分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[4] 伍文聪, 姜静, 余涛. 配电网临时接地线检测方法的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (23) : 151-155.

[5] 刘家军, 缪俊, 姚李孝, 等. 电力检修作业挂接地线可视化监测装置 [J]. 电力自动化设备, 2010, 38 (7) : 134-136.

[6] 刘家军, 刘博, 徐新, 等. 接触网作业地线的信息收集装置的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (5) : 139-143.

[7] 代文章. 电力系统的安全性及防治措施 [J]. 电气技术, 2011, 10 (12) : 85-89.

[8] 刘家军, 陶凯, 杨帆, 等. 基于手持设备的电力检修作业地线挂接信息管理系统开发 [J]. 电网与清洁能源, 2015, 31 (9) : 49-55.

[9] 邱略能. 变电站接地线管理系统研发 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

[10] 楚湘辉. 新型行波传感器及其在电网故障行波定位中的应用 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2009.

[11] 唐金锐. 电力线路在线巡视监测及故障准确定位的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.

[12] 林圣. 基于暂态量的高压输电线路故障分类与定位方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.

[13] 程乐峰, 彭健福, 黎有锡, 等. 基于DSP的专线用户节能潜力智能诊断仪的研制 [J]. 电测与仪表, 2014, 51 (18) : 92-97.

(收稿日期: 2016-04-12) EA