

开关柜局部放电综合在线检测装置的研究与应用

王戈¹, 王强², 田志刚², 周文乐³, 李建明⁴

(1. 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039;
3. 沙湾供电局, 四川 乐山 614900; 4. 四川电力科学研究所, 四川 成都 610072)

摘要:采用紫外光技术和超高频技术共同检测开关柜内设备局部放电的发生,研究了一种开关柜局部放电综合检测装置,该装置通过检测局部放电过程中辐射的紫外光脉冲和超高频信号,达到对电气设备局部放电的准确识别,且具有动作时间快、灵敏度高、抗干扰能力强、费用低等优点。研究了紫外脉冲法和超高频法的测量原理,分别给出了紫外部分和超高频部分的信号处理方法以及装置各硬件部分的设计。进行了电容型放电间隙棒-板电晕放电模拟检测试验,证明了该装置能够准确检测不同强度的放电,并能相对反映放电强度的大小。

关键词:局部放电; 紫外脉冲法; 超高频法; 开关柜

Abstract: The UV method and UHF technology are used together to detect partial discharge of electrical equipment in switchgear, and then a kind of partial discharge detection device for switchgear is developed. The device can achieve an accurate identification of partial discharge of electrical equipment by detecting the UV pulse and UHF signals that are radiated in the process of partial discharge, and has many advantages such as fast action, high sensitivity, strong anti-interference ability and low cost, etc. The measuring principle of UV pulse method and UHF technology are studied, the signal processing method of UV part and UHF part are presented respectively, and the hardware design of this device is also presented. The rod-plate corona discharge test is carried out and it proves that the device can detect the discharge of different intensity accurately, and the discharge intensity can be relatively reflected too.

Key words: partial discharge; UV pulse method; UHF method; switchgear

中图分类号: TM855 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)02-0044-05

0 引言

开关柜是电力配电系统非常重要的电气设备,由于种种原因引起的开关柜运行状态恶化甚至烧毁,常使安全运行受到严重威胁,如果处理不当将可能会扩大发展为输电网事故,造成重大的经济损失。而高压开关设备内部绝缘部分的缺陷或劣化、导电连接部分的接触不良是高压故障率最高的一类故障。根据1989—1992年间全国电力系统6~10 kV开关柜事故统计,绝缘和载流引起的故障占总数的40.2%,其中由于绝缘部分的闪络造成的事故占绝缘事故总数的79.0%^[1]。由于在事故潜伏期可能产生放电现象,故可以通过对放电的监测得到相关的信息。

目前在线检测局部放电的方法很多。主要有红外成像法、紫外成像法、脉冲电流法、超声法以及超高频法等^[2]。这些检测方法在不同的方面都有各自的

优点,在实践中也都得到了一定程度的应用,但同时也都存在各自的不足^[3-5]。文献[6]采用紫外成像法对绝缘子放电进行测量,通过用紫外成像仪观察线路绝缘子的紫外成像特点来分析其沿面放电特点,从而判断绝缘子的运行状态,达到了一定的效果,并具有良好的放电定位精度,但检测仪器价格昂贵,难以对放电进行定量化的分析。文献[7]研制了一种紫外脉冲检测仪,能实现在线监测,抗干扰能力强,动作反应迅速,取得了一定的成果。但是开关柜内设备密集,光又是沿直线传播的,一旦遇到遮光将无法检测到放电,且对内部绝缘的局部放电不敏感,可靠性得不到保障。文献[8]使用超高频天线来检测局部放电,取得了很好的效果。超高频的特点是能够探测内部绝缘的局部放电,以及信号在传递过程中不易遮挡,因此超高频检测法在电气设备的局部放电检测中得到广泛应用。然而超高频信号极容易受到其他高频干扰,如附近局部放电、无线通信、广电信号、遥

测遥控信号等,虚警率高,为局部放电的判定带来一定的难度。基于此,则提出采用紫外光技术和超高频技术共同来检测电气设备局部放电的有无,发扬两种方法各自的优点,同时弥补紫外法容易被遮光和超高频法容易受干扰的缺陷,研制了一种开关柜局部放电综合在线检测装置,并通过现场模拟棒-板电晕放电对装置作了验证,该装置具有抗干扰能力强、虚警率低、灵敏度高、性能稳定、费用低等优点。

1 检测原理

1.1 紫外脉冲法

在开关柜电力设备中,由于电极和绝缘表面存在的缺陷,以及导电粒子的存在,会发生不同程度的放电。根据电场强度的不同,会产生电晕、闪络或电弧,一般情况下,电离的主要形式还是电晕,只有当情况恶化时才会发生闪络或者电弧,此时可以将其看作更为严重的放电。电离过程中,空气中的电子不断获得和释放能量,当电子释放能量时,伴随有发光辐射现象,其辐射光谱包括可见光、红外线、紫外线。其中,紫外辐射在大气中传播时衰减较小,而且日盲区的紫外线不易受到环境因素的干扰,较为稳定,所以选择紫外辐射作为局部放电检测的特征量是一种极其有效的手段。

高压输电线路其起晕起始场强 $E_c = 30.38m\delta^n(1 + 0.298/\sqrt{r})$ kV/cm,式中 δ 为空气相对密度; n 为空气密度指数; r 为导线半径; m 为表面粗糙系数(< 1)。设备放电时的紫外线辐射强度与电场强度直接相关,紫外检测系统可对单位时间内计量到的电晕脉冲数进行统计,从而确定电气设备的放电强度,为设备状态监控提供依据。

1.2 超高频法

当开关柜绝缘结构中发生局部放电时,沿放电通道将会有过程极短的脉冲电流产生,并激发瞬态电磁波辐射。当放电间隙比较小时,放电过程的时间比较短,电流脉冲的陡度比较大,辐射高频电磁波的能力比较强;而放电间隙的绝缘强度比较高时,击穿过程比较快,此时电流脉冲的陡度比较大,辐射高频电磁波的能力比较强。通常开关柜绝缘结构中发生的局部放电信号可以看成是由一个点源所发出的,当电介质某处发生局部放电时,由放电产生的电磁扰动随时间变化,将会产生电磁波,它们遵循麦克斯韦的电磁

场基本方程。

由于局部放电电流形成的通道很细,放电路径一般很短,可以用电偶极子来等效,其辐射特性遵循电偶极子的辐射规律。场强 $E = \frac{q\Delta l}{4\pi\epsilon_0\gamma^3} \sqrt{1 - k^2r^2 + (k^2r^2)^2}$,式中 $k = 2\pi f/c$ (c 为真空中的光速)。放电脉冲可以辐射上升沿达到 $1 \sim 2 \mu s$ 、频率达到数 GHz 的高频电磁波,为一种横向电磁(transverse electro-magnetic, TEM)波,该电磁波的能量以固定的速度沿电磁波的传播方向流动。所以,通过耦合这种以 TEM 波形式传输的电磁信号,就可以检测到开关柜内设备的局部放电,并进一步认识其绝缘状态。

根据现场运行的开关柜的结构特点,采用紫外检测法与超高频法联合测试法来检测开关柜局部放电,可以充分发挥两种方法的优点和避免两种方式各自的缺点,扬长补短,综合检测,从而综合判定开关柜内局部放电的产生。

2 检测装置整体设计

如图 1 所示,整体框图由紫外传感器组件、超高频传感器组件、微处理器、电源部分、液晶显示单元、报警单元及通信模块组成。

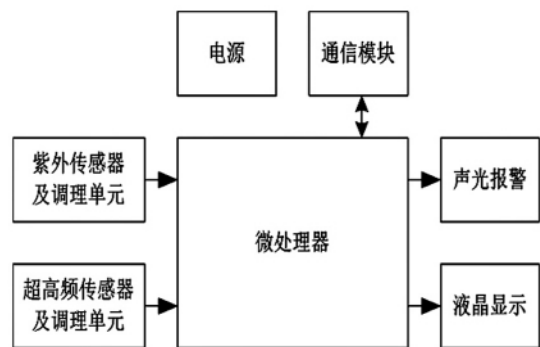


图 1 检测装置整体框图

紫外传感器接收局部放电辐射出的紫外光脉冲,将其转换为电脉冲,然后进行放大、滤波、AD 采样后,将信号送至微处理器,通过程序设计,把超过一定电平值的信号记录为一次脉冲,在规定的时间内(这里规定为 10 s),若总脉冲数超过了预设的阈值 n ,则判定为有局部放电的产生,报警器报警,并将记录的数据显示在液晶屏上。同样,超高频天线接收局部放电辐射的超高频信号,经过放大、混频、检波、滤波以及 AD 采样后,交由微处理器判定控制,最后将结果

送至报警器和显示器,也可由通信模块将信号送到PC机,实现远程监控。电源部分包括紫外高压驱动模块和信号处理电路的电源。处理器单元包括单片机及外围电路,采用美国 silicon 公司高性能微处理器 C8051F120,具有独立工作的片上系统的混合信号系统芯片,系统时钟设定在 100 MHz。液晶显示模块采用内藏 KS0107 控制器 YXD-12864A-02 图形液晶显示模块(如图2),显示屏自带背光,还有4个按键及蜂鸣器等,操作方便。



图2 显示器

由于开关柜内设备复杂,空间狭小,所以该检测装置要便于安装,其大小和形状都要进行合理的设计,装置实物如图3所示,使用封闭的金属壳,起到很好的屏蔽作用,有益于抗干扰。



图3 装置实物图

3 信号处理模块设计

3.1 紫外部分

高压设备局部放电产生的紫外线大部分波长在 280~400 nm 的区域内,也有小部分波长在 160~280 nm,太阳光中也含有紫外线,但是波长小于 280 nm 的部分几乎全部被臭氧吸收,称为太阳盲区。为了去除可见光源的干扰,采用高灵敏度的日盲区紫外光敏管 R2868 来检测局部放电产生的紫外光辐射。

由于紫外传感器的工作原理是外界游离因素引

起的自持放电,所以必须设计具有灭弧功能的紫外驱动电路。当紫外线射入光阴极的表面产生光电效应,转换为负向的电流脉冲信号,经前置反向比例放大电路,得到正向电压信号。再进行滤波处理,使之通过二阶巴特沃斯高通滤波器,滤除低频干扰。为了满足 AD 采样电路的输入要求,还需进行正向放大调整,然后进行模数转换,最后将信号送 MCU 处理器作进一步的处理。紫外光电信号处理框图如图4所示。

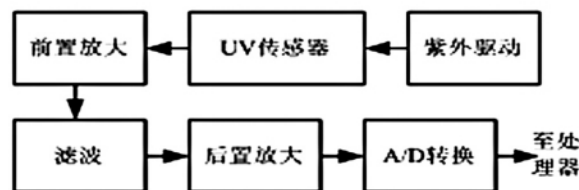


图4 紫外光电信号处理框图

3.2 超高频部分

超高频天线用于接收局部放电产生的超高频信号,它性能的好坏至关重要,考虑到适用于开关柜的体积及成本因素,本装置选择鞭状天线来进行设计。

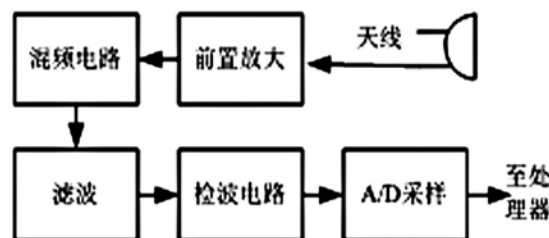


图5 超高频电信号处理框图

超高频电信号处理框图如图5所示。从天线接收到的信号输入电路后为超高频电压信号,经过传播途中的绕射及反射,信号强度十分微弱,无法直接处理,所以在提取有用信息前先通过一个放大器,以保证放电信号到达信号调理单元时信号的功率幅值符合其输入范围。本部分采用高集成度放大器 ADL5521,它的工作频率范围为 400~4 000 MHz,能够提供低噪声和高增益。

超高频信号在处理过程中极易受到干扰,而且频率很高,一般的 A/D 采集卡的采集频率很难达到要求,但是局部放电测量通常只关心信号的峰值及其出现的相位,将超高频信号无失真地采集下来也意义不大,且数据量极大,数据处理难度高,所以采用混频电路降低局部放电超高频信号的频率。本装置选用的混频器为双差分对平衡混频器(AD831),并采用了切比雪夫逼近设计了 20 MHz 带宽的 5 阶切比雪夫 I 型 LC 低通滤波器,

将混频后的和频分量滤除 输出差频分量。

检波电路的作用是将低通滤波器的输出信号进行检波(包络提取)和放大。由于局部放电超高频信号电平的动态范围较宽,对数据采集卡的位数要求较高,增加了数据采集卡的选用难度。因此在设计检波电路提取信号包络的基础上,将输入电平幅度作对数运算,以此来压缩信号电平范围。用 ADI 公司的一款解调对数放大器 ADL5513,能够精确地将射频(radio frequency, RF)输入信号转换为相应的分贝标度输出。

4 试验数据与分析

4.1 试验方法

为了验证该检测装置的局部放电检测能力,用刚出厂未投入使用的开关柜进行模拟试验,打开断路器开关,使母线形成了对地的电容,用铜丝从 A 相引出,构成棒极, B、C 两相用导线相连,构成板极,铜丝尖端与 B 相留有间距,形成局部放电间隙,与 BC 相母线对地电容串联,并与 A 相母线对地电容并联,这样就构成了经典的电容局部放电回路,模拟棒-板电晕放电。该方法在棒-板间隙被击穿时,不至于使电源短路损坏,并通过对地电容的充、放电,使放电过程不断循环。把检测装置安装在开关柜横梁上,人为给 A 相加压,从 1 kV 缓慢升压,直到产生明显电弧击穿,记录该装置不同电压等级下的紫外脉冲数和超高频脉冲数,这些脉冲数是装置每 10 s 钟内记录的数据。棒-板间距可调,每组按棒-板间距为 1 cm、0.5 cm 进行试验检测,每点测量 5 次。

4.2 数据及分析

试验数据如表 1 所示,分别列出了电容型放电间隙间距为 1 cm 和 0.5 cm 的紫外、超高频脉冲数,实验时开关柜柜门是打开的,且现场通风条件较好,热传递迅速,因此在测试过程中,温度基本维持在 28 °C ~ 29 °C。

由表 1 可以看出,随着所加电压的上升,测得的紫外脉冲和超高频脉冲数都有明显升高,符合电场强度越强,放电越明显的规律。因此,可以通过分析脉冲数目的多少来判断设备的放电程度。对比不同电压等级下的两组数据可知,相对 0.5 cm 棒-板间距,1 cm 时放电强度更强,这也符合放电的规律,因为随着间距的增大,电场分布越不均匀,越容易产生放电。此外,当产生放电现象并不严重,还未衍生至可见电

弧光时,系统依然能够可靠报警,从而可以预先发现开关柜内潜在的故障点,确保现场设备持续、安全、有效地运行,提高供电可靠性,为开关柜的运行状态提供诊断数据,为状态检修提供依据。

表 1 开关柜局部放电测量 10 s 内的脉冲数

加压	间距 1 cm		间距 0.5 cm	
	紫外	超高频	紫外	超高频
3 kV	14	30	6	28
	10	37	12	30
	17	38	8	25
	16	33	10	22
	20	45	7	38
	25	68	17	67
5 kV	26	101	21	64
	30	61	22	72
	29	80	23	68
	34	93	18	82
	42	113	32	101
	57	122	33	103
8 kV	44	116	40	109
	38	125	45	136
	60	131	52	112
	125	218	136	214
	182	226	158	221
	147	231	129	218
10 kV	174	241	142	230
	86	249	169	213

5 结论

研究了紫外光技术和超高频技术综合检测局部放电的联合测量法,进行了开关柜局部放电综合检测装置的设计,并进行了模拟棒-板电晕放电检测试验。试验结果表明如下。

1) 该装置能够准确检测不同强度的放电,并能相对反应放电强度的大小。在开关柜中,可以通过设置不同强度的电弧检测阈值,提高继电保护的灵活性。

2) 当有局部放电发生时,装置能够反映出较大强度的放电信号,不同电压等级下和棒板间距体现出来的放电强弱符合放电规律。

3) 该装置具有动作时间快、抗干扰能力强、虚警率低、灵敏度高、费用低等优点,在检测过程中不必提供高压测试电源、不必停电,也无需消耗较多的人力物力,安装方便。

根据获取的紫外和超高频数据,再结合每相电压、电流情况,对开关柜的运行状态进行综合的分析

评判,从而及时发现开关柜内潜在的安全隐患,确保现场设备持续、安全、有效地运行,提高供电可靠性。

参考文献

[1] 田勇,田景林. 6~10 kV 开关柜事故统计分析与改进意见[J]. 东北电力技术, 1996(8): 5-10.

[2] 杨保初. 高电压技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2002.

[3] Blackburn T R, James R E. Optical Fiber Sensor for Partial Discharge Detection and Location in High Voltage Power Transformers [C]//Proc IEE 6th Int' 1 Conf on Diel Mat Meas and Appl, 1992: 33-36.

[4] Stone G C. Partial Implementation of Ultra Wide Band Partial Discharge Detectors [J]. IEEE Trans. on Elect. Insul, 1992, 27(1): 70-81.

[5] Krivda A. Automated Recognition of Partial Discharges

[J]. IEEE Trans on Diel and Elect Insul, 1995, 5(2): 796-821.

[6] 肖猛,文曹. 一种新型绝缘子带电检测方法-紫外成像法[J]. 高电压技术, 2006, 32(6): 42-44.

[7] 冯岗,范康林,周军,等. 高压开关柜内绝缘故障在线监测系统[J]. 电测与仪表, 2011, 48(5): 60-62.

[8] 王娟,刘云鹏,律方成等. 基于 UHF 局部放电检测技术的高压开关柜状态在线监测的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(6): 42-44.

作者简介:

王强(1986),男,研究生,研究方向为电力设备在线监测与故障诊断技术;

李建明(1952),男,教授级高工,高电压与绝缘技术专家,四川电力科学研究院副总工程师。

(收稿日期:2012-02-29)

(上接第 14 页)

合并单元或者采集单元参数来调整误差。在带来误差调整灵活性和方便性的同时,也带来误差可任意修改的严肃问题,尤其对计量而言是亟待解决的管理性问题;

(2) 当测试发现较大误差的情况时,应对产生误差的原因进行全面分析,给出正确处理措施;

(3) 应模拟电子式互感器实际运行条件下开展测试工作,以确保其结果准确性和有效性。

参考文献

[1] 邱红辉. 电子式互感器的关键技术及其相关理论研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.

[2] 方春恩,李伟,王佳颖,等. 基于电阻分压的 10 kV 电子式电压互感器[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 58-63.

[3] 徐大可,赵建宁,张爱祥,等. 电子式互感器在数字化变

电站中的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 78-82.

[4] 林国营,周尚礼. 电子式互感器校验系统的误差分析方法[J]. 电测与仪表, 2010, 47(6): 28-31.

[5] 王鹏,张贵新,李蓬子,等. 电子式互感器误差分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(7): 1105-1108.

[6] 徐波,张志. 电子式互感器数字输出校验技术[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 147-150.

[7] 余春雨,叶国雄,王晓琪,等. 电子式互感器的校准方法与技术[J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 20-22.

[8] 李九虎,郑玉平,古世,等. 电子式互感器在数字化变电站的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 94-98.

[9] 丁涛,徐二强,武宏波,等. 电子式互感器现场误差测试与问题分析[J]. 电测与仪表, 2011, 48(4): 36-39.

[10] 陈应林,黄德祥,孙志杰. OET700 电子式互感器的结构与性能[J]. 变压器, 2006, 43(6): 1-5.

(收稿日期:2012-03-01)

· 简讯 ·

高压技术所赴 500 kV 桃乡变电站开展带电检测工作

四川电科院高压技术所协助省公司生技部完成 2012 年度全省 220 kV 及以上变压器(电抗器)、GIS 设备、SF₆ 断路器、互感器、避雷器等变电设备的带电检测任务。位于成都龙泉的 500 kV 桃乡变电站的 500 kV HGIS 在此前曾出现 50211 隔离开关故障和 5082 隔离开关出线气室盆式绝缘子破裂导致气体泄漏。2012 年 3 月 21 日,高压所技术人员在现场利用 GIS 超声波局部放电带电检测仪对 500 kV HGIS 新更换的两个气室和所有断路器气室、部分刀闸气室进行了检测。