

组合电器局部放电特高频检测的气压影响分析

汪正江, 夏红攀

(国网湖北省电力有限公司鄂州供电公司, 湖北 鄂州 436000)

摘要:特高频检测法以其高灵敏度和抗干扰能力,广泛应用于组合电器绝缘状态的现场检测。为研究局部放电特高频信号与视在放电量之间的关系,文中建立了基于特高频和脉冲电流法的局部放电联合检测系统,分别采集0.3~0.5 MPa气压下金属突出物缺陷模型的放电数据,提取UHF信号累积能量,并与视在放电量进行了相关分析。研究表明,各个气压下的UHF信号累积能量与放电量平方始终呈现线性函数关系,其线性斜率与气体压力相对应,这为特高频信号标定研究奠定了基础。

关键词:局部放电;特高频;气压;放电量校准

中图分类号:TM855

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)03-0107-05

0 引言

以SF₆为绝缘介质的气体绝缘全封闭组合电器(gas insulated switchgear, GIS)因具备很高的可靠性和很小的占地面积等优势,使其在城市超高压电网中被广泛应用^[1-3]。高场强下对GIS设备的绝缘性能有很高的要求,但GIS设备在制造、运输、安装以及运行调试过程中,在内部形成的绝缘缺陷往往是引发GIS设备故障的主要原因,尤其在制造不良和安装损坏擦划时造成的金属突出物缺陷现象最为普遍^[4]。特高频局部放电检测法(ultra high frequency, UHF)具有与常规脉冲电流法无法比拟的灵敏度和抑制外部干扰能力,有利于测量真实的局部放电信号波形,以便进行放电故障识别和定位^[5-6],但视在放电量难以标定^[7],而对于检测设备的局部放电而言,视在放电量却是确定设备绝缘状况的一项重要标准。

近年来,国内外对本课题进行了大量分析和实验研究,但是理论分析大多局限性的研究。文献[8]研究了特高频能量和视在电荷的关系,试验数据描绘成的谱图上形成各个轮廓明显的簇,不同类型放电的特高频能量水平和视在电荷水平不同,特高频信号和放电量之间有着对应关系。文献[9]对局部放电波形与其激发UHF电磁波之间的关系进行仿真分析,指出局放脉冲电流变化率与电磁波电场强度近似呈线性关系。同时,文献[10]用最小二乘法拟合特高频信号能量与视在放电量之间关系的曲线,结果表明UHF信号的峰峰电压与视在放电量有较高的线性关系,其放电累积能量与视在放电量存在二次曲线的关系,其中还用线性回归验证了

拟合曲线和试验数据点的紧密相关度,证实拟合曲线能很好地代表这两个参量之间的关系。此外,从文献[11]中也可可见两种方法所得的检测结果之间有着相同的变化趋势:即较强放电活动的发生,不仅表现在视在放电量的变大,而且激发出更强的特高频电磁信号;从特高频信号的接收来分析,辐射出较强的特高频信号,需要中和更多的正负电荷,同时产生很大的脉冲电流。文献[12]研究发现同一类型缺陷在不同检测频段上UHF信号幅值与视在放电量之间存在较为明显的对应关系,不同频段间对应关系存在差异,可以近似采用一元线性多项式回归模型对不同类型缺陷UHF信号幅值进行放电量标定。

然而,GIS内部SF₆气体的压强通常在0.3~0.5 MPa之间不等,目前对不同气压下UHF信号与放电量的关系却鲜有研究。本文采用针板间隙模拟金属突出物缺陷,对不同气压下特高频局部放电的信号波形进行分析,将提取的信号能量与脉冲电流法测得的放电量进行相关分析,探索不同气压下局部放电UHF信号的定量问题。

1 局部放电检测系统

1.1 局部放电检测试验装置

为对采集到的特高频信号与视在放电量进行对比分析,本文建立了基于特高频和脉冲电流的局部放电联合检测系统^[13-15],实验装置如图1,脉冲电流回路采用并联接线,选用针板间隙模拟金属突出物缺陷。其中,电源为无晕试验变压器(YDTW-10/50),保护电阻10 kΩ,无晕耦合电容为2000 pF,检测阻抗采用RC型,UHF传感器采用外置微带贴片天线,通过高频同轴电缆分别将脉冲信号与特高

频信号传输到示波器的两个通道进行采集。所用数字存储示波器为力科 7000 系列,带宽 1 GHz,最大采样频率 20 GHz,存储深度为 2×24 MB。实验环境平均温度 17.1 ℃。

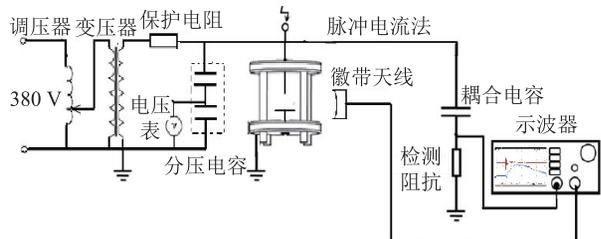


图1 实验装置电路

Fig.1 Circuit diagram of experimental apparatus

实验采用圆筒密封容器模拟 GIS 同轴腔体结构,腔体由有机玻璃做成,调节针板间隙距离为 10 mm。此外装置对高压引线和电极均有防晕处理,避免设备本身可能产生的电晕影响实验结果的可靠性。

1.2 脉冲电流法系统校准

校准接线如图 2 所示,在不施加试验电压的情况下,将一输出可调的校正脉冲发生器与试品并联,在试品两端注入已知放电量的脉冲信号,然后在示波器上测量检测阻抗两端电压的幅值大小 U 。调节脉冲发生器输出不同的放电量 (500 pC, 100 pC, 50 pC, 10 pC),可以绘制检测阻抗两端电压 U (mV) 与视在放电量 q (pC) 的关系。需要特别注意的是,当改变绝缘气体压强时,相当于试品 C_x 即试验回路发生变化,需要重新校准,获得确切的放电水平。图 3 以 10 mm 针板间隙充入一个大气压的 SF₆ 的情况为例,给出根据校准数据拟合得到的校准曲线。

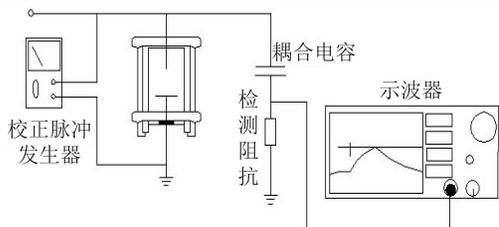


图2 脉冲电流法校准电路

Fig.2 Calibration circuit of the pulse current method

1.3 试验数据分析方法

在局部放电起始电压 U_i 和击穿电压 U_b 之间均匀设定 3 个电压测量点 U_1, U_2, U_3 , 利用示波器的双通道采集模式,对特高频信号和脉冲电流信号同时采集。在每个测量电压作用下局放稳定后,设置示

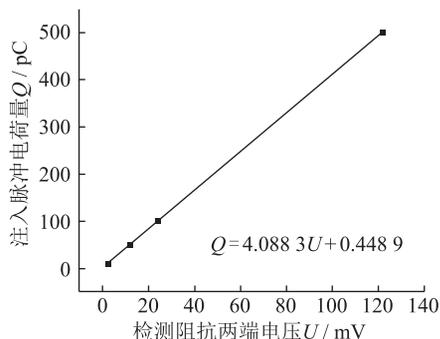


图3 脉冲电流法校准曲线(0.1 MPa)

Fig.3 calibration curve of pulse current method (0.1 MPa)

波器的采样率 2.5 GS/s,采集的数据长度 10 μs,实时分别记录同一时刻的 UHF 和脉冲电流信号波形及其 100 组数据,以保证实验数据具有良好的统计性和可重复性。图 4 为同时用 UHF 法和脉冲电流法测得的单次采样数据波形,中上方是 UHF 信号波形,下方是脉冲电压波形。

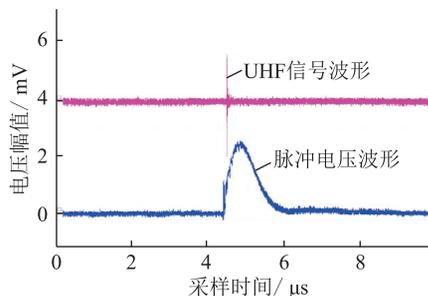


图4 UHF 信号和脉冲电流法信号波形

Fig.4 waveform of UHF signal and pulse current signal

文献[16]结合电磁场与电磁波理论、天线与辐射理论,对 UHF 信号与放电量的作理论推导,得出放电能量与视在放电量的平方呈正比例关系。为了试验分析 UHF 信号与其视在放电量的联系,需作以下数学处理:读取每组脉冲电流信号幅值,根据校准函数算出视在放电量 q ;对 UHF 信号读取其峰值,由式(1)计算其放电累积能量。

$$E_s = \frac{\Delta t}{R} \sum_N U_n^2 \quad (1)$$

式中: U_n 表示 UHF 信号的第 n 个采样点的电压值;负载阻抗 $R=50 \Omega$; N 为天线测得单次波形的点数,实验中采样频率为 2.5 GS/s,数据长度为 10 μs,故 $N=2.5 \text{ GS/s} \times 10 \mu\text{s} = 25000$ 个,采样时间间隔 Δt 为 0.4 ns。引入相关系数 r 对数据进行回归分析^[17],其中 y_i 为第 i 个自变量 x_i 对应的观测值。

$$r^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y} \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2 \right)} \quad (2)$$

2 特高频信号与放电量关联分析

2.1 同一电压作用下 UHF 信号与放电量关系

描绘各个电压下 UHF 信号的放电累积能量 E_s 与视在放电量 q 的关系,并用最小二乘法进行曲线拟合,表 1 所示为计算所得的相关系数。以 9 kV 电压下的放电为例,图 5 是 UHF 信号累积能量与放电量平方的关系图。从中可以看出上述参量之间始终保持比较高的线性度,放电分散性没有随电压升高而变化,放电稳定性始终保持不变,与理论推导结果一致,这为 UHF 信号放电量标定提供了基础。

表 1 UHF 信号各参量的相关系数

Tab.1 Correlation coefficient of UHF signal parameters

气压 0.1 MPa		气压 0.2 MPa		气压 0.3 MPa	
试验电压/kV	相关系数	试验电压/kV	相关系数	试验电压/kV	相关系数
9	0.917	16	0.933	20	0.894
11	0.970	20	0.971	25	0.979
13	0.858	24	0.962	30	0.969

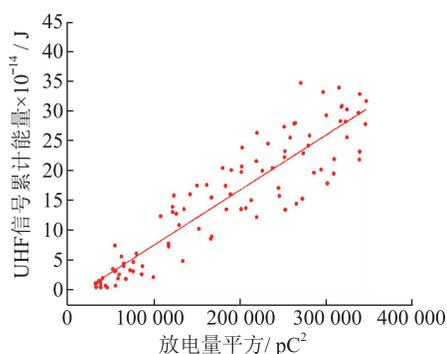


图 5 同一电压下 UHF 信号累积能量与放电量的关系

Fig.5 The relationship between the cumulative energy of UHF signal and discharge quantity under the same voltage

2.2 恒定气压下不同电压放电

图 6—图 8 是各试验电压下的 UHF 放电能量与放电量的关系。可以看到,在同一气压下,随着电压的升高,UHF 放电累积能量都有增大的趋势,但其趋势是一致的,不同电压下的数据基本回归到同一条直线上,其回归直线的斜率不受电压的影响。

2.3 不同气压下放电

由图 9 可得,当改变气压时,UHF 信号累积能量与放电量平方之间仍然保持线性关系,与之前不同的是,气压会影响 UHF 放电能量与放电量平方之间的拟合直线的斜率。即不同气压下的线性关系存在差异的,较高气压的回归直线具有较大的斜率 k ,如图 10 所示。

从单次放电的角度分析,相同的放电量所对应

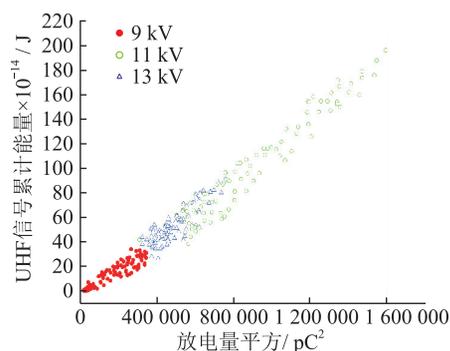


图 6 不同电压下 UHF 信号累积能量与放电量的关系 (0.1 MPa)

Fig.6 The relationship between the cumulative energy of UHF signal and discharge quantity under different voltage (0.1 MPa)

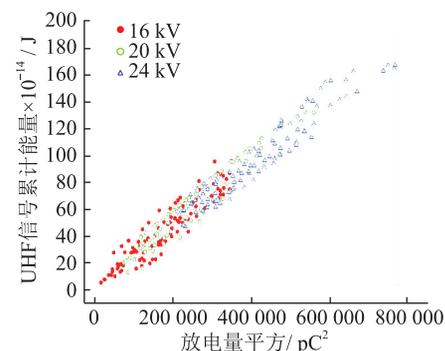


图 7 不同电压下 UHF 信号累积能量与放电量的关系 (0.2 MPa)

Fig.7 The relationship between the cumulative energy of UHF signal and discharge quantity under different voltage (0.2 MPa)

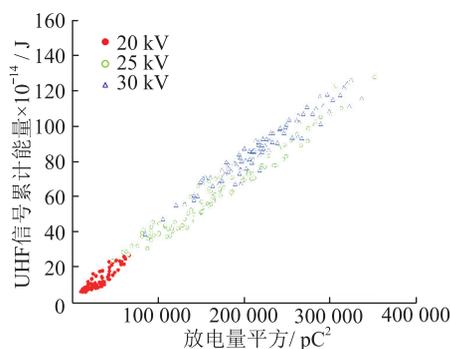


图 8 不同电压下 UHF 信号累积能量与放电量的关系 (0.3 MPa)

Fig.8 The relationship between the cumulative energy of UHF signal and discharge quantity under different voltage (0.3 MPa)

的 UHF 信号能量随着气压的升高而增加。此外,放电量分布区域随着气压的升高而急剧缩小,这是因为气压越大,自由带电粒子运行的自由行程越小,带电粒子碰撞过程中累积能量越少,进而削弱电晕放电的发展,故此放电量分布范围较为狭窄。

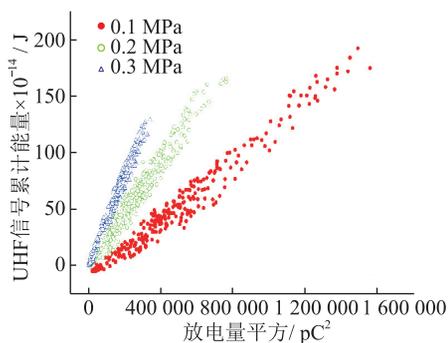


图9 不同气压下 UHF 信号累积能量与放电量的关系

Fig.9 Relationship between cumulative energy of UHF signal and discharge at different pressure

因此,通过拟合得到回归直线斜率 k 与气压的变化关系,然后根据式(3)就可实现根据特高频信号推算出视在放电量:

$$q = \sqrt{\frac{E_s}{k}} \quad (3)$$

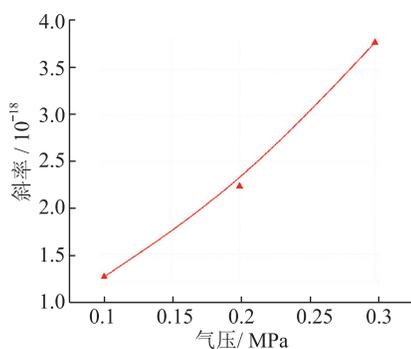


图10 回归直线斜率随气压的变化规律

Fig.10 The variation law of the slope of regression line with air pressure

3 结论

本文通过大量的实验数据分析,分别描绘了不同气压下针板间隙局部放电的 UHF 信号和视在放电量的关系谱图,得到的研究结果如下:

(1) 针板间隙 UHF 局部放电信号的累积能量与视在放电量的平方保持线性函数统计关系,同一局部放电源在不同电压下的实验数据均可回归至一条直线上,放电性质不受电压变化的影响。

(2) 当改变气压时,特高频信号累积能量、视在放电水平等也发生明显变化,致使放电分布区域随气压升高而变窄。但不同气压条件下,UHF 信号累积能量与放电量的平方始终线性相关,且高气压下线性斜率越大。

参考文献:

[1] 胡 鹏,李成钢,陈大兵. 电缆 GIS 终端环氧套管开裂原因分析及对策研究[J]. 电力工程技术,2017,36(1):102-105.

HU Peng, LI Chenggang, CHEN Dabing. Cause analysis and countermeasure study of cracking accident of cable GIS terminal epoxy casing [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017,36(1):102-105.

[2] 王昌长,李福祺,高胜友. 电力设备的在线监测和故障诊断[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

WANG Changchang, LI Fuqi, GAO Shengyou. On-line monitoring and diagnosis for power equipment[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2006.

[3] 施景奎,宋云翔,杨景刚. 一起 252 kV 组合电器局放异常信号分析处理[J]. 电力工程技术,2017,36(6):127-130.

SHI Jinglei, SONG Yunxiang, YANG Jinggang. Analysis and treatment of partial discharge abnormal [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017,36(6):127-130.

[4] 周 倩,唐 炬,唐 铭,等. GIS 内 4 种典型缺陷的局部放电超高频数学模型构建[J]. 中国电机工程学报,2006,26(8):99-105.

ZHOU Qian, TANG Ju, TANG Ming, et al. Mathematical model of four typical defects for UHF partial discharge in GIS [J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(8):99-105.

[5] JUDD M D, COVENTRY P F, BLACKETT J. Contact discharge test cell: "a means of generating signals for sensitivity verification of UHF PD detection in GIS" [C] // Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. IEEE, 2002: 407-410.

[6] 阮 羚,高胜友,郑 重. 基于甚宽带脉冲电流法的局部放电检测系统 [J]. 电工电能新技术,2009,(3):54-57.

RUAN Ling, GAO Shengyou, ZHENG Zhong. Partial discharge detection system based on very wide bandwidth pulse current method [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2009,(3):54-57.

[7] 刘 山. 基于超声波、特高频方法的 GIS 局部放电检测技术研究 [D]. 北京:华北电力大学,2015.

LIU Shan. Research of GIS partial discharge detection technology based on ultrasonic and UHF method [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

[8] REID A J, JUDD M D, FOURACRE R A, et al. Identification of simultaneously active partial discharge sources using combined radio frequency and IEC 60270 measurement [J]. Science Measurement & Technology Let, 2016,5(3):102-108.

[9] OHTSUKA S, TESHIMA T, MATSUMOTO S, et al. Relationship between PD induced electromagnetic wave measured with UHF method and charge quantity obtained by PD current waveform in model GIS [C] // Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006 IEEE Conference on. IEEE, 2015:615-618.

[10] 唐 炬,吴建蓉,卓 然,等. 针-板局部放电 VHF 信号与放电量之间的等量关系 [J]. 高电压技术,2010,36(5):1083-1089.

TANG Ju, WU Jianrong, ZHUO Ran, et al. Relationship between VHF signals and discharge magnitude of partial discharge from needle plate electrode [J]. High Voltage Engineering, 2010,36(5):1083-1089.

- [11] 赵晓辉,杨景刚,路秀丽,等. 油中局部放电检测脉冲电流法与超高频法比较[J]. 高电压技术,2008,34(7):1041-1404.
ZHAO Xiaohui, YANG Jinggang, LU Xiuli, et al. Comparative research on current pulse method and UHF measurements of partial discharge in mineral oil[J]. High Voltage Engineering,2008,34(7):1041-1404.
- [12] 王 辉,郭志红,云玉新,等. GIS 四种缺陷局放 UHF 信号标定技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(21):7-13.
WANG Hui, GUO Zhihong, YUN Yuxing, et al. Research of UHF calibration technique for four kinds of partial discharge defects in GIS[J]. Power System Protection and Control, 2012,40(21):7-13.
- [13] 张金玉,关根志. 高电压实验[M]. 北京:中国电力出版社,1996.
ZHANG Jinyu, GUAN Genzhi. High-voltage experiment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.
- [14] GB/T 7354—2003 局部放电测量. 北京:中国标准出版社,2004.
GB/T 7354—2003 Partial discharge measurements. Beijing: Standard Press of China,2004.
- [15] REID A J, JUDD M D, FOURACRE R A, et al. Simultaneous measurement of partial discharges using IEC 60270 and radio-frequency techniques[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011,18(2):444-455.
- [16] 谢颜斌. 超高频局部放电信号等效源数学模型及其与放电量的关联分析[D]. 重庆:重庆大学,2010.
XIE Yanbin. Study on mathematical model of equivalent source of PD in GIS calibration of discharge quantity of UHF signal[D]. Chongqing: Chongqing University,2010.
- [17] 滕素珍,冯敬海. 数理统计学[M]. 4版. 大连:大连理工大学出版社,2005.
TENG Suzhen, FENG Jinghai. Mathematical statistics[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press,2005.

作者简介:



汪正江

汪正江(1989—),男,硕士,工程师,从事高电压与绝缘技术相关工作(E-mail: zhengjiangwang@126.com);

夏红攀(1980—),男,本科,工程师,从事电气设备绝缘在线监测相关工作(E-mail: 563686462@qq.com)。

Influence of Relationship between UHF Signals and Discharge Quantity of Partial Discharge under Varius Pressure in Gas Insulated Switchgear

WANG Zhengjiang, XIA Hongpan

(State Grid Hubei Electric Power Co.,Ltd. Ezhou Power Supply Company, Ezhou 436000, China)

Abstract: Owing to the features of high sensitivity and good anti-jamming capability, Ultra High Frequency (UHF) is widely used in the field test of Gas Insulated Switchgear (GIS). In order to explore the relationship between UHF signals and apparent discharge magnitude, this paper established combined measurement system, partial discharges data on metal protrusions under pressures from 0.3 to 0.5 MPa were collected. The cumulative energy of UHF signals was extrated to conduct a correlation analysis with apparent discharge magnitude. It is concluded that the signal energy has a linear relationship with the square of discharge quantity unedr different pressure. The linear slope has a strict relation with pressure. The results can lay a foundation on the calibration of UHF signals..

Key words: partial discharge; ultra high frequency; gas pressure; calibration of discharge quantity

(编辑 钱悦)