

1.5 kV 直流电缆在线监测系统研制

徐 鹏, 曾 奕, 江秀臣

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

Development of an On-line Monitoring System of 1.5 kV DC Cable

XU Peng, ZENG Yi, JIANG Xiu-chen

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

摘要: 设计了一套应用于 1.5 kV 直流电缆的绝缘在线监测系统,详细阐述了其工作原理、硬件组成及软件设计方案。该系统通过监测直流电缆局部放电和泄漏电流,来综合评估直流电缆绝缘状况。现场运行结果表明,该系统稳定、可靠,能够准确评估直流电缆绝缘状况。

关键词: 在线监测系统; 直流局部放电; 泄漏电流

中图分类号: TM855

文献标识码: A

Abstract: An on-line monitoring system of 1.5 kV DC cable is designed in this paper. The operation principle, hardware structure and software plan are explained. This system can evaluate the insulation condition of the DC cable by monitoring DC partial discharge and leakage current. The results show that the system runs steadily and reliably, and the system can estimate the insulation status of the DC cable accurately.

Key words: on-line monitoring system;

DC partial discharge; leakage current

1 引言

电力电缆是电力系统中非常重要的设备,随着对供电可靠性要求的不断提高,监测电缆绝缘状况,保证电缆可靠供电已经成为了目前电力系统急需解决的问题。当前国内外对交流电缆的在线监测方法都做了很多研究,如直流分量法、直流叠加法、 $\tan\delta$ 法、局部放电检测法以及接地电流法和低频分量法等^[1],并且也开发出了一系列的在线监测装置,取得了一定效果。但对直流电缆,在这方面的研究还相对较少。虽然由于绝缘材料在交流和直流情况下表现出的特征不一致,但交流电压电缆的在线监测方法用在直流电压电缆在线监测上,在理论上仍然是可行的,只是电缆老化程度的判据和数学分析模型有

所区别^[2],因此可以借鉴交流电缆在线监测的相关方法来研究直流电缆的在线监测问题。根据以上各种交流电缆在线监测方法的工作原理和所要监测的直流电缆的特征,该系统采用局部放电法和泄漏电流法对直流电缆进行在线监测。

2 在线监测系统总体方案

该系统通过监测直流局放和泄漏电流信号综合评估电缆绝缘状况,系统整体结构见图 1。

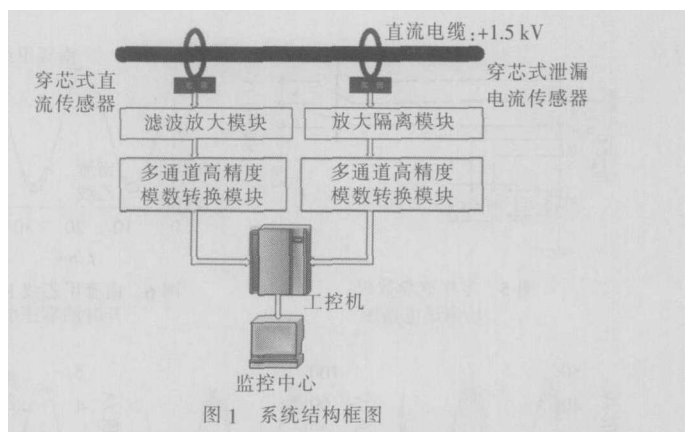


图 1 系统结构框图

通过传感器得到的直流局放和泄漏电流的模拟信号经过滤波、放大后,经模数转换模块输入前端工控机数据采集处理系统。数据采集处理系统对采集到的数据进行处理统计,存入数据库。后台服务器上的监控管理系统经过对历史数据的分析,评估电缆绝缘状况。

3 监测系统工作原理及硬件组成

3.1 直流局放信号检测模块

局部放电对于检测电缆局部缺陷是很有价值的,

收稿日期:2005-09-08; 修回日期:2005-10-14

作者简介:徐 鹏(1977-),男,硕士研究生,主要从事电力设备在线监测方面的研究。

即使在个别位置上出现较强烈的局部放电也可能会导致电缆的击穿^[1]。当局部放电发生时,除电信号外,同时会产生声、光、热等非电信号。相应的,对于局部放电的检测方法就有脉冲电流法、超声波法、光学法、测温法等。实践中发现,脉冲电流法比其它方法更为灵敏^[1]。同时,考虑到现场条件,电缆无铠装、直埋,因此该系统采用宽频带技术与传统脉冲电流法相结合的方法对直流电缆局部放电信号进行检测。

直流局放信号检测模块的硬件结构见图 2。传感器感应到的信号经放大、滤波处理后,输入数据采集模块。

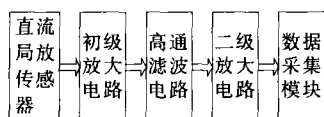


图 2 直流局放信号采集模块硬件结构框图

在该系统中采用宽频带罗柯夫斯基线圈型电流传感器作为直流局放传感器,传感器直接套在被测电缆上,与电缆之间无直接的电气连接,故安装方便,能较好的抑制噪声^[3]。传感器传递函数的幅频特性见图 3。对频率为 1~9 MHz 之间的信号具有良好的传输特性。

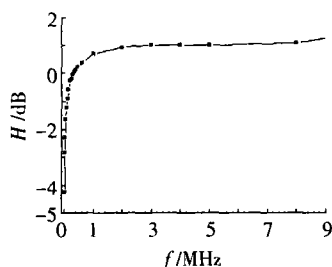


图 3 直流局放传感器传递函数的幅频特性

监测系统从传感器耦合到的信号较弱,为了方便后续处理,首先对信号进行初级放大。

所测数据表明,现场周期性窄带干扰较强,频率范围在 600 kHz~1.5 MHz。为了抑制这部分周期性窄带干扰,提高检测信号的信噪比,在初级放大后,对信号进行高通滤波处理,滤掉大部分周期性窄带干扰。

对滤波后的信号进行二次放大,以提高信号的传输能力。

数据采集模块采用最高采样频率为 20 MS/s 的 PCI 数据采集卡。采集卡共有 20 个相互独立的采集通道;采集卡单次最大采样长度为 4 兆个采样点(4 MS)。采集卡工作原理见图 4。各采集通道用同一时钟触发电路来同步,以保证各通道同时触发、同时记录。采集通道把采集到的数据经 A/D 转换后存入各自的存储器,由 CPU 通过系统总线来读取指定通道的数据。

3.2 泄漏电流信号检测模块

由于现场电缆无铠装,电缆绝缘层外没有屏蔽

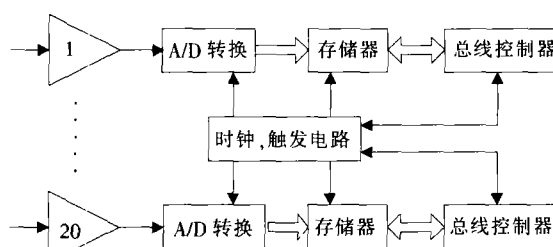


图 4 直流局放数据采集卡工作原理图

层,因而无法采用传统的通过检测金属屏蔽层对地电流的方法来测量电缆的泄漏电流。鉴于现场电缆工作情况,当电缆无负荷时,其上仍加有 1.5 kV 直流电压,这时电缆中会有较小电流流过,该电流即为泄漏电流。因此该系统中采用基于磁平衡原理的穿芯式直流小电流传感器直接套在电缆出线处,采用无介入式的方法来检测,此时电缆中流过的电流,即为泄漏电流。

由于在电缆绝缘状况正常的情况下,泄漏电流很小,对传感器准确度要求较高,这就使得传感器的额定输入不能过大,因此泄漏电流传感器额定输入电流为 100 mA。传感器线性度见图 5。

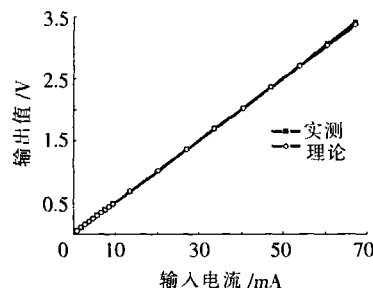


图 5 泄漏电流传感器线性度

当电缆带负荷运行时,电缆中会有较大电流通过,若此时传感器仍在工作,会因输入电流过大而损坏,因此在该系统中使用一个继电器来控制传感器,在电缆无负荷时间段内,通过继电器给传感器供电,使其工作;当电缆带负荷运行时,切断供电,使其停止工作。

传感器感应得到的信号经隔离放大后输入数据采集模块。

泄漏电流数据采集模块采用具有 12 位分辨率的 PCI 数据采集卡,最高采用速率为 100 KS/s。工作原理见图 6。采集卡具有 32 个相互独立的采集通道,使用同一时钟触发电路以保持同步;采集卡自身具有 4 k Byte 的 FIFO 存储采集到的数据,当 FIFO 的一半存储空间存满数据时,采集卡产生中断信号,通知计算机读取数据。

4 监测系统软件设计方案

监测系统通过对信号的采集、处理、统计、分析,来评估电缆绝缘状况。整个系统由前端数据采集处理

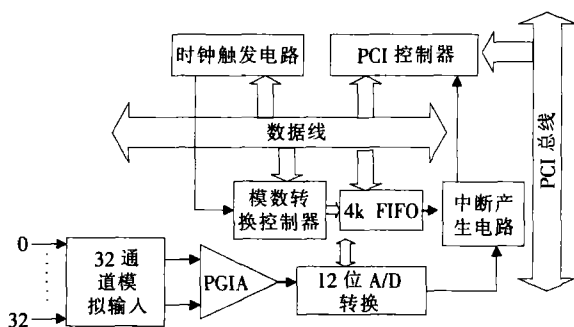


图6 泄漏电流数据采集卡工作原理图

单元和后台监控管理单元组成。数据采集处理单元为配置数据采集卡的工业控制计算机；监控管理单元为基于WINDOWS系统的服务器。整体结构见图7。

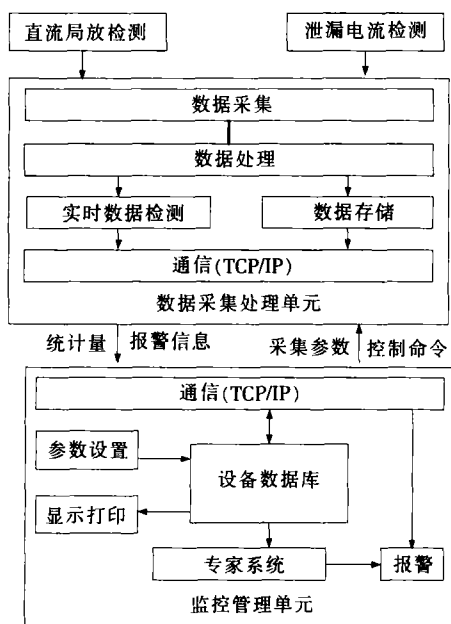


图7 系统软件结构图

数据采集处理单元主要负责数据的采集、处理和存储；分析实时数据，当发现直流局放信号或泄漏电流值过大时，通知后台监控管理单元发出报警信号。

监控管理单元主要负责对历史数据汇总、分析，经专家系统评估电缆绝缘状况；为用户提供设置采集、处理参数的界面；向前端数据采集处理单元发送命令，控制采集流程；发出报警信号；显示、打印数据报表和数据曲线。

监测系统对直流局放和泄漏电流信号分时采集，在电缆无负荷时间段内采集泄漏电流，不在这时间段内则采集直流局放，流程见图8。

直流局放信号以20 MS/s的频率采集，利用脉冲的上升沿触发，当有脉冲时，连续采集一段时间。

泄漏电流信号以100 Hz的频率采集，在设定时间内，先判断线路工作电流是否小于一设定值，若小于此值，表明电缆无负荷，开始采集泄漏电流。

前台工控机与后台服务器之间以基于TCP/IP

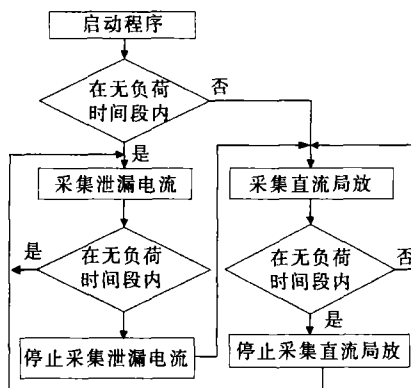


图8 信号采集流程

网络协议的Winsock进行通信。服务器向前台工控机发送采集控制命令；前台工控机向服务器发送采集到的数据及报警信息。

5 系统运行情况分析

5.1 在实验室对电缆模拟放电的监测

在实验室对从现场取回的故障电缆加以1.5 kV电压后，进行模拟放电，传感器直接套于故障电缆上，系统采集的放电信号见图9。表明该系统可以检测到直流局放信号。

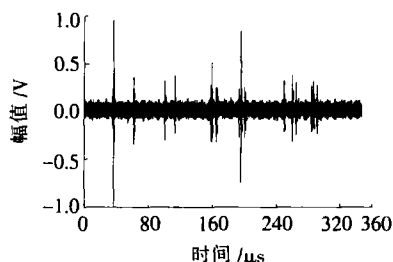


图9 直流局放信号时域波形

5.2 现场安装运行情况分析

研制的系统已于上海地铁一号线车辆段牵引变电站投入试运行。监测系统安装在变电站电缆夹层里，直流局放传感器及泄漏电流传感器套在电缆出线处，见图10。目前系统共监测变电站内15根电缆。根据监测系统运行原则，日间，电缆带负荷运行，这时电缆上有较大工作电流流过，监测系统关闭泄漏电流传感器，只监测直流局放信号；夜间，电缆无负荷，但1.5 kV直流电压仍加于电缆上，系统监测电缆泄漏电流信号。自投入日起，系统运行稳定。

由于电缆运行电压为1.5 kV，电压等级较低，根

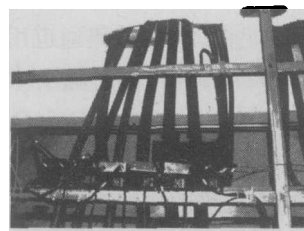
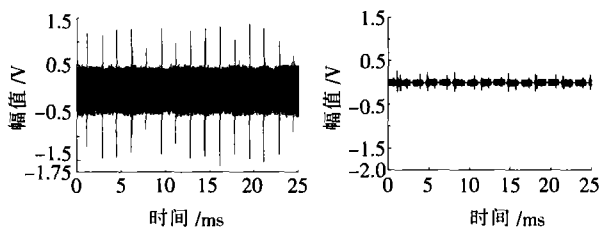


图10 现场安装图

据现场运行经验,电缆发生直流局放,泄漏电流变大,绝缘性能开始下降后,仍可安全运行一段时间(几天到十几天)。监测系统对现场采集到的直流局放和泄漏电流实时信号进行分析,并与历史数据进行对比,分析数据变化趋势,可作到提前预警。

现场对直流局放进行监测,采集到的原始信号时域波形见图11(a),主要为白噪声和周期性的脉冲干扰,对信号进行处理后时域波形见图11(b),没有发现直流局放脉冲信号。



(a)原始信号时域波形 (b)信号处理后时域波形
图11 现场直流局放监测信号

现场某日监测到的泄漏电流数据见表1,由此根据欧姆定理折算出的电缆对地绝缘电阻表明,被监测电缆绝缘状况满足运行要求。

6 结语

该系统通过监测直流电缆局部放电和泄漏电流来综合评估电缆绝缘状况。运行结果表明,该系统能

表1 现场监测到的泄漏电流数据

	最大值/ μA	平均值/ μA
NC21-1	43.6	41.8
NC21-2	47.2	45.9
NC21-3	35.7	32.1
NC21-4	44.3	42.7
NC21-5	38.4	37.6
NC21-6	43.5	43.2
NC22-1	52.3	51.4
NC22-2	49.4	48.3
NC22-3	33.0	32.3
NC22-4	33.6	31.4
NC22-5	42.5	40.3
NC22-6	37.7	35.9
NC31-1	29.1	27.5
NC31-2	37.5	34.8
NC31-3	32.4	30.1

满足1.5 kV直流电缆绝缘在线监测的要求。为直流电缆实现状态维修起到了有力的推动作用。

参考文献:

- [1] 严 璋. 电气绝缘在线检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] 杨 莉. 高压直流设备中局部放电的识别[J]. 高压电器, 1998, 34(3): 48-51.
- [3] 马翠姣. 局部放电检测用宽频带电流传感器的研讨[J]. 高压电器, 2001, 37(1): 24-26.

(上接第37页)

表1 干扰法的实测及计算结果

测量 次数	甲线 $Z_0/(\Omega/\text{km})$	甲线 $C_0/(\mu\text{F}/\text{km})$	乙线 $Z_0/(\Omega/\text{km})$	乙线 $C_0/(\mu\text{F}/\text{km})$
1	0.208 7+j0.761 6	0.009 183	0.187 4+j0.745 0	0.009 270
2	0.208 5+j0.766 4	0.009 003	0.193 1+j0.743 5	0.009 329
3	0.209 2+j0.758 6	0.009 020	0.190 5+j0.743 6	0.009 203
4	0.202 6+j0.759 1	0.008 951	0.192 4+j0.741 4	0.009 309
5	0.205 5+j0.769 3	0.009 305	0.192 3+j0.743 5	0.009 329

表2 增量法测量及计算结果

零序阻抗	甲线 $Z_0/(\Omega/\text{km})$	乙线 $Z_0/(\Omega/\text{km})$
南雁甲线	0.204 1+j0.756 5 ^①	0.1557+j0.401 6
南雁乙线		0.1914 j0.746 7 ^②

注:①为线路的零序自阻抗,其余为零序互阻抗。

CT/PT的过渡过程也会在二次侧的数据中出现衰减的非周期分量。

5 结语

笔者提出的基于简化的零序单相-地构成耦合传输线,干扰法测量零序波参数测量原理和方法,建立在严格的物理模型和数学推导的基础上,并通过

大连电网两条500 kV线路参数的现场测试验证有效。它简化了输电线路工频参数的测量工作并有利于提高测量准确度,尤其是对新建线路的测量十分有效。从测量过程看,该方法省时省力,对电网的安全运行没有影响,而且得到的零序参数结果完全满足工程要求。

参考文献:

- [1] 李建明,朱 康. 高压电气设备试验方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] 卢 明, 宁玉红, 马扶予,等. 架空输电线路工频参数的测量及分析[J]. 高压电器, 2004, 40(3): 218-226.
- [3] 陈允平, 王旭蕊, 韩宝亮. 互感线路零序带电测量的理论及其微机实现[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(2): 38-42.
- [4] 高厚磊, 江世芳, 贺家李. 利用卫星时间作基准的电力系统同步相量测量[J]. 电力系统及其自动化学报, 1995, 7(4): 34-36.
- [5] 胡志坚, 张承学, 陈允平. 基于GPS的线路参数带电测量方法[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 4-7, 18.
- [6] 胡志坚, 陈允平. 宁夏电网220 kV互感参数带电测量[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(17): 41-44.