

DOI: 10.7667/PSPC180654

基于脉冲电流法的高压开关柜局部放电在线监测装置

陶诗洋, 冯义, 张天辰, 蔡宏伟

(国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075)

摘要: 脉冲电流法局部放电检测通常用于电气设备出厂时的型式试验以及其他离线测试中。在充分分析开关柜局部放电检测的现状与问题后, 设计了基于开关柜高压带电显示装置的局部放电在线检测的电路原理和信号提取方法。搭建了基于脉冲电流法的高压开关柜局部放电在线检测回路, 开发了具备实时监测、判断与分析功能的后台软件。并在 10 kV 开关柜真型局部放电缺陷仿真平台上进行了真实放电的模拟试验, 验证了基于脉冲电流法的高压开关柜局部放电在线监测装置的灵敏度与有效性。该研究对开关柜状态检修以及脉冲电流法在线检测理论研究具有较大意义, 为 10 kV 配网设备局部放电在线监测提供了良好的实现方法。

关键词: 脉冲电流; 高压带电显示装置(VPIS); 开关柜; 局部放电(PD); 在线监测

High-voltage switch cabinet partial discharge on-line monitoring device based on pulse current method

TAO Shiyang, FENG Yi, ZHANG Tianchen, CAI Hongwei

(Power Research Institute of State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100075, China)

Abstract: The pulse current method for partial discharge detection is generally applied in type testing and other off-line tests of electrical equipment at delivery. After intensive analysis of the present situation and existing problems of partial discharge detection in switch cabinets, this paper designs the circuit principle and signal extraction method for partial discharge on-line detection based on a high Voltage Presence Indicating Systems (VPIS). It establishes a high voltage switch cabinet partial discharge on-line detection circuit based on the pulse current method and develops background software integrated with real-time monitoring, judging and analyzing functions. Furthermore, it carries out a real discharge simulation test on a real-type partial discharge defect simulation platform of a 10 kV switch cabinet and verifies the sensitivity and validity of the high-voltage switch cabinet partial discharge on-line monitoring device based on the pulse current method. The study presented in this paper is of great significance for switch cabinet maintenance and theoretical study on pulse current method on-line detection, and has provided a good implementation method for partial discharge on-line monitoring devices for 10 kV distribution network equipment.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477100) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52020114026L).

Key words: pulse current; high voltage presence indicating systems (VPIS); switch cabinet; partial discharge (PD); on-line monitoring

0 引言

在电力系统的配电网设备中, 高压开关柜是非常重要的电气设备。高压开关柜安全运行对于电网安全意义重大。高压开关柜内部绝缘部分的缺陷或

劣化、导电连接部分的接触不良等都会使其安全运行受到威胁, 从而直接影响电网的安全可靠运行。有关数据显示, 我国电力系统 6~10 kV 开关柜事故统计中, 绝缘和载流引起的故障占总数的 40%, 其中由于绝缘部分闪络造成的事故占绝缘事故总数的 79%。由于在事故潜伏期可能有局部放电现象, 故可以通过局部放电的在线监测得到相关信息, 来分析开关柜内部的绝缘情况^[1-8]。

基金项目: 国家自然科学基金资助(51477100); 国家电网公司科技项目资助(52020114026L)

1 高压开关柜局部放电监测意义

高压开关柜的内部设备元件、支撑绝缘子、母线是到现场后才装进开关柜中的,也只有在现场组装完成后才能够进行试验。但是在现场进行高电压耐压试验或局部放电试验,比起在工厂里要困难得多。高电压设备往往集成度较高,一旦发生了事故,其危害比起过去分立敞开式设备故障的危害要大得多,一个设备部件故障又会危及与之相邻的设备部件,维修周期也 longer。另外,开关柜产品越来越紧凑,导致绝缘裕度随之减小,尤其在南方,夏季空气比较闷热潮湿,易造成内部绝缘部件的表面爬电,而且这种缺陷很难在柜体外面感觉到,近几年来就发生多起开关柜内设备表面爬电的故障,因此非常有必要对高压开关柜设备绝缘状态进行在线监测^[9-10]。

高压开关柜的局放测量,目前常见的方式是采用暂态地电压法(Transient Earth Voltage, TEV)来进行巡检,该方法测量局放量无法定量分析,运用超高频(Ultrahigh Frequency, UHF)或超声波(Acoustic Emission, AE)的方法易受干扰,运用声电联合的方法需要用到多种设备,技术经济性不好,开关柜的长期在线监测和局放源定位还不能实现推广^[11-15]。因此,需要一种更好的高压开关柜局部放电在线监测系统。

2 开关柜高压带电显示器脉冲电流检测原理

脉冲电流法是最早研究,且是迄今为止最广泛使用的一种检测方法,国际电工委员会(IEC)对此在2000年制定了专门的检测标准。每一次局部放电都会发生正负电荷的中和,伴随有一个陡的电流脉冲,脉冲电流法即通过测量该脉冲电流检测到局部放电的发生。脉冲电流法通常用于电气设备出厂时的型式试验以及其他离线测试中,其离线测量灵敏度高,而该方法现场中易受外界干扰噪声的影响,抗干扰能力差^[16-20]。

根据脉冲电流法的特点,本文利用高压开关柜高压带电显示装置(High-voltage Presence Indicating Systems, VPIS)的分压原理,对此IEC传统局部放电脉冲电流试验方法进行了改进。利用绝缘子传感器与高压带电显示装置分压原理,加入耦合电容和检测阻抗,运用三相共模抑制消噪、放大和检波等相结合的方法对外界干扰噪声进行很好的消除,使局部放电监测设备很好地应用于现场中,打破了脉冲电流法在高压开关柜中只适用于实验室的局面,图1为基于高压带电显示装置的局部放电测量电路。

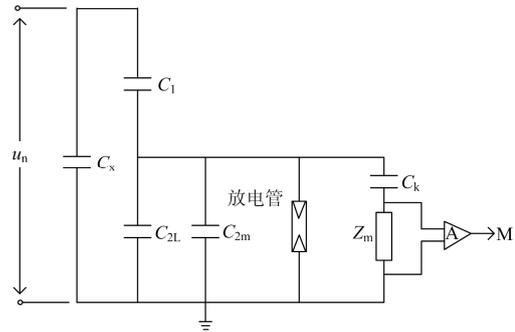


图1 高压开关柜带电显示器的放测量电路图

Fig. 1 VPIS partial discharge detection circuit

如图1所示: U_n 为开关柜母线额定电压; C_x 为被试品电容; C_1 为绝缘子传感器第一级电容; C_2 为绝缘子传感器第二级电容; C_{2m} 为高压带电显示器装置匹配电容; C_k 为局放耦合电容; z_m 为检测阻抗; A 为放大器; M 为测试系统。

检测阻抗 z_m 的作用是获取局部放电所产生的高频脉冲信号。由于信号幅度很小,需要经过放大器予以放大,所以 z_m 与放大器在特性上需相互匹配,它们关系到测量的灵敏度与脉冲分辨率。

由图1可见, C_1 、 C_{21} 、 C_{2m} 、 C_{2k} 、 z_m 的总阻抗 z_0 为

$$C_2 = C_{21} + C_{2m} \quad (1)$$

$$z_0 = \frac{1 - j\omega C_k z_m}{\omega^2 C_k C_2 z_m - j\omega(C_k + C_2)} - j \frac{1}{\omega C_1} \quad (2)$$

测试系统采集到的为局部放电脉冲电压信号,脉冲信号电压幅值为 U_m ,已知开关柜一次母线运行额定电压 U_n ,通过式(1)、式(2)可以得出 u_m 与 U_n 的传递关系为

$$U_m = U_n C_1 z_m (j\omega C_k + \omega^2 C_k^2) / [C_1 - C_2 - C_k - j\omega z_m (2C_k C_2 + C_k^2) + \omega^2 C_k^2 z_m^2 (C_1 + C_2)] \quad (3)$$

在测试系统上所测得的局部放电脉冲值与实际的局部放电视在电荷量成比例,它们之间的具体比例关系与测量回路和放大器等都有关系,要从指示值来计算视在放电电荷量很困难,需要通过实验来确定,即脉冲电流法的测量仪器必须进行校准。校准方法是在原有回路试品上施加模拟局部放电的一定放电量的脉冲,观察在测量仪器上显示的局部放电量与试品上施加的局部放电量是否一致,如不一致,对测量仪器校准系数 k 进行调整使其一致。该技术的测量及校准可在高压开关柜在线运行时进行,比传统的离线校准方式前进了一步。在线校准

位置及图片如图 2 所示。

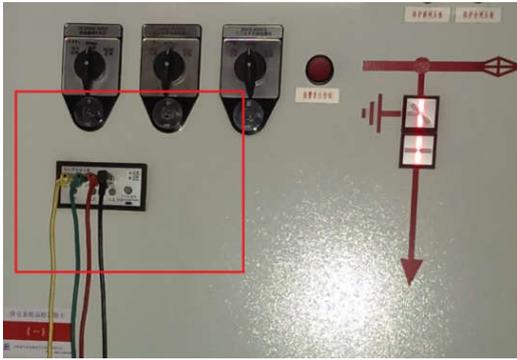


图 2 现场校准接线图

Fig. 2 Wiring diagram of on-line calibration

在局部放电校准过程中, 如果在高压带电显示装置匹配电容 C_{2m} 两端注入放电量为 q_1 的脉冲信号, 可得到实测电压幅值与注入信号关系为

$$q_1 = k \int_0^{t_0} u'_m dt \quad (4)$$

式中: k 为校准系数; t_0 为局部放电电压持续时间; u'_m 为实测电压幅值。

3 装置结构与实现

3.1 组成与安装

本文所搭建的系统主要包括高压带电显示装置、放大器、采集与显示单元、软件分析与就地存储单元、后台汇总显示单元等, 系统构成框图与连接关系如图 3 所示。



图 3 高压开关柜带电显示器局部放电测量系统框图

Fig. 3 Block diagram of VPIPS partial discharge measurement system

该套设备与开关柜带电显示装置共用一套绝缘子式电容式传感器, 连接位置如图 4 中红框所示。局放信号放大器可以与带电显示器背板三相插口相连, 局放信号经由局放信号放大器放大后传输给分析主机进行数据分析。

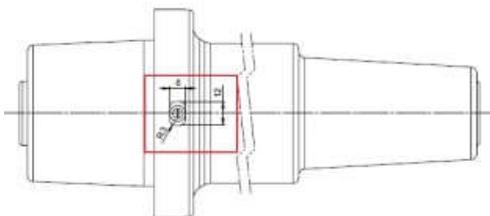


图 4 绝缘子传感器二次接口位置图

Fig. 4 Diagram of secondary interface insulator sensor location

3.2 噪声抑制

装置正确安装后, 方可进行通电调试工作。通电后, 分析与显示单元会显示环境噪声, 判断噪声大小后, 通过分析软件调整合适的噪声抑制设置。

3.3 校准设置

由于该装置基于脉冲电流法, 所以在监测前需进行校准设置, 此校准器是专门用于在线校准在线监测系统测量精度的设备, 具体在线校准方法如下:

1) 检查被校准的开关柜与其相邻的开关柜是否都具有验电核相接口并已都正常带电;

2) 将局部放电校准器与将要被巡检的开关柜相邻开关柜的带电显示装置的核相插口相连接, 校准器信号输出线正极接三相验电核相接口中的任意一相, 负极连接接地接口, 保证校准信号线与验电核相连接可靠;

3) 通过对校准器输入电网运行电压, 可在线测试出运行开关柜电容传感器的电容值, 然后旋转校准器的电压调节钮使其发出相应局部放电量的脉冲, 然后使用局部放电分析软件对分析主机进行设置, 将分析软件读出的电量大小调整至与校准器一致, 完成校准。

3.4 软件分析

如图 5 所示, 我们可以通过分析软件对所采集到的数据进行处理与分析, 查看每个通道的局部放电相图与放电电量大小。通过对比每个开关柜局部放电量的大小, 判断出局部放电出现在哪个开关柜中。

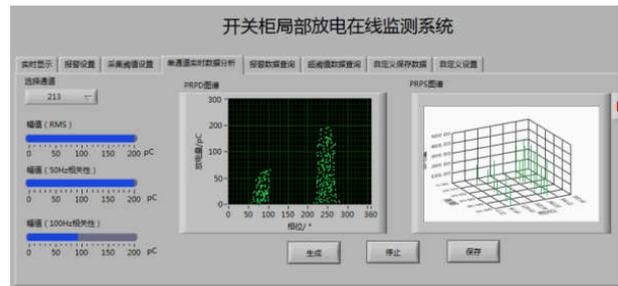


图 5 开关柜局部放电在线监测系统分析软件界面

Fig. 5 Analysis software interface of switch cabinet partial discharge on-line monitoring system

4 验证试验

2016 年 12 月, 将此装置安装于某电科院 10 kV 开关柜局部放电缺陷仿真模拟平台, 进行了确定性缺陷的试验效果验证, 包括局放监测效果、传感器灵敏度、重复性以及局部放电模式识别功能等。

本次试验在 222 开关柜内搭建了一个放电电量较小的含气隙绝缘子缺陷, 如图 6 所示。



图 6 222 开关柜内缺陷绝缘子

Fig. 6 Defect insulator within the 222 switch cabinet

对开关柜施加电压后，利用局部放电校准器对装置进行在线校准。在试验过程中，先对 222 开关柜施加一定等级的电压至有明显的局放信号后，使用局部放电校准器对装置校准并进行局部放电的监测。对 222 开关柜内施加电压 U_n 为 10 kV，利用本文装置进行检测，测试结果如图 7、图 8 所示。此开关柜在背景为 50 pC 的情况下，内缺陷放电量为 121 pC，放电谱图相位较窄，与开关柜 A 相施加电压相位进行比较分析，放电相位分布在 $270^\circ \sim 300^\circ$ ，由于开关柜模拟平台有 50 pC 的背景干扰，此放电谱图符合 1、3 相位分布特征，故可以确定放电来自开关柜 A 相，与实际缺陷设置情况一致。

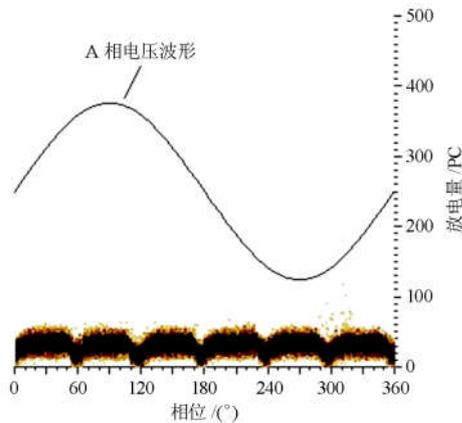


图 7 局部放电信号 PRPD 谱图

Fig. 7 PRPD spectrogram of partial discharge signal

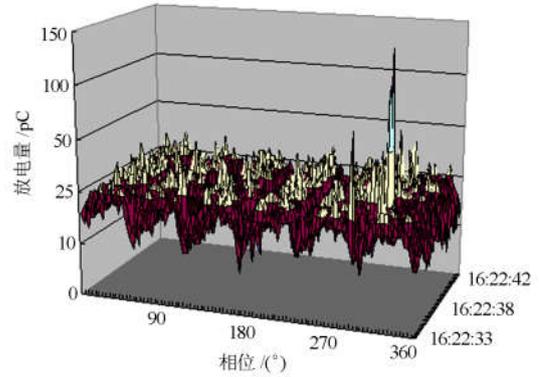


图 8 局部放电信号 PRPS 三维谱图(20 ms)

Fig. 8 PRPD 3D spectrogram of partial discharge signal (20 ms)

5 结论

通过基于带电显示器的高压开关柜局部放电监测装置，可以有效、直观地反映开关柜内部绝缘状况，不仅能有效防止灾难性故障的发生，而且使整个系统的运维成本得到了最佳控制。本文通过构建监测回路、公式计算、装置开发和平台验证，得到如下结论：

- 1) 通过设计局部放电检测回路和公式计算，此检测回路具备局部放电信号校准与检测功能。
- 2) 通过在某电科院仿真模拟平台验证，此装置可以有效监测到开关柜内的真实局部放电信号。
- 3) 装置放大器具备的三相共模抑制电路可以有效过滤来自外部的干扰信号，实际检测灵敏度不大于 50 pC。
- 4) 对装置检测的局部放电信号进行相位谱图分析，与实际运行相位比较计算可确定放电源相位。

参考文献

[1] 刘云鹏, 王会斌, 王娟, 等. 高压开关柜局部放电 UHF 在线监测系统的研究[J]. 高压电器, 2009, 45(1): 15-17. LIU Yunpeng, WANG Huibin, WANG Juan, et al. Research on UHF on-line monitoring system of high voltage switch cabinets[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 15-17.

[2] 关永刚, 钱家骊. 射频法在高压开关柜局放监测中的应用研究[J]. 高压电器, 2001, 37(5): 1-3. GUAN Yonggang, QIAN Jiali. Research on the application of the RF method on high voltage switch cabinet PD monitoring[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(5): 1-3.

[3] 尚鹏, 王一飞, 赵磊, 等. 高压开关柜局部放电检测分析[J]. 电子世界, 2013(22): 76-77. SHANG Peng, WANG Yifei, ZHAO Lei, et al. Detection and analysis of high voltage switch cabinet partial discharge[J]. Electronics World, 2013(22): 76-77.

[4] 崔在玉, 江昌元, 朴基俊. 预防气体绝缘开关装置故

- 障的超高频局部放电在线实时监控[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 51-54.
- CUI Zaiyuan, JIANG Changyuan, PIAO Jijun. UHF partial discharge on-line real-time monitoring system preventing failure of gas insulation switch devices[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 51-54.
- [5] 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.
- TIAN Yong, TIAN Jinglin. Statistical accident analysis and improvement suggestions for 6-10 kV switch cabinets[J]. Northeast Electric Power Technology, 1996(8): 5-10.
- [6] 程述一, 律方成, 谢庆, 等. 基于暂态对地电压和超声阵列信号的变压器局放定位方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 255-262.
- CHENG Shuyi, LÜ Fangcheng, XIE Qing, et al. Study of partial discharge locating method in transformers based on transient earth voltage and ultrasonic array signals[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 255-262.
- [7] 陈希. 开关柜内部绝缘缺陷的检测与研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- CHEN Xi. Detection and research on the switchboard's internal insulation fault[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- [8] 王有元, 李寅伟, 陆国俊, 等. 开关柜局部放电暂态对地电压传播特性的仿真分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1683-1688.
- WANG Youyuan, LI Yinwei, LU Guojun, et al. Simulation of transient earth voltages aroused by partial discharge in switchgears[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1683-1688.
- [9] 任明, 彭华东, 陈晓清, 等. 采用暂态对地电压法综合检测开关柜局部放电[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2460-2466.
- REN Ming, PENG Huadong, CHEN Xiaoping, et al. Application of the transient ground voltage method to comprehensive detection of partial discharge in switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2460-2466.
- [10] 蒋愈勇, 刁伟, 刘立斌, 等. 基于 IEC61850 的电子式互感器在线监测与校验系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 117-122.
- JIANG Yuyong, XI Wei, LIU Libin, et al. Design of online monitoring and calibration system for electronic transformer based on IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 117-122.
- [11] 张露, 王永勤, 贺家慧, 等. 特高压变电站工频电磁场对避雷器在线监测装置测量准确度影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 164-169.
- ZHANG Lu, WANG Yongqin, HE Jiahui, et al. Accuracy examination of linkage current online measurement of surge arresters under power frequency interference of electric field and magnetic field in the ultra-high voltage substations[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 164-169.
- [12] LI Y, WANG Y, LU G, et al. Simulation of transient earth voltages aroused by partial discharge in switchgears[C] // 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), October 11-14, 2010, New Orleans, LA, USA: 309-312.
- [13] 苏东, 马仲能, 李成翔, 等. 配网开关柜全生命周期成本模型及敏感度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 150-155.
- SU Dong, MA Zhongneng, LI Chengxiang, et al. Life cycle cost model and sensitivity analysis of switchgear[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 150-155.
- [14] 陈攀. 基于信号能量特征的开关柜局部放电监测及故障模式识别方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- CHEN Pan. Research on partial discharge monitoring and fault pattern recognition in switchgear based on the characteristics of the signal energy[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [15] ZHANG Delong, LI Jianlin, HUI Dong. Coordinated control for voltage regulation of distribution network voltage regulation by distributed energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 35-42. DOI: 10.1186/s41601-018-0077-1.
- [16] 冯波, 肖代波, 李毅, 等. 暂态对地电压和超声法用于开关柜不同湿度 PD 检测研究[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 67-71, 77.
- FENG Bo, XIAO Daibo, LI Yi, et al. Detection of partial discharge in switchgear under different humidity using transient earth voltage and ultrasonic method[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 67-71, 77.
- [17] YAO M. The application of temporary earth voltage (TEV) measurement in the online monitoring of the partial discharge of HV switch cabinet[C] // 2010 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), September 13-16, 2010, Nanjing, China: 1-6.
- [18] 曾雄杰, 江健武, 侯俊. TEV 和 UHF 在 10 kV 开关柜带电检测中的应用[J]. 高压电器, 2012, 48(1): 41-47.
- ZENG Xiongjie, JIANG Jianwu, HOU Jun. Application of TEV and UHF in PD detection for the live 10 kV switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1): 41-47.
- [19] High-voltage test techniques-partial discharge measurements: IEC270[S]. 2000.
- [20] 陈庆祺, 张伟平, 刘勤锋, 等. 开关柜局部放电暂态对地电压的分布特性研究[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 88-93.
- CHEN Qingqi, ZHANG Weiping, LIU Qinfeng, et al. Research of transient earth voltage distribution characteristics by partial discharge in switchgears[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 88-93.

收稿日期: 2018-05-31; 修回日期: 2018-08-08

作者简介:

陶诗洋(1984—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为高压电器设备状态检测与诊断。E-mail: 21263776@qq.com

(编辑 葛艳娜)