

基于现场总线的分布式 直流系统接地在线监测装置设计

李立伟¹, 刘险峰², 刘 斌²

(1. 青岛大学 自动化工程学院, 山东 青岛 266071;

2. 大连理工大学 电气工程与应用电子技术系, 辽宁 大连 116024)

摘要: 采用了一种常态下利用双不对称电桥实时监测直流系统绝缘的方法, 解决了正负母线绝缘均按比例下降时失效的问题。并在低频信号注入法的基础上提出了双变频测量法, 测量各支路的接地电阻值, 从而判断出故障支路, 解决了低频信号注入法容易受到直流系统支路中存在的对地分布电容的影响问题。详细介绍了基于现场总线的分布式接地监测系统的设计与实现方法, 每个前置采集单元就近检测一定数量的支路接地电阻, 并通过 CAN 总线互连, 将检测数据上传到集中处理单元。实验和现场运行表明该系统布线少、配置灵活、测量精度高、支路接地故障定位的准确率高及抗干扰能力强。

关键词: 直流系统; 接地监测; 双不对称电桥; 双变频测量法; 分布式

中图分类号: TP 277

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2006)12-0055-04

0 引言

发电厂、变电站的直流供电系统是控制和信号系统、继电保护及自动装置的工作电源, 对保障电力系统安全运行十分重要, 这就要求直流系统及其供电网络必须具有高可靠性。现场运行经验表明, 直流接地的故障率一直位于电气故障率的首位, 它给电力系统的安全运行带来十分严重的潜在危害^[1-3]。

目前, 发电厂、变电所广泛使用的直流绝缘监测装置是利用一种对称的直流电桥, 当直流系统某一母线绝缘下降时, 破坏了电桥的平衡, 通过检测电桥的不平衡程度反映直流系统的绝缘状况^[4]。它只能反映正、负母线对地绝缘的不平衡程度, 并不能反映绝缘水平, 当正、负母线绝缘均匀下降时, 装置失灵; 当正、负母线绝缘不均匀下降但都下降时, 装置也不能正确反映正、负母线的绝缘状况。

低频信号注入法是目前比较常用的直流系统接地故障检测方法, 但是当直流系统存在较大的对地电容时往往不能准确检测出接地故障支路^[1-3]。

目前, 市场上的绝缘监测仪都为集中式, 存在以下缺陷:

- a. 所有被测信号都引入系统主机, 系统布线非常复杂;
- b. 所有信号都由主机集中处理, 降低了整个系统的可靠性;
- c. 所有测量控制线都必须连接到主机, 所以引线比较长, 容易引入干扰;
- d. 系统的可扩展性差, 效率低下, 制约了直流母线的运行方式。

为解决上述问题, 本文提出了基于现场总线的分布式直流系统接地在线监测装置, 采用双不对称电桥实时监测母线绝缘状态; 采用双变频测量法测量各支路的接地电阻值, 从而判断出故障支路。

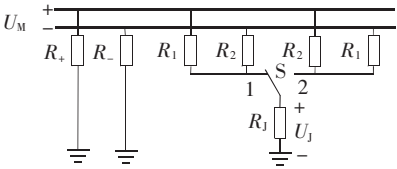
1 测量原理

1.1 母线绝缘状态实时监测

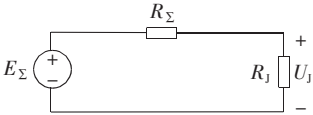
本文采用双不对称电桥实时监测母线绝缘状态, 如图 1(a)所示。图中 R_+ 、 R_- 分别代表直流系统正、负母线对地绝缘电阻; R_1 、 R_2 和 R_J 为桥电阻, $R_1 \neq R_2$; U_M 为正、负母线间电压, U_J 为 R_J 上的电压。

当开关 S 连接到 1 端时, 应用戴维南定律可得图 1(a)等效电路如图 1(b)所示, 其中

$$R_{\Sigma} = R_1 // R_2 + R_+ // R_-, \quad E_{\Sigma} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_-}{R_+ + R_-} \right) U_M$$
$$U_{J1} = \frac{E_{\Sigma}}{R_{\Sigma} + R_J} R_J = \frac{R_2 / R_1 + R_2 - R_- / R_+ + R_-}{R_1 // R_2 + R_+ // R_- + R_J} U_M R_J \quad (1)$$



(a) 测量原理



(b) 等效电路

图 1 双不对称电桥测量原理
Fig.1 Schematic diagram of double asymmetrical bridges

当 S 连接到 2 端时,同理可得:

$$U_{j2} = \frac{R_1 / (R_1 + R_2) - R_- / (R_+ + R_-)}{R_1 // R_2 + R_+ // R_- + R_j} U_M R_j \quad (2)$$

式(1)减式(2)得:

$$U_{j1} - U_{j2} = \frac{(R_2 - R_1) / (R_1 + R_2)}{R_1 // R_2 + R_+ // R_- + R_j} U_M R_j \quad (3)$$

由式(3)可得:

$$R_+ // R_- = \frac{U_M R_j (R_2 - R_1)}{(U_{j1} - U_{j2}) (R_1 + R_2)} - R_1 // R_2 - R_j \quad (4)$$

$R_+ // R_-$ 反映了直流系统的对地绝缘状况,通过采样电压 U_{j1} 、 U_{j2} ,可以利用式(4)定量检测直流系统的对地绝缘,无论对于正、负母线绝缘的均匀下降、不均匀下降还是单母线接地,式(4)都是正确的。

1.2 接地支路定位

本文采用双变频测量法进行接地支路定位。若直流系统中某支路出现接地故障,接地电阻值为 R ,该支路的等效分布电容为 C ,则其等效电路如图 2 所示。在直流母线与地之间分别注入幅值为 U 、频率为 f_1 和 f_2 ($f_2 > f_1$) 的低频正弦波信号,用小电流互感器测得接地点所在支路的电流信号。互感器测得的电流 I_f 由接地电阻 R 上电流 I_R 与分布电容 C 上电流 I_C 两部分组成。

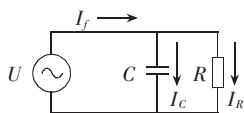


图 2 直流接地等效电路
Fig.2 Equivalent circuit of DC grounding

当注入信号频率为 f 时,互感器测得的电流为

$$I_{f1} = U / R + j2\pi fCU \quad (5)$$

低频信号电压幅值 U 保持不变,而信号频率变为 kf ($k > 1$),则测得电流为

$$I_{f2} = U / R + j2\pi kfCU \quad (6)$$

由式(5)(6)可求出阻性电流值为

$$I_R = \frac{U}{R} = \sqrt{\frac{(k^2 |I_{f1}|^2 - |I_{f2}|^2)}{k^2 - 1}} \quad (7)$$

式(7)说明,在低频信号幅值不变的前提下,测量出某一支路 2 种频率下的电流幅值,可间接地获得流过该支路接地电阻的电流值 I_R ,从而得到接地电阻的值 R 。

2 系统结构框图

系统结构框图如图 3 所示,主要由集中处理单元和前置采集单元组成。每个前置采集单元就近检测

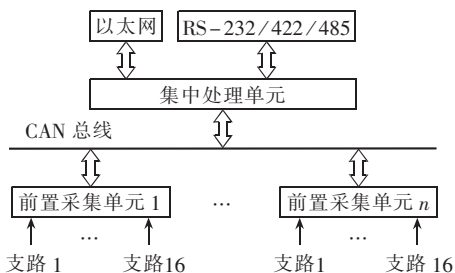


图 3 系统结构框图

Fig.3 Block diagram of system structure

一定数量的支路,通过 CAN 总线将其互连,然后连接到集中处理单元上,从而实现了直流系统绝缘的分布式实时监测。

集中处理单元可准确测量正、负母线的接地电阻,各支路接地电阻,母线间电压以及正、负母线的对地电压等,并通过大屏幕液晶显示出上述值,同时带有语音报警指示、报警信号输出。集中处理单元带有以太网和 RS-232/422/485 接口,可以直接接入变电站以太网,也可通过 RS-232/422/485 接口,由传输设备或其他自动化设备将信息传送到远方的信息中心。

3 集中处理单元设计

集中处理单元主要包括单片机 MC68332 及其外围电路,外部 RAM、外部 Flash ROM 扩展、复位电路、SPI 片选扩展、历史数据存储电路、实时时钟、环境温度测量、母线电压及对地绝缘电阻测量、变频信号发生器、以太网接口、RS-232/422/485 接口、CAN 总线接口、语音告警、薄膜按键及 LCD 显示等。

3.1 硬件设计

3.1.1 单片机 MC68332

MC68332 是 Motorola 公司生产的 32 位单片机,具有卓越的数据处理能力和强大的外围子系统。它采用全静态、高速互补 CMOS 技术,由 CPU32、定时处理单元 TPU、队列串行模块 QSM、系统控制模块和 RAM 等组成^[5-7]。

3.1.2 直流母线电压、对地绝缘电阻的测量

由于母线电压是对地绝缘的,为了跟对地电阻测量共用同一套测量电路,这里选用了 LEM 公司的电压传感器 LV25-P。LV25-P 是应用霍尔原理的闭环电流传感器,原边与副边之间是绝缘的。

使用时原边串联一限流电阻 R_1 ,额定电流为 10mA,这时副边对应电流为 25mA,在副边接一测量电阻 R_2 可将电流信号转换为电压信号 U_m ,通过测量 U_m 即可得到直流母线电压 U_M 。

模拟量测量电路框图如图 4 所示。为了方便隔离,采用了高精度同步 V/F 转换器 AD652。

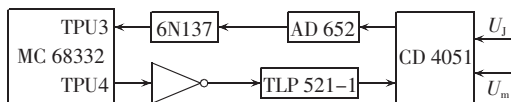


图 4 模拟量测量框图

Fig.4 Block diagram of analog measurement

测量出 U_M 、 U_{j1} 、 U_{j2} 后,由式(4)即可求出母线对地绝缘电阻。

3.1.3 变频信号发生器

低频信号发生器通常实现方法有 2 种:模拟式和数字式。模拟式的特点是电路比较简单,但是当输出频率很低时,需要很大的电解电容,会产生较大的频率漂移,而且改变输出频率需要改变电阻、电容等元件的参数值,调整比较麻烦;而数字式电路相对

比较复杂,但产生的频率信号非常准确,改变频率较简单。为此,这里采用数字式信号发生器 ML2036。

ML 2036 是 Fairchild 公司推出的可编程输出频率单片集成过零正弦波发生器,无需外部元件。通过串行 SPI 数字接口编程输出 DC ~ 50 kHz 之间的任意频率,满量程分辨率 1.5 Hz,通过降低输出频率范围可以提高分辨率,能够提供 $\pm U_{ref}$ 或 $\pm U_{ref}/2$ 的电压输出幅度,是低频率、低成本正弦波应用的理想选择。

3.2 软件设计

为提高软件的可读性和编程效率,采用 ANSI C 高级语言和模块化程序设计。通过 BDM 方式在 SDS 7.4 集成环境中实现在线仿真调试,大幅提高了编程和调试效率^[5-7]。软件主要包括主程序模块、通信处理模块、系统维护模块、键盘显示模块、数据采集及处理模块等。

主程序模块主要完成系统的上电初始化、定时任务的处理及系统告警的检测及处理等;通信处理模块主要完成集中处理单元与前置采集单元之间的通信和集中处理单元与上位机之间的通信等;系统维护模块主要完成模拟量的整定、报警定值的设定、通信参数的设定及液晶画面的更改等;键盘显示模块主要完成键盘的扫描处理和系统数据的实时显示;数据采集及处理模块主要完成环境温度、直流母线电压、母线对地电压及对地绝缘电阻的检测。

4 前置采集单元设计

前置采集单元的结构框图如图 5 所示,主要包括单片机 C8051F 041、时钟电路、复位电路、维护串行口、CAN 总线接口、LED 指示、多路模拟开关、前置放大、程控低通滤波及 ADC 偏移电路等。

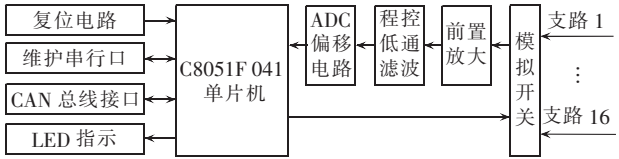


图 5 前置采集单元结构框图
Fig.5 Block diagram of front-end unit structure

4.1 硬件设计

4.1.1 单片机 C8051F 041

C8051F 041 单片机是 Cygnal 公司生产的高速、低功耗、多功能的 8 位单片机,向下完全兼容 80C 51 单片机^[1]。在该前置采集单元中,利用片内 A/D 转换器实现支路接地电阻的检测;利用片内电压基准实现 ADC 偏移;利用片内温度传感器实现温度检测;利用 I/O 口实现直流支路馈线开关状态的检测;利用片内 CAN 接口实现与集中处理单元的通信;利用片内串行口实现系统测试、维护及程序的在线更新等。由此可见,采用 C8051F 041 单片机单个芯片即可完成系统的控制和检测,简化了系统硬件设计、降低了系统成本。

4.1.2 程控低通有源滤波

由于变电站和发电厂内电磁干扰较严重,而直流系统的充电机也会产生高频谐波,因此需要对干扰信号进行抑制,从而提高整个系统的信噪比。在此,选用了 Maxim 公司生产的可编程开关电容滤波器芯片 MAX 291^[8-9]。

当注入到直流母线的低频信号频率改变时,需要相应地改变 MAX 291 的转折频率。当注入信号频率分别为 5 Hz 和 15 Hz 时,取滤波器转折频率分别为 15 Hz 和 45 Hz,利用 C8051F 041 单片机 PCA 的频率输出模式,在 CEX0 脚上分别产生频率为 1 500 Hz 和 4 500 Hz 的方波信号即可。

4.1.3 可编程增益放大器

由于该采集单元输入的动态范围较大,为提高测量精度,采用了 C8051F 041 单片机片内的可编程增益放大器,通过 ADC0 配置寄存器即可方便地调整放大器增益,增益可在 0.5、1、2、4、8、16 之间选择。

4.1.4 接地电阻计算

根据交流电量的采样算法,采样点应均匀分布在 1 个信号周期内,即实现严格的同步采样,否则会带来较大的测量误差。为简化系统硬件设计,充分利用 C8051F 041 单片机的片上资源,这里采用了软件同步方法,即在 1 个信号周期内通过定时器中断均匀采样 32 点,根据有效值计算公式(8)即可计算出信号有效值^[9]。

$$I=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^ni(k)^2}$$

(8)

分别测量出某一支路在 2 种频率下的电流幅值 I_{f1} 、 I_{f2} ,通过式(7)即可得到支路接地电阻值 R 。

4.2 软件设计

系统软件主要完成 2 方面功能,一方面实现支路接地电阻的检测,另一方面将检测数据通过 CAN 总线上传到集中处理单元。

考虑到软件的可移植性、以后的功能升级及调试的方便,采用 C 51 高级语言编程,并采用模块化程序设计。在 Keil μ Vision 2 集成环境中编辑、编译、连接后,通过 JTAG 方式实现在线仿真调试,调试后通过 JTAG 接口将调试好的程序下载到 C8051F 041 单片机的 Flash 中,大幅提高了编程和调试效率。软件主要包括主程序模块、支路接地信号采样模块、支路接地电阻计算模块、CAN 通信处理模块及串行口维护模块等。

5 实验与应用

经实验和现场运行测试表明,母线接地电阻测量误差 < 6 %,支路接地电阻测量误差 < 7 %,符合设计指标要求和实际工程需要。对单接地故障,正、负母线同等绝缘下降情况及多支路接地故障进行了实验,监测装置对接地故障的发现率、支路接地故障定位的准确率为 100 %。

6 结语

本文提出的基于现场总线的分布式直流系统接地监测装置,通过采用双不对称电桥,有效地解决了直流母线正、负极绝缘均匀下降时,不能正确监视系统绝缘的问题;通过采用双变频测量法,既保留了传统低频信号注入法测量精度较高的优点,又克服了由于直流系统分布电容影响使接地检测分辨率降低的缺点。现场运行表明,该装置具有接线简单、配置灵活、在线测量速度快、测量精度高、抗干扰能力强、可靠性高、人机界面友好及智能化程度高等显著优点,值得进一步推广。

参考文献:

- [1] 李立伟,邹积岩. 直流系统接地电阻检测仪的研究与实现[J]. 测控技术,2002,21(10):27-29.
LI Li-wei,ZOU Ji-yan. Research and realization of the insulating resistance measuring instrument in DC system[J]. Measurement & Control Technology,2002,21(10):27-29.
- [2] LI Li-wei,ZOU Ji-yan,SUN Hui. Research and realization on the DC system grounding fault detector[C]//6th International Symposium on Test and Measurement. Beijing:World Publishing Corporation,2005:7444-7447.
- [3] 李冬辉,史临潼. 小波理论在直流系统接地故障检测中的应用[J]. 继电器,2004,32(21):29-33.
LI Dong-hui,SHI Lin-tong. Method for detecting DC system grounding fault based on wavelet transform[J]. Relay,2004,32(21):29-33.
- [4] 杨伟,张俊芳. 微机选线式直流系统绝缘监察装置的研究[J]. 电力自动化设备,2000,20(4):19-21.
YANG Wei,ZHANG Jun-fang. Research on direct current system insulation supervisory device with microcomputer line detection[J]. Electric Power Automation Equipment,2000,20(4):19-21.
- [5] 李立伟,邹积岩. 蓄电池内阻测量装置的研究[J]. 电源技术,2003,21(1):42-44.
LI Li-wei,ZOU Ji-yan. Research on the internal resistance measuring device for battery[J]. Chinese Journal of Power Sources,

- 2003,21(1):42-44.
- [6] 李立伟,邹积岩. 蓄电池放电能量并网装置[J]. 电力系统自动化,2003,27(6):80-83.
LI Li-wei,ZOU Ji-yan. An instrument for connecting the discharge energy of battery to power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(6):80-83.
- [7] 李立伟,邹积岩. 蓄电池在线监测系统的设计与实现[J]. 电工技术杂志,2002,21(11):7-9.
LI Li-wei,ZOU Ji-yan. Design and realization of battery on-line monitoring system[J]. Electrotechnical Journal,2002,21(11):7-9.
- [8] 张宇华,王晓琳,张国雄. 电容测微仪动态特性的改进及标定方法[J]. 北京理工大学学报,1999,19(1):87-91.
ZHANG Yu-hua,WANG Xiao-lin,ZHANG Guo-xiong. Improvement and calibration methods of the dynamic characteristics of capacitance micrometers[J]. Journal of Beijing Institute of Technology,1999,19(1):87-91.
- [9] 李立伟,邹积岩. 新型双钳口接地电阻在线测量仪[J]. 电力系统自动化,2003,27(14):83-86.
LI Li-wei,ZOU Ji-yan. A new grounding resistance on-line measuring instrument with double jaw[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(14):83-86.
- [10] 林森,关明. 变电所自动化系统的抗干扰措施[J]. 电力自动化设备,2005,25(12):67-69.
LIN Sen,GUAN Ming. Anti-jamming measures of substation automation system[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(12):67-69.
- [11] 谢远圆. 提高变电站监控系统可靠性[J]. 电力自动化设备,2005,25(6):99-101.
XIE Yuan-yuan. Improving substation monitoring system reliability[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(6):99-101.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

李立伟(1970-),男,山东潍坊人,工程师,博士,主要从事电力系统的智能检测和状态维修等方面的研究(E-mail: ytlw@163.com);

刘险峰(1967-),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事配电自动化等方面的研究;

刘斌(1969-),男,辽宁大连人,博士研究生,主要从事同步开关等方面的研究。

Distributed on-line grounding monitoring system for DC system based on field bus

LI Li-wei¹,LIU Xian-feng²,LIU Bin²

(1. Qingdao University, Qingdao 266071, China;

2. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A new method is adopted to real-timely monitor DC system insulation, which applies double asymmetrical bridges to keep it effective when positive and negative pole insulations drop in same proportion. Additionally, double-frequency measurement based on low-frequency signal injection is put forward for branch grounding resistance measurement in faulty branch selection to avoid the influence of the distributed grounding capacitance of DC system on low-frequency signal injection. The design and realization of field bus-based distributed grounding monitoring system are introduced. The front-end acquisition unit measures the nearby branch resistances and sends the data to the centralized processing unit via CAN bus. Experiments and actual field operations show its less wiring, flexible configuration, high measurement precision, high veracity of faulty branch locating, and strong anti-interference capability.

Key words: DC system; grounding monitoring; double asymmetrical bridges; double-frequency measurement; distributed type