

基于 STM32 的在线绝缘监测装置的设计

尹强, 王佰超, 甘江华, 刘建鹏, 乔海强

(国家电网许继电源有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对直流电源系统绝缘状况监测不全的问题, 提出了基于组合桥的在线绝缘检测方法, 以 STM32 微处理器为核心, 设计了硬件构架和软件构架, 研制了在线式绝缘监测装置, 在满足系统接地和绝缘降低的绝缘状况监测的基础上, 实现了交流窜入、直流互窜、电容测量、绝缘预警、母线对地电压补偿和装置自检等功能, 现场运行表明了其可行性和有效性。

关键词: 直流系统; 绝缘监测; STM32; 组合桥; 在线式

Research for on-line Insulation Monitoring Devices Based on STM32

Yin Qiang, Wang Baichao, Gan Jianghua, Liu Jianpeng, Qiao Haiqiang

(XJ Power Co., Ltd., State Grid Corporation of China, Xuchang 461000, China)

Abstract: In accordance with the deficiency of insulation monitoring contents for DC power system, the method of the on-line insulation inspection is proposed based on combined bridge. With STM32 as the processing core, the hardware framework and the software framework are designed and the on-line insulation monitoring devices is developed. On the basis of satisfying the system grounding and the insulation dropping, the Multiple functions are realized, such as, AC injection, DC crosstalk, capacitance measurement, insulation early warning, DC bus to ground voltage compensation and devices self-checking. The practical application shows that this devices is accurate and reliable.

Keywords: DC power system; insulation monitoring; STM32; combined bridge; on-line

0 引言

在电力系统中, 直流系统为各种继电保护设备及操作回路提供稳定可靠的电源, 无带电导线直接接地, 其运行状况的好坏直接关系到整个电力系统能否正常运行^[1-3]。系统绝缘降低或接地是直流系统最常见的状况, 若不能及时找到并排除, 将造成保护设备误动作或拒动, 引起系统瘫痪, 甚至导致大面积停电等严重后果^[4]。同时, 直流互窜、交流窜电和分布电容较大等绝缘状况也会造成直流系统的绝缘故障^[5-8], 因此系统绝缘状况监测要全面。

目前, 国内外直流系统绝缘检测方法主要有电桥法、低频信号注入法和漏电流法^[9-11], 同时电力行业标准《DL/T 1392-2014 直流电源系统绝缘监测装置技术条件》5.3.2 中规定“直流系统绝缘监测装置应采用直流电压检测法原理……”, 因此站用直流电源系统的母线在线绝缘检测方法主要采用电桥法。

本文在理论和实践的基础上, 提出基于平衡桥、检测桥和补偿桥的组合桥在线绝缘检测方法, 结合 STM32 控制器搭建了软硬件构架, 研制了在线式直流绝缘监测装置样机, 其具有采样精度高、抗干扰能力强以及功能完善的特点, 完善了绝缘状况监测的内容, 提高了系统运行的稳定

性和可靠性。

1 系统结构及原理

绝缘监测装置系统结构包括工作电源、智能电桥控制、电压电流采样、人机交互、开入开出、联机通讯等部分, 如图 1 所示。绝缘监测装置基于平衡桥、检测桥和补偿桥的组合桥对直流系统的母线实时绝缘监测, 主要包括交流窜入、直流互窜、电容测量和母线对地电压补偿等功能; 同时具有平衡桥监测、非平衡桥监测、每天定时、每天自动、周期定时、周期自动等 6 种工作模式。

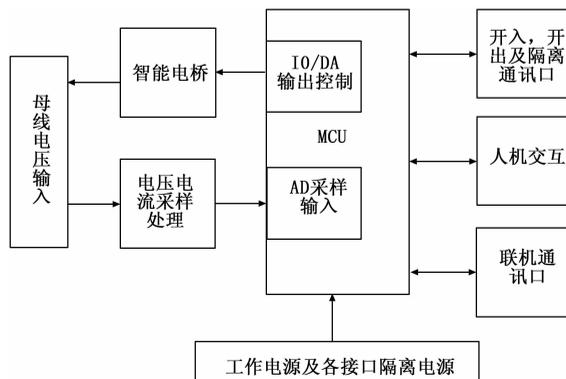


图 1 绝缘监测装置系统结构图

直流电源系统检测等效电路如图 2 所示, R_1 、 R_2 为平衡桥电阻, R_3 、 R_5 为检测桥电阻, S_1 、 S_3 为检测桥开关, R_4 为补偿桥电阻, S_2 为补偿桥开关, R_+ 、 R_- 为正负极母线对地电阻, C_+ 、 C_- 为正负极母线对地电容, 虚框为直流在线绝缘监测装置的组合桥检测电路。

收稿日期: 2019-01-10; 修回日期: 2019-02-18。

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5292C0170032)。

作者简介: 尹强(1984-), 男, 山东临沂人, 硕士, 高级工程师, 主要从事电能变换技术研究及发电厂、变电站直流电源技术方向的研究。

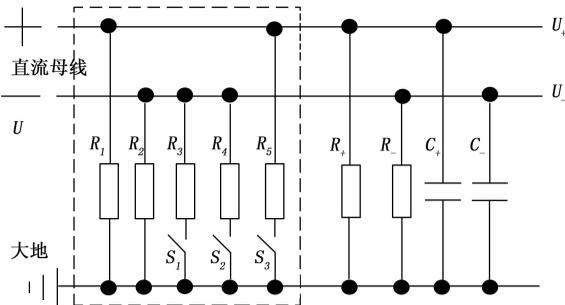


图 2 直流电源系统检测等效电路图

1.1 平衡桥与检测桥

平衡桥是通过周期性监测母线对地电压和电流, 通过欧姆定律算出其对地的电阻值。检测桥是通过控制切换桥的状态, 依据平衡状态下正负母线对地电压和电流与非平衡状态下正负母线对地电压和电流, 按照二元一次方程组, 计算出母线的正负对地电阻。

1.1.1 平衡桥与负极检测桥的组合桥检测

首先, 将开关 S_1 、 S_2 和 S_3 断开, 则可得公式 (1):

$$\frac{U_1}{Z_+} + \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{Z_-} + \frac{U_2}{R_2} \quad (1)$$

其中: $Z_+ = R_+ // C_+$ 且 $Z_- = R_- // C_-$

其次, 将开关 S_1 闭合, S_2 和 S_3 断开, 则可得公式 (2):

$$\frac{U_3}{Z_+} + \frac{U_3}{R_1} = \frac{U_4}{Z_-} + \frac{U_4}{(R_2 // R_3)} \quad (2)$$

最后, 联立 (1) 和 (2) 两个公式, 可解得 Z_+ 和 Z_- , 分别如式 (3) 和 (4) 所示:

$$Z_+ = \frac{R_1 R_2 (R_2 // R_3) (U_1 U_4 - U_2 U_3)}{R_1 [(R_2 // R_3) - R_2] U_2 U_4 - R_2 (R_2 // R_3) (U_1 U_4 - U_2 U_3)} \quad (3)$$

$$Z_- = \frac{R_2 (R_2 // R_3) (U_1 U_4 - U_2 U_3)}{(R_2 // R_3) U_2 U_3 - R_2 U_1 U_4} \quad (4)$$

1.1.2 平衡桥与检测桥的组合桥检测

若在负极母线对地电压偏低或者正极母线对地电压偏高的情况下, 进行负极检测桥检测, 则会导致正极母线对地电压过高, 为了防止此现象的出现, 先投入正极电阻降低正极母线对地电压, 然后进行负极检测桥检测。

首先, 将开关 S_3 闭合, S_2 和 S_1 断开, 则可得公式 (5):

$$\frac{U_7}{Z_+} + \frac{U_7}{(R_1 // R_5)} = \frac{U_8}{Z_-} + \frac{U_8}{R_2} \quad (5)$$

其次, 将开关 S_1 闭合, S_2 和 S_3 断开, 则可得公式 (6):

$$\frac{U_9}{Z_+} + \frac{U_9}{R_1} = \frac{U_{10}}{Z_-} + \frac{U_{10}}{(R_2 // R_3)} \quad (6)$$

最后, 联立 (5) 和 (6) 两个公式, 可解得 Z_+ 和 Z_- , 分别如式 (7) 和 (8) 所示:

$$Z_+ = \frac{R_1 R_2 (R_2 // R_3) (R_1 // R_5) (U_7 U_{10} - U_8 U_9)}{R_1 (R_1 // R_5) [(R_2 // R_3) - R_2] U_8 U_{10} - R_2 (R_2 // R_3) [R_1 U_7 U_{10} - (R_1 // R_5) U_8 U_9]} \quad (7)$$

$$Z_- = \frac{R_1 R_2 (R_2 // R_3) (R_1 // R_5) (U_7 U_{10} - U_8 U_9)}{R_2 (R_2 // R_3) [(R_1 // R_5) - R_1] U_7 U_9 - R_1 (R_1 // R_5) [R_2 U_7 U_{10} - (R_2 // R_3) U_8 U_9]} \quad (8)$$

1.1.3 母线对地电容

当母线对地接入电容时, 母线对地电压和母线对地电流都会产生变化, 其变化缓慢的, 若连续一个周期曲线变化小于 5%, 就可认为充放电结束, 测试所得的时间 t , 就是变化所需的时间, 由可得出电容 C , 如公式 (9) 所示。

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\Delta I \times t}{\Delta U} \quad (9)$$

则, 根据阻抗的公式, 可以得到公式 (10), 解得 R_+ 和 R_- , 即:

$$R_+ = \frac{C_+ Z_+}{C_+ - Z_+}, R_- = \frac{C_- Z_-}{C_- - Z_-} \quad (10)$$

1.2 补偿桥

补偿桥就是在工作过程中发现负母线绝缘接地, 在一定范围内装置启动补偿电路, 使正负母线差压降低, 避免负极由于过压而导致的系统故障。当正极对地绝缘下降较负极对地绝缘下降严重且满足文献 [10] 的条件时, 将开关 S_1 和 S_3 断开, S_2 闭合, 可得公式 (11) 和 (12):

$$\frac{U_5}{Z_+} + \frac{U_5}{R_1} = \frac{U_6}{Z_-} + \frac{U_6}{(R_2 // R_4)} \quad (11)$$

$$(R_2 // R_4) = \frac{(U_6 / U_5) R_1 Z_+ Z_-}{R_1 Z_- + Z_+ Z_- - (U_6 / U_5) R_1 Z_+} \quad (12)$$

补偿后希望正负极对地电压相等, 即 $U_6 / U_5 = 1$, 且 $R_1 = R_2$, 则解得 R_4 , 如式 (13) 所示:

$$R_4 = \frac{Z_- Z_+}{Z_- - Z_+} \quad (13)$$

1.3 窜入检测

窜入检测^[12]为交流窜入和直流互窜。交流窜入是交流电压与直流系统发生的非正常电气连接。直流互窜分为同极和异极与直接和间接两两组合的 8 种形式, 根据两段母线中正负极对地电压和阻抗的变化规律来判断直流互窜的类型, 可以得到间接互联的阻抗, 直流互窜分为直接互窜和间接互窜。

1.3.1 直接互窜

同极性互窜为两段直流系统共正极或共负极运行, 甚至两段直流正极和负极均连接在一起, 此类互窜形成的原因一般是因为二次回路存在寄生回路, 导致共极运行。其检测等效电路图如图 3 所示。

异极性互窜为 I 段直流正极与 II 段直流负极或 I 段直流负极与 II 段直流正极连接在一起的互窜问题。其检测等效电路图如图 4 所示。

1.3.2 间接互窜

带阻抗同极性互窜为两段直流系统正极与正极或负极与负极运行, 甚至两段直流正极与正极和负极与负极通过电阻、线圈等连接在一起的互窜问题。其检测等效电路图如图 5 所示。

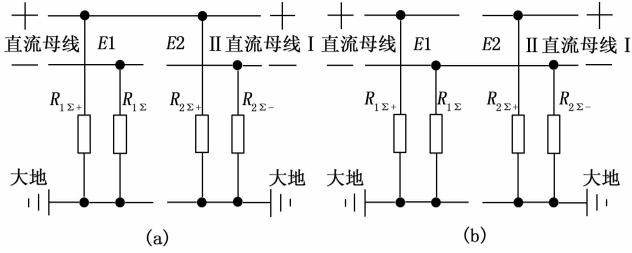


图 3 同极性互窜检测等效电路图

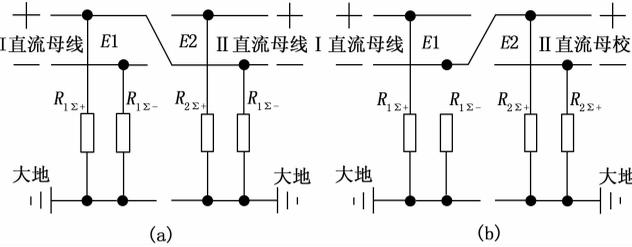


图 4 异极性互窜检测等效电路图

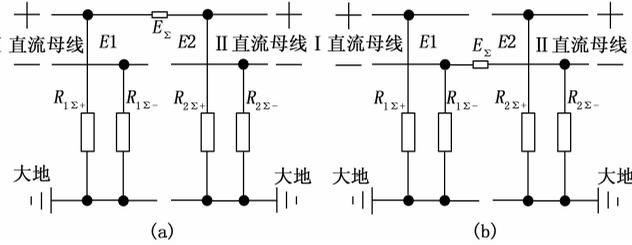


图 5 带阻抗同极性互窜检测等效电路图

带阻抗异极性互窜为在 I 段直流正极与 II 段直流负极或 I 段直流负极与 II 段直流正极通过电阻、线圈等连接在一起的互窜问题。其检测等效电路图如图 6 所示。

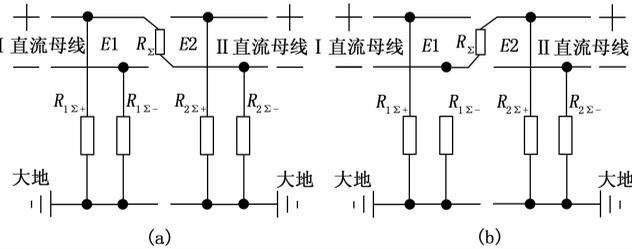


图 6 带阻抗异极性互窜检测等效电路图

以 I 段负母线与 II 段正母线之间互联阻抗 Z_{Σ} 为例，可以得到公式 (14)，即：

$$\begin{cases} U_1 = Z_{1+}i_1 + Z_{1-}(i_1 - i_3) \\ U_2 = Z_{2-}i_2 + Z_{2+}(i_2 - i_3) \\ (i_3 - i_1)Z_{1-} + (i_3 - i_2)Z_{2+} = (E_{1-}) - (E_{2+}) \end{cases} \quad (14)$$

经整理变形后，由公式 (15) 得到互联阻抗，即：

$$Z_{\Sigma} = \frac{U_{2+} - U_{1-}}{i_3} \quad (15)$$

其中： U 为母线电压， i 为流过回路的电流，下标 1 和 2 分别代表 I 段母线和 II 段母线，下标 + 和 - 分别代表正母线对地和负母线对地， i_3 为流过互联阻抗的电流。

2 装置设计

2.1 硬件设计

硬件构架示意图如图 7 所示，采用基于 ARM 32 位 Cortex™ - M3 微处理器 STM32F103VET6 芯片，具有 72MHz 最高主频、512kB FLASH 和 64kB SRAM 的存储空间、3 个 12 位 1 us 采样/保持 A/D 转换器和 13 个通讯接口 (2 个 I²C 接口、5 个 USATR 接口、3 个 SPI 接口、1 个 CAN 接口、1 个全速 USB 2.0B 接口和 1 个 SDIO 接口) 等，拥有实时性能优异、代码密度高、位带操作、可嵌套中断、低成本、低功耗等众多优势。硬件电路包括正负对地电压检测、正负对地电阻检测、人机接口、RS485 通讯、CAN 通讯、开关量输入检测、开关量输出控制、最小单元和辅助电源部分。

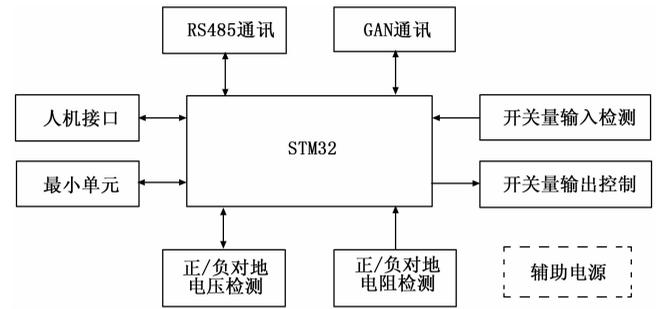


图 7 硬件构架示意图

绝缘检测采样电路如图 8 所示，模拟信号检测电路是将信息经调理电路转换为合适范围内的电平信号送入 STM32 的 A/D 端口，正负母线对地电压检测通过正负母线对地电压电阻比例分压，正负母线对地电阻检测通过组合桥的桥臂对地电阻比例变化值，然后经有源滤波、电压抬升和电压钳位，最后进入 STM32 的 12 位 A/D 引脚，用以计算、控制和显示。其中 $R_1 \sim R_3$ 、 $R_4 \sim R_7$ 为平衡桥电阻， $R_1 \sim R_2$ 、 $R_4 \sim R_6$ 为检测桥电阻，检测桥电阻为平衡桥电阻的部分电阻，形成了桥电阻的部分共用。 S_1 、 S_3 为检测桥开关，通过 STM32 完成桥电阻 R_3 和 R_7 的接入与断开，实现了不平衡状态的检测。 R_8 、 R_9 为补偿桥电阻，实现补偿电压值，通过 STM32 实现电阻的接入与断开，本设计分为两档采用两个开关， S_{21} 、 S_{22} 为补偿桥开关且统称为 S_2 。

人机接口采用触摸屏和指示灯，与 STM32 的 USART 引脚和 I/O 引脚连接，触摸屏为 3.5 英寸彩色液晶电阻触摸屏，实现指令与数据交换；指示灯为不同颜色的发光二级管，分别为绿色、红色和黄色，用来辨识装置的运行、故障和通讯状态。

通讯电路中 RS485 通讯和 CAN 通讯为双向的数据信号传输，STM32 的 USART 引脚和 CAN 引脚通过隔离转换电路 (光耦隔离和转换芯片)、瞬态防护、阻抗匹配和共模电感与其它设备通讯口通过屏蔽双绞线进行连接，具有较高的抗干扰能力。其中 RS485 通讯分别实现人机交互、后台 RTU、B 码对时；而 CAN 通讯则用于分机信息交互。

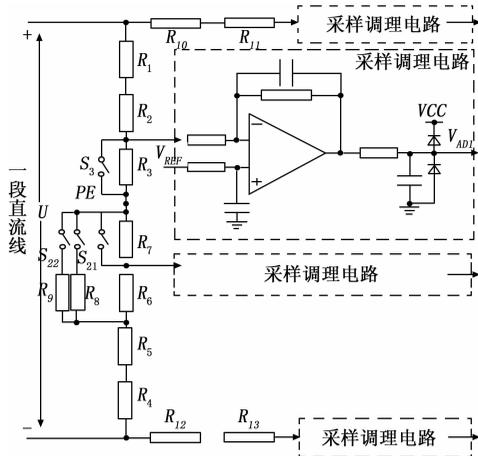


图 8 绝缘检测采样电路

开关量输入检测将无源干节点信号转换为有源高/低电平信号, 通过阻容滤波和光耦隔离进入 STM32 的 I/O 口, 实现两段直流母线的母联开关状态检测。开关量输出控制是通过 STM32 的 I/O 口发出的电平信号转换为合适功率以驱动固态信号继电器或者功率开关管的开通与关断, 为了增加驱动能力可以采用达琳顿管、小继电器驱动、光耦隔离和驱动芯片等方式, 从而实现检测桥电路的投切控制及输出隔离无源的干节点信号, 如图 9 所示。

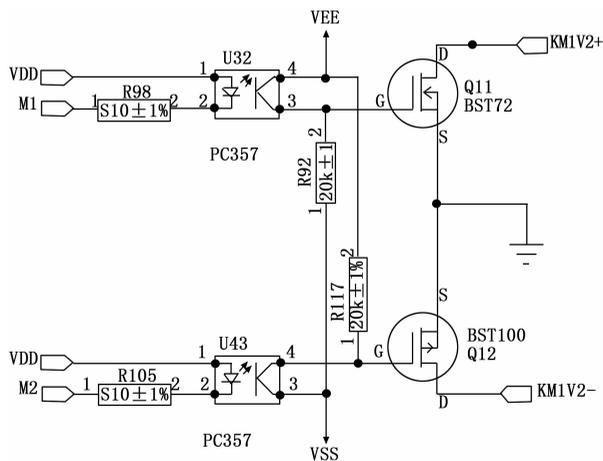


图 9 开关输出控制电路图

最小单元由 JTAG 接口、时钟晶振电路、复位电路、E²PROM 和 FLASH 组成。JTAG 为测试协议, 在线仿真调试及程序烧写; 时钟晶振电路为系统工作提供时钟信号, 通过初始化配置内部时钟寄存器得到, 晶振频率为 8MHz; 复位电路用于数据采集程序跑飞或者死机时, 为控制器提供重启; E²PROM 和 FLASH 提供数据存储, 采用 I²C 串行通信方式和 SPI 同步串行数据通信, 可以节省端口资源。

辅助电源的输入为标称 220V 或 110V 直流电, 输出为多路多电压隔离稳压电源, 目的为硬件电路的各芯片提供工作电压。

2.2 软件设计

软件构架示意图如图 10 所示, 通过 STM32F103 的数

据库来实现显示功能、设置功能、控制功能、测量功能、报警功能、预警功能、通讯功能和历史记录等功能。

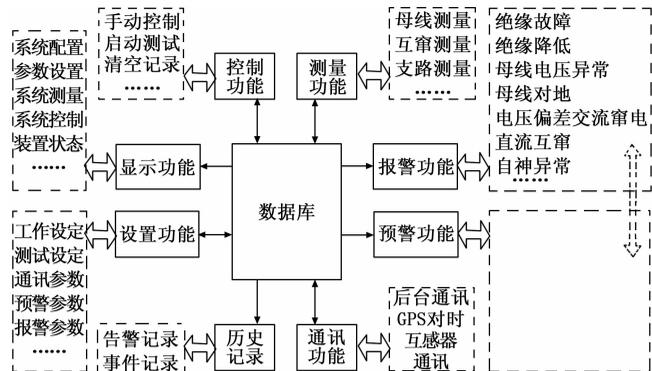


图 10 软件构架示意图

显示功能将装置分为几个功能框架单元进行显示, 例如系统配置、参数设置、系统测量、系统控制、装置状态和出厂测试等, 其中显示数值包括: 正负极对地电压值、母线电压值、交流窜入母线电压值、正负极对地绝缘电阻和母线对地电容容值等。而装置状态主要显示母线对地告警信息、支路告警信息、所接设备通讯状态和内存存储是否丢失等信息, 同时语言切换显示支持中、英、法、俄、西、葡 6 种语言。

设置功能包括报警参数、预警参数和工作设置等设置, 其中报警参数和预警参数的设置为了实现超出设定值时的报警和预警; 工作设置包括测试类型、联机设定、母线延时和母线段数等。控制功能包括手动控制、启动不平衡测试和清空记录等功能。

测量功能包括母线测量、互串测量、支路测量等; 其中母线测量显示母线相关测量的详细信息, 如上述显示数值内容; 互串测量显示母线互串的相关信息, 包括电阻、类型和方式; 支路测量显示装置所有有效支路的电流值和电阻值, 以及对窜入交流的支路和互串的支路进行定位。

报警功能与预警功能显示的信息相同, 但是设定的数值不同, 包括绝缘故障、绝缘降低、母线电压异常、交流窜电、直流互串和自身异常等。

通讯功能包括后台通讯、B 码对时和互感器通讯等。历史记录可以显示在过去发生的各种告警记录信息 (告警记录信息名称、开始时间、结束时间、初值和终值)、事件记录信息和记录信息总条数。

出厂测试包括对互感器的 ID 号输入、写入编号和读取编号, 通过对互感器进行编号写入, 装置根据编号自动识别互感器的 ID 号; 同时进行对多路互感器的自动校验以及对单互感器手动校验等功能。

软件程序使用 C 语言编写, 编译环境是 IAR 7.10 软件开发, 采用模块化设计思路, 各功能单元的程序相对独立, 有利于程序的移植、维护及升级, 装置的在线绝缘检测部分软件程序流程如图 11 所示。

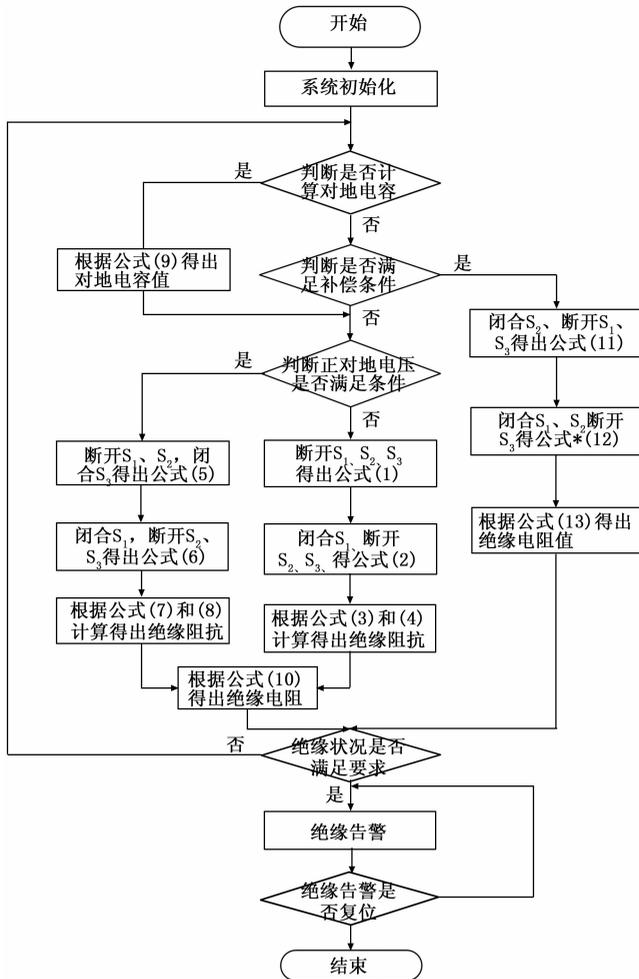


图 11 在线绝缘检测部分软件流程图

3 实验结果与分析

根据上述的系统结构及原理和软硬件设计，研制了 WZJ-31 微机直流绝缘监测装置，该装置主要应用于直流电源系统中。

表 1 绝缘电阻测量结果

模拟绝缘故障 接入电阻/kΩ		实时绝缘故障 接入电阻/kΩ		相对误差(%)	
正母线	负母线	正母线	负母线	正母线	负母线
10.00	10.00	10.1	9.9	1.00	-1.00
50.00	50.00	50.1	49.6	0.20	-0.80
100.00	100.00	100.7	98.6	0.70	-1.40
200.00	200.00	204.2	197.6	2.10	-1.20

将正负极对地之间接入电阻，接入电阻测量值与实际值的相对误差很小，如表 1 所示，其测量数据的相对误差可以控制在 2.5% 以内，完全满足文献 [12] 中 5% 的误差要求。

将正负极对地之间接入电容，装置能够检测其容值，施加的标称电容值与显示值的误差较小，误差可以控制在 ±10.0% 以内，如表 2 所示。

表 2 母线对地电容测量结果

模拟接入分布 电容/μF		实时接入分布 电容/μF		相对误差(%)	
正母线	负母线	正母线	负母线	正母线	负母线
5	5	5.1	5.1	2.00	2.00
63	33	64.0	32.8	1.59	-0.61
126	96.4	130.5	97.2	3.57	1.59
192.3	273.3	203.1	287.2	5.62	5.09

表 3 交流窜入母线测量结果

模拟接入单相 交流/V		实时接入单相 交流/V		相对误差(%)	
正母线	负母线	正母线	负母线	正母线	负母线
10.00	5.00	10.0	4.9	0.00	-
50.00	50.00	49.9	50.2	-0.20	0.40
100.00	100.00	99.9	99.7	-0.10	-0.30
242.00	220.00	241.8	219.9	-0.08	-0.05

将单相交流电的 L 接正负极，N 接大地，施加的电压值与显示值的误差较小，误差可以控制在 ±2.0% 以内，如表 3 所示。

4 结论

本文提出了基于组合桥的在线绝缘检测方法，结合 STM32 控制器设计了装置的硬件电路及软件构架，研制了在线式绝缘监测装置，通过实验数据表明，该方法所测得的绝缘电阻、母线对地电容和交流窜入电压值等均在允许误差范围内，覆盖了直流电源系统绝缘报警和绝缘预警的各种故障现象，实现了交流窜入、直流互窜、电容测量、绝缘预警、母线对地电压补偿和装置自检等功能，尽量做到了无检测死区，大量的站用直流电源系统现场运行表明了其可行性、有效性和准确性。

参考文献:

- [1] 成林俞, 戴瑜兴, 熊书华, 等. 直流系统在线绝缘监测的研究及其实现 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29 (6): 860-865.
- [2] 周 军, 朱博楠, 杨圣强, 等. 基于动态差值法的直流系统绝缘监测技术 [J]. 电工技术学报, 2015, 30 (1): 235-240.
- [3] 黎安伟. 基于 RC 电路的直流支路漏电定位检测技术 [J]. 测控技术, 2017, 36 (7): 142-145.
- [4] 陈龙驹. 龙滩电厂典型直流接地故障的分析与处理 [J]. 水力发电, 2017, 43 (4): 35-37.
- [5] Wang BC, Yin Q, et al. Research on the insulation monitoring devices for DC power system based on the technology of AC injection [A]. Proceedings of The 2015 2nd International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA 2015) [C]. Guangzhou, 2016: 106-109.
- [6] 吴 鸣, 刘海涛, 陈文波, 等. 中低压直流配电系统的主动保护研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 (4): 891-899.