

高压绝缘子污秽泄漏电流采集装置的设计与实现

周兴韬¹, 王 玮¹, 倪平浩¹, 迟作为², 姜复亮²

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 吉林供电公司, 吉林 吉林 132001)

摘要: 研制了一种高压输电线路绝缘子泄漏电流在线监测装置, 装置通过由高速运算放大器构成的电流电压转换电路, 可获得准确的工频泄露电流值和高频电流脉冲次数, 避免了脉冲信号频率带宽、电流范围大给电流传感器制作带来的困难。绝对值电路的应用优化了电路设计, 增大了泄漏电流的测量范围。分析了监测装置的测量误差, 提出了提高精度的方法, 测试结果表明装置具有较好的测量精度和良好的运行性能。

关键词: 污秽绝缘子; 泄漏电流; 误差分析; 性能测试

Design and implementation of a device for acquiring leakage current on polluted high voltage insulator

ZHOU Xing-tao¹, WANG Wei¹, NI Ping-hao¹, CHI Zuo-wei², JIANG Fu-liang²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Jilin Power Supply Corporation, Jilin 132001, China)

Abstract: A device for acquiring leakage current on high voltage insulator is designed and implemented in this paper. With the application of current-voltage conversion circuit composed by high-speed operational amplifiers, the times of high-frequency current pulse and the virtual value of the leakage current are gathered and the difficulties caused by making current sensor of broad pass-bandwidth and wide current range can be avoided. By using an absolute circuit, the design of circuit is optimized and the range of leakage current is widened. After analyzing the error of the device, a way to improve precision is presented in this paper. The test result shows that the device has high measurement precision and good capability.

Key words: polluted insulator; leakage current; error analysis; capability test

中图分类号: TM83 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)06-0100-04

0 引言

电力设备外绝缘污闪, 是阻碍电力系统安全运行的难题之一。及时掌握外绝缘污秽度, 是适时采取污闪措施的科学基础。国际大电网会议推荐了几种绝缘子污秽度的测量方法, 其中最大泄漏电流法和电流脉冲计数法反映了污闪全过程, 并能够在污闪发生之前测定出污秽严重程度并给予报警。电力载波、广播电波和输电线电晕脉冲等外来噪声的干扰, 以及泄漏电流自身幅值小、脉冲电流带宽是影响测量的主要问题, 因此设计抗干扰能力强的微弱信号处理电路从而精确测量绝缘子表面的泄漏电流和脉冲频次等信息成为在线监测绝缘子污秽的关键。

1 污秽泄漏电流特性

气候干燥时高压绝缘子沿面没有形成导电层,

位电压分布成马鞍形。空气相对湿度(RH)增大时, 污秽层的电导使工频的阻性电流构成泄漏电流 I_L 的主体。因此, 采集绝缘子表面阻性泄漏电流, 再综合温湿度等环境因素来判断绝缘子的污秽程度, 是一种非常可行而有效的方法^[1]。

当绝缘子表面污秽加剧到一定程度时, 则发生电晕放电现象, 即产生电晕脉冲电流, 绝缘子表面污秽越严重, 电晕程度越明显, 电流脉冲个数也越多。因此, 检测电晕脉冲电流的个数也可用于绝缘子运行状况的在线监测^[2]。

2 在线监测系统的结构

图1为污秽在线监测系统的主体结构。监测主机安装于杆塔上, 通过温湿度、风速风向等传感器获取当前的环境信息, 并且与安装于杆担上靠近绝缘子串的泄漏电流监测分机通过RS485进行通信, 主站通过GPRS通讯将所有的数据送到上位机的专

家诊断系统中, 通过对数据的分析给出污秽的预警信号。

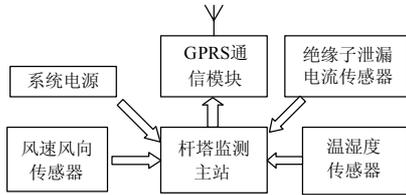


图 1 检测系统主体框架图

Fig.1 Main structure of the monitoring system

图 2 为绝缘子表面泄漏电流采样处理框图, 分别获取工频阻性泄漏电流的有效值和高频脉冲电流超过预定幅值的脉冲数, 通过 DSP 进行数据存储和发送。

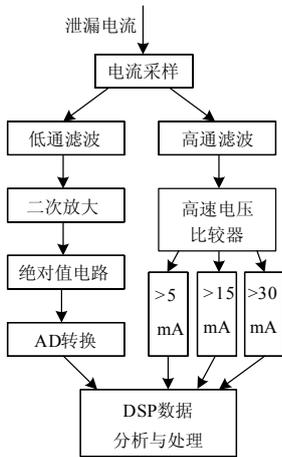


图 2 泄露电流采样处理流程图

Fig.2 Flow chart of leakage current acquiring and processing course

3 泄漏电流的采集

将截流环安装于被测绝缘子串最靠近杆塔的绝

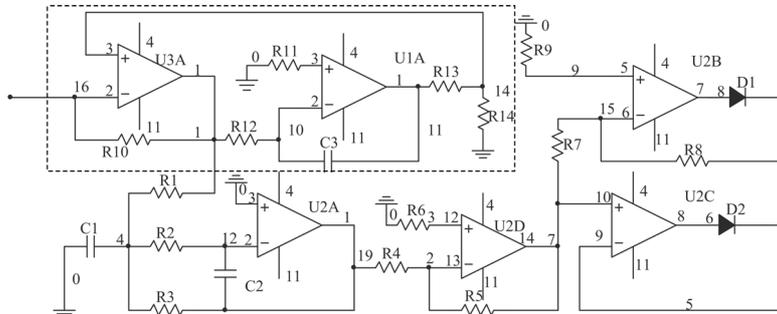


图 4 信号处理电路

Fig.4 Signal processing circuit

由于采集的泄漏电流中还有高频的电晕电流脉冲, 要有效地检测到这些脉冲, 就必须要求运放具有

缘子片表面, 截取绝缘子表面的泄漏电流, 为使得铜环与绝缘子表面充分接触, 安装时涂上导电胶, 也同时起到固定作用。截取的泄漏电流通过屏蔽绞线引到电流的采样处理部分。

采样以及电流电压转换部分如图 3 所示, 由于阻性泄漏电流的值很小, 范围一般在十几微安到几毫安之间, 而运算放大器在实际应用中, 共模抑制比 K_{CMR} 为有限值, 同时输入失调电压 V_{io} , 输入失调电流 I_{IO} 以及偏置电流 I_{IB} 等因数, 也会对微小的泄漏电流处理产生很大的影响。

图 3 中内部小三角为理想运算放大器, 大三角符号为实际运放的等效电路^[3], 经分析可得到输出电压 V_o 与输入电流 I_i 的关系:

$$V_o = I_i R + V_{io} - I_{IB}(R - R_s) + I_{IO}(R + R_s)/2 \quad (1)$$

当选择 $R = R_s$ 时, 式(1)变为

$$V_o = I_i R + V_{io} + I_{IO} R \quad (2)$$

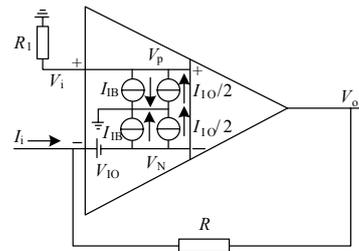


图 3 电流采集实际等效电路

Fig.3 Practical equivalent circuit of current

由此可见, 消除了输入偏置电流对泄漏电流的影响, 但依然存在失调电压与失调电流对泄漏电流转换的影响, 因此应选取低失调电压和低失调电流的运放。另外, 如图 4 虚线框中所示, 选择适当的电阻电容参数, 采取“直流伺服”电路形成反馈, 能完全消除由失调电压引起的直流量。

较高的转换速率和宽的频率响应。根据电晕电流脉冲的特性, 要求运放的单位增益带宽 $BWG > 20 \text{ MHz}$ 。

4 信号处理部分

电流电压转换后的信号，需要进一步转换成 DSP 能够处理和运算从而进行通讯的信号，因此设计高效的信号处理电路，成为泄漏电流采集系统极为重要的部分。

4.1 滤波器设计

由于阻性泄漏电流和高频脉冲电流的幅值和频率不同，需要对其分别设计低通滤波器和高通滤波器进行处理。

利用泄漏电流判断绝缘子的污秽程度需要关心电流的幅值而无需考虑电流的相位，因此，在设计低通滤波器时可以着眼于幅频响应，而不考虑相频响应。常用的巴特沃斯滤波电路在小于截止频率 ω_c 的范围内，具有最平幅度的响应，而在 $\omega > \omega_c$ 后幅频响应迅速下降。如图 4 所示的电路，所设计巴特沃斯滤波器其截止频率为 112 Hz，在工频 50 Hz 时，幅值不变。高频衰减很快，起到了很好的滤波作用。

同样，设计单电源的巴特沃斯高通滤波器，如图 4 中的电路所示，设计其截止频率为 500 kHz，使得高频电流脉冲等幅值地通过，从而起到了与工频泄漏电流的隔离。

4.2 二次放大与绝对值电路

滤波电路处理后为二次放大电路，在实际的应用过程中发现，放大电路是影响测量精确度的主要部分，尤其是直流特性的失调电压也会被等比例放大，同时失调电流和偏置电流也产生了一定的影响。根据图 3 中放大器的等效电路分析图 4 中的反向放大电路可知，输出电压的误差为：

$$\Delta V = (R_5 / R_4 + 1)V_{io} + I_{io}R_5 + (I_{IB} + I_{io} / 2)R_4 \quad (3)$$

按所检测电流最小 10 mA 计算，放大后电压最小理论值为 10 mV，将误差控制在 1% 时， $\Delta V < 0.1$ mV。

在判断污秽过程中，可以通过一段时间内泄漏电流大小的变化趋势来表征绝缘子串污闪的过程。对于泄漏电流大小，无需完全还原其各个时期的波形，这样不但数据量庞大，存储困难，而且对污闪的趋势的判断帮助也较小，因此，可以选择一次采集段的泄漏电流有效值作为该时间点的电流大小。

另外，AD 转换采用单电压单极性方式，转换范围为 0~2.5 V，因此，在 AD 转换时需设置一个 1.25 V 的参考电压，添加额外电路将范围为 -1.25~1.25 V 转换成 0~2.5 V。而采用图 4 中的绝对值电路^[4]，既不需要添加参考电压的，也使输入范围扩大到 -2.5~2.5 V，增大了泄漏电流采集的量程范

围，更能反映绝缘子的污秽变化状况。

4.3 AD 转换

AD 转换采用单电源 3.3 V 供电的 14 位串行转换芯片，采样速率为 116 ksp/s，在 2.5 V 的参考电压下，分辨率达到 0.16 mV，对应泄漏电流分辨率为 0.2 μ A，AD 转换具有很高的精度。通过 DSP 的外设串行接口模块 (SPI) 配置 AD 芯片的外部时钟、控制时序以及转换命令。当设置 SPI 波特率为 0.312 5 MHz 时，在 24 时钟转换时序的外部时钟模式下，采集一个点所要完成的包括接收启动转换命令、采样保持和串行发送数据总时间为 76.8 ns，对于工频阻性泄漏电流信号，一个周期 0.02 s，可连续采集大约 260 个点，完全满足采样定律，也保证了 AD 转换的准确性。

4.4 高频电流脉冲捕捉

泄漏电流脉冲频率和幅值的增加，表示污闪接近。当泄漏电流脉冲幅值超过一定值，且重复率达到一定水平时，是表示污秽绝缘子临近闪络的条件。设计中，电流转换后的电压信号通过高通滤波器，进入高频信号比较单元，预先设定三个不同幅值的参考电压，通过高速电压比较器比较产生高电平为 3.3 V 的脉冲进入 DSP 进行脉冲计数，DSP 高速的运算能力使其能捕捉到频率为几十兆赫兹的高频脉冲，准确记录了不同幅值的泄漏电流脉冲次数。

5 试验结果分析

5.1 在线监测装置测量精度的测试

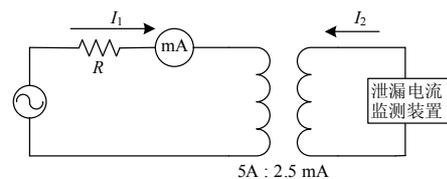


图 5 精度测试的电路图

Fig.5 Circuit diagram of accuracy test

实验装置如图 5 所示，施加交流信号于电阻上，串联交流毫安电流表，并记录电流有效值。通过 5 A : 2.5 mA 的电流互感器，电流降低 2 000 倍后接入泄漏电流监测装置，记录电流表的值作为真值，装置测得数据后再通过公式 $((I_1 - I_2 * 2) / I_1) * 100\%$ 计算系统测量精度。从表中可以看出当电流信号 $> 50 \mu$ A 时系统误差小于 1%，而电流小于 50μ A 时误差也在 5% 以内。考虑到在实际运用中，泄漏电流的大小时刻在变，再后续运用模糊神经理论等算法进行污秽程度判断时，该误差都在允许的范围内，因此该装置达到了测量泄漏电流的精度要求。

表 1 泄漏电流在线监测装置测量精度

Tab.1 Test accuracy of the leakage current monitoring device

毫安表测量值 I_1/mA	监测装置测量 值 $I_2/\mu\text{A}$	系统误差 /%
102	50.7	0.59
95	47.1	0.84
86	42.5	1.16
78	38.5	1.28
67	32.9	1.79
58	28.3	2.41
50	24.0	4.00
38	18.1	4.74

5.2 对泄漏电流监测装置性能的试验方法

在实验室试验泄漏电流监测装置性能时, 用电压等级为 2 500 V 的兆欧摇表, 手摇产生高电压, 使其作用在一定爬电距离的绝缘子上, 在绝缘子上喷上盐水, 用以模拟测试具有一定相对湿度和一定盐密的绝缘子状况, 用集流环套在绝缘体上截取泄漏电流^[5], 并引入电流采集装置。

摇表可输出直流电压, 直流电压下污染绝缘子的放电特性类似于工频交流电压下的放电特性, 另外由于直流电流不存在过零问题, 污秽绝缘子表面容易持续放电, 污闪更容易发展^[6]。因此, 采用此试验方法同样能反映在交流高压下泄漏电流监测装置的特性, 同时试验过程简单, 操作性强。

5.3 泄漏电流监测装置性能试验结果与分析

按照《电力系统污区分级与外绝缘选择标准》(Q/GDW) 中等值盐密的确定方法, 配置等值盐密分别为 0.05、0.1、0.2、0.3 和 0.4 mg/cm^2 的盐水喷于绝缘子表面, 同时保持一定的湿度, 匀速摇动摇表, 记录摇表的指针稳定时的欧姆值, 多次记录监测装置在各盐密度下测得的电流, 计算所测电流的平均值, 如表 2 所示。

表 2 不同盐密下的摇表值和测量电流

Tab.2 Resistance and current value under variant ESDD

等值盐密 ESDD/ (mg/cm^2)	摇表值 $R/\text{M}\Omega$	泄漏电流 I/mA
0.05	20	0.075
0.1	10	0.127
0.2	5	0.216
0.3	1.5	0.668
0.4	1.2	0.815

所得电流与摇表中的欧姆值相乘计算加在绝缘子两端的电压, 同时绘制成如图 6 的曲线, 图中灰

线为人工试验 X-4.5 绝缘子在正极性直流电压下的污闪特性曲线^[6], 所示纵轴为单片绝缘子(爬电距离 $L=277\text{ mm}$) 上的污闪电压 (U), 在这里作为泄漏电流监测装置性能测试的对比曲线。实线为装置所测电流与摇表值计算所得电压 (U') 下的污闪特性曲线, 由于摇表所产生电压比实际高压输电线路电压低的多, 因此在本试验中将摇表所产生电压加在爬电距离 $L'=40\text{ mm}$ 的绝缘子表面。假设绝缘子表面盐度均匀, 则认为绝缘子表面污层电阻与爬电距离成正比, 在相同泄漏电流下 ($I=I'$) 可换算到单片绝缘子上的污闪电压, 如公式 (4) 所示。

$$\frac{L}{L'} = \frac{R}{R'} = \frac{U/I}{U'/I'} = \frac{U}{U'} \quad (4)$$

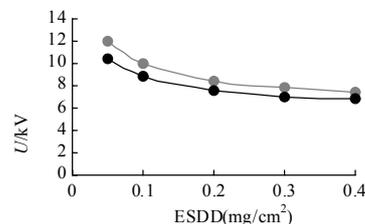


图 6 绝缘子直流电压下污闪特性

Fig.6 Polluted flashover trait of volts DC insulator

图中两条曲线在数值上存在一点偏差, 这是由于摇表值的读取和换算过程中存在的误差产生的。在已做试验保证测量精度的前提下, 此偏差的存在也在允许范围内。由图 6 可见, 本文设计的泄漏电流监测装置所反映的污闪特性曲线与对比曲线具有相同的污秽变化趋势, 结合表 2 可知, 当所测泄漏电流超过 0.8 mA 时, 单片绝缘子污闪电压仅约 7 kV, 低于该型号绝缘子标称电压 15 kV, 污秽比较严重, 即表明装置达到了测量泄漏电流的要求, 所测泄漏电流能准确地反映绝缘子表面不同的污秽状况。

6 结论

本文设计了一种新型的绝缘子污秽泄漏电流在线监测装置, 装置由高速运放构成的电流采集电路、信号调理电路及采用 DSP 的数据处理与分析电路组成, 装置即可监测工频泄漏电流, 也可监测高频泄漏电流脉冲次数。对装置性能进行的试验表明: 本监测装置能够准确地在线测量绝缘子表面泄漏电流, 能实时反映运行中绝缘子表面的污秽状况, 对电力系统安全运行能起到良好的保障作用。

(下转第 114 页 continued on page 114)

- 21(5): 54-58.
FAN Jiang-tao, LIU Jing-fang, CHEN Jian-yun. Harmonic Andnegative Sequence Analytical Instrument Based on LabVIEW Intraction Supply System[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2004, 21(5) : 54-58.
- [3] 苏维均, 周莺. 小波变换阈值降噪方法及在工程中的应用[J]. 微计算机信息, 2008, 24 (1) .
SU Wei-jun, ZHOU Ying. Wavelet Transform Threshold Noise Reduction Methods and the Application in Engineering[J]. Microcomputer Information, 2008, 24 (1) .
- [4] 陈小勤, 何正友, 钱清泉. 基于虚拟仪器的电力短暂信号小波分析仪[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (10) : 98-100.
CHEN Xiao-qin, HE Zheng-you, QIAN Qing-quan. Wavelet Transform Analysis Instrument of Electric Power Transient Signal Based on Virtual Instrument[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(10): 98-100.
- [5] 任震, 黄雯莹, 石志强. 小波分析及其在电力系统中的应用: (三) 工程应用技术[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(3):12-15.
REN Zhen, HUANG Wen-ying, SHI Zhi-qiang. Wavelet Analysis and Applications to Power Systems Part Three Engineering Application[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(3):12-15.
- [6] 董新洲, 贺家李, 葛耀中. 小波变换: 第 2 讲 离散小波变换[J]. 继电器, 1999, 27(2):57-60.
DONG Xing-zhou, HE Jia-li, GE Yao-zhong. Wavelet Transform: Part Two Separate Wavelet Transformation[J]. Relay, 1999, 27(2):57-60.
- [7] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
GE Yao-zhong. New Principle and Technology for Protective Relaying and Fault Location[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.
- [8] 王晓兰, 李建海, 等. 基于 LabVIEW 的自动测试系统中动态报表的生成方法[J]. 测控技术, 2008, 27(9): 63-65.
WANG Xiao-lan, LI Jian-hai, et al. A Method of Dynamic Report Generation Based on LabVIEW in Automatic Test System[J]. Observation Technology, 2008, 27(9): 63-65.
- [9] 侯国屏, 王坤, 叶齐鑫. LabVIEW7.1 编程与虚拟仪器设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.341-347.
HOU Guo-ping, WANG Kun, YE Qi-xin. LabVIEW7.1 Programming and Virtual Instrumentation Design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 341-347.

收稿日期: 2009-04-16

作者简介:

肖 骏 (1962-), 女, 高工, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: _xj361818@163.com

王 灿 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析;

王晓兰 (1963-), 女, 教授, 研究生导师, 研究方向为智能控制系统。

(上接第 103 页 continued from page 103)
参考文献

- [1] 张振旗, 孙廷玺, 郭正荣, 等. 输电线路泄漏电流采集范围取值探讨[J]. 高电压技术, 2003, 29(1): 56-57.
ZHANG Zhen-qi, SUN Ting-xi, WU Zheng-rong, et al. Discussion on Measurement Range of Leakage Current on HV Overhead Line[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(1): 56-57.
- [2] 王海跃, 等. 合成绝缘子在线检测方法的现状与发展[J]. 高电压技术, 2005(4): 31-34.
WANG Hai-yue, et al. Present and Future Development of on-line Detection Methods for Composite Insulator[J]. High Voltage Engineering, 2005(4): 31-34.
- [3] 康华光, 等. 电子技术基础模拟部分 (第四版) [M]. 1999.
- [4] 陈国庆, 方康玲, 刘宇. 一种精密有源绝对值电路的改进与应用[J]. 武汉科技大学学报: 自然科学版, 2005, 28 (4): 371.
CHEN Guo-qing, FANG Kang-ling, LIU Yu. Improvement and Application of an Exactitude Power Absolute Circuit[J]. Journal of Wuhan University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2005, 28 (4): 371.
- [5] 黄新波, 刘家兵, 等. 绝缘子泄漏电流在线监测系统的设计与应用[J]. 电测与仪表, 2007, 44 (497): 12-13.
HUANG Xin-bo, LIU Jia-bing, et al. Designation and Application of an On-line Monitoring Insulator Leakage Current System[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007, 44 (497): 12-13.
- [6] 陶元忠, 包建强, 等. 输电线路绝缘子运行技术手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003. 90-93.

收稿日期: 2009-03-27

作者简介:

周兴韬 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化, 电气设备在线监测; E-mail: zhxt1119blue@163.com

王 玮 (1959-), 男, 博士生导师, 研究方向为电气设备在线检测技术, 电力系统稳定与控制等;

倪平浩 (1972-), 男, 讲师, 研究方向为电气设备在线监测技术, 电力系统继电保护。