

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.05.028

GIS悬浮电极缺陷局部放电测量与分析

路俊勇¹, 张 婷¹, 司刚全^{1,2}, 姚 锐², 王 岗¹, 史亚斌¹

(1. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 笔者通过建立试验模型对气体绝缘全封闭式组合电器设备中悬浮电极缺陷局部放电特征进行深入研究,在实验室中以一段220 kV电压等级的GIS设备为试品,设计了悬浮电极缺陷放电物理模型,采用逐级加压法对悬浮电极进行局部放电试验,试验过程中同时采用脉冲电流法、特高频法和超声波法对局部放电情况进行监测,获取悬浮电极缺陷的放电特征及发展趋势。试验结果表明,随着施加电压的升高,悬浮电极缺陷的放电程度越来越剧烈,具体表现为放电次数增多、放电幅值增大和放电相位区间变宽。利用特高频传感器获取的放电数据,绘制了悬浮电极缺陷放电脉冲的时域、频域谱图及PRPD谱图,为局部放电严重程度评估提供了依据;同时对试验采用的3种检测方法观测结果进行了对比分析,结果表明,特高频法能够避免电磁干扰,具有高的灵敏度,更适合于局部放电在线检测。

关键词: GIS; 局部放电; 悬浮电极; 特高频法; 超声波法

Measurement and Analysis of Partial Discharge on Floating Electrode Defect in GIS

LU Junyong¹, ZHANG Ting¹, SI Gangquan^{1,2}, YAO Rui², WANG Gang¹, SHI Yabin¹

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Partial discharge (PD) characteristics of floating electrode defect in gas insulated switchgear (GIS) sample were investigated. Physical model of floating electrode defect was designed and placed in the cavity in a 220 kV GIS for experiment. The voltage on GIS was gradually increased to make in-depth observation of PD development process. The pulse current method, the UHF method and the ultrasonic method were used to monitor the PD process and obtain PD characteristics and development trend of the defect. Experimental results showed that the PD became more violent with the increase of applied voltage with larger discharge number, higher discharge amplitude, and wider phase interval. In addition, the time-domain spectrum, frequency-domain spectrum and PRPD spectrum of PD were obtained from the PD data of UHF signals to evaluate the severity of partial discharge generated by the floating electrode defect. Comparison among the three PD detection methods indicates that the UHF method is more suitable for online partial discharge detection because of its better anti-interference performance and higher sensitivity.

Key words: GIS; partial discharge; floating electrode; UHF method; ultrasonic method

0 引言

气体绝缘组合电器 (gas insulated switchgear, GIS) 因具有占地面积小、维护工作量少、绝缘性能优良、可靠性高等优点而被广泛应用于高压输电领域^[1-2]。根据 CIGRE 的 23.10 工作组国际调查报告的统计数据,绝缘故障是导致 GIS 事故的主要原因,

而且绝缘故障多数发生在较高电压的设备中,绝缘击穿后果比较严重,因而受到国内外的广泛关注^[3-5]。通过检测局部放电发现 GIS 的绝缘缺陷是一种科学有效的方法^[6-7],局部放电不仅是 GIS 设备绝缘劣化的先兆和表现形式,而且能够引起绝缘的进一步劣化,致使 GIS 的电气绝缘性能降低,最终导致绝缘击穿或沿面闪络^[8-9]。

根据局部放电产生的物理、化学现象, GIS 局部

放电的检测方法众多,主要可分为电检测法和非电检测法。笔者主要采用脉冲电流法、特高频法和超声波法对 GIS 内部悬浮电极缺陷的局部放电特征进行试验研究。悬浮电极缺陷在实际运行过程中可能是由于安装的屏蔽电极与高压导体或接地外壳间的接触不良而形成,严重影响 GIS 的运行安全。通过试验研究,可以有效获取该缺陷的局部放电特征,并对 3 种局部放电检测方法的优缺点进行对比分析,从而为现场进行局放故障诊断及放电类型的模式识别提供依据和支撑。

1 GIS 悬浮电极缺陷局部放电试验

1.1 GIS 局部放电试验装置

GIS 局部放电试验装置的搭建,是为了在实验室条件下获得各类绝缘缺陷放电数据从而探索相关缺陷的局部放电特性。通过研究缺陷放电特征,从而为局部放电在线监测系统提供特征图谱。为了更好地模拟实际运行的 GIS 局部放电情况,试验装置应尽可能接近真实产品,针对 GIS 表现为内外同轴的结构特点,试验装置应有一定的长度从而模拟放电产生的电磁波传输特性。

笔者所采用的试验装置基于实际的 220 kV GIS 构造,见图 1,装置试验段由 2 个盆式绝缘子、一段全长约 2 700 mm 的 220 kV GIS 同轴体、内置式特高频传感器、局部放电源、无局放试验电源和 SF_6 充放气系统组成。其中盆式绝缘子外径 520 mm,厚度 40 mm。腔体内导体外直径为 106 mm,外壳内直径为 320 mm。局部放电源置于 0.4 MPa SF_6 的气室内。

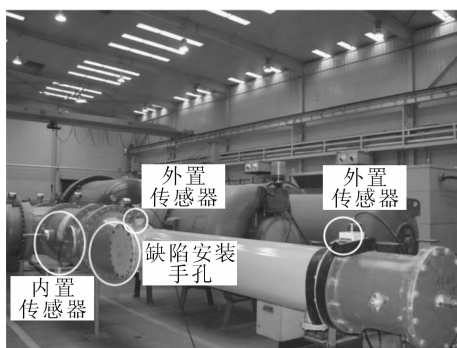


图 1 GIS 模拟试验装置

Fig. 1 GIS experimental setup

试验装置上安装的特高频内置传感器,其原理和结构见图 2,其工作频带为 500~3 000 MHz。

1.2 悬浮电极缺陷模型设计与放置

根据悬浮电极绝缘缺陷放电机理和特点,设计了如图 3 所示的悬浮电极物理模型。该模型选取一直径为 33 mm 的垫片,用电钻在垫片一侧钻出一个

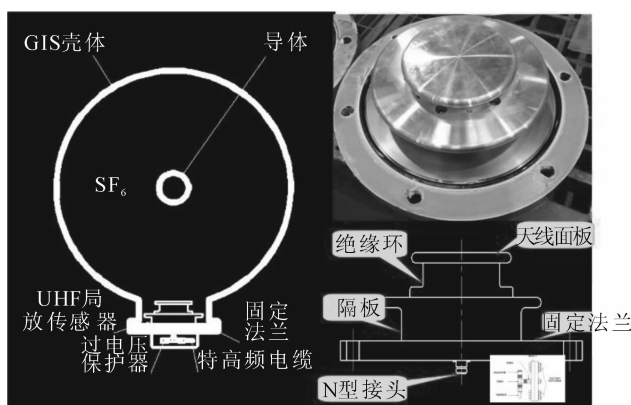


图 2 内置传感器原理与结构

Fig. 2 The principle and structure of inner UHF sensor

直径为 2 mm 的小孔,其中钻入侧打磨光滑,钻出侧不做处理,保留尖端突出部分。

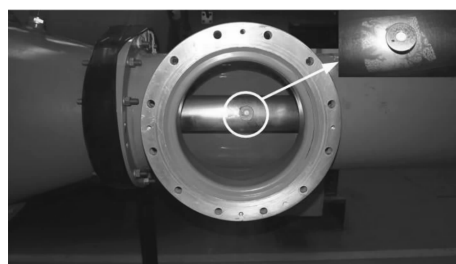


图 3 悬浮电极缺陷模型

Fig. 3 Defect model of floating electrode

打开 GIS 工装手孔,在正对手孔处,用透明胶带在高压导体上缠绕一圈后,将制作好的悬浮电极模型放置到缠绕过胶带后的高压导体上,并用胶带继续缠绕半圈将垫片固定住。在放置悬浮电极模型过程中,将带有尖端突出物的一侧靠近高压导体放置。由于垫片与高压导体之间被透明胶带隔离,未直接接触,因此属于悬浮电极缺陷。

1.3 局部放电测量系统

试验系统接线图见图 4,系统试验电源采用调压器和无局放试验变压器(额定电压 750 kV,额定功率 375 kV·A)组成,无局放试验变压器采用罐式,与 GIS 装置采用口对口的连接方式,试验电压在 0~750 kV 内可调。 C_k 为耦合电容,500 pF; C_x 为 GIS 模拟试验装置等效电容; Z_m 为宽带检测阻抗。

笔者同时采用特高频法、脉冲电流法和超声波法对局部放电进行检测,为实现对特高频传感器信号进行实时测量和记录,选用泰克示波器(型号: DPO7354A,带宽 3.5 GHz,对应于 1/2/4 通道,其采样率为 40/20/10 GS/s,存储深度为 50/25/12.5 M)进行数据收集;脉冲电流法局放测量系统采用上海松宝科技发展有限公司产的 JF-2001 干扰判别式局放仪;超声波法测量系统采用 AIA 超声波局部放电检

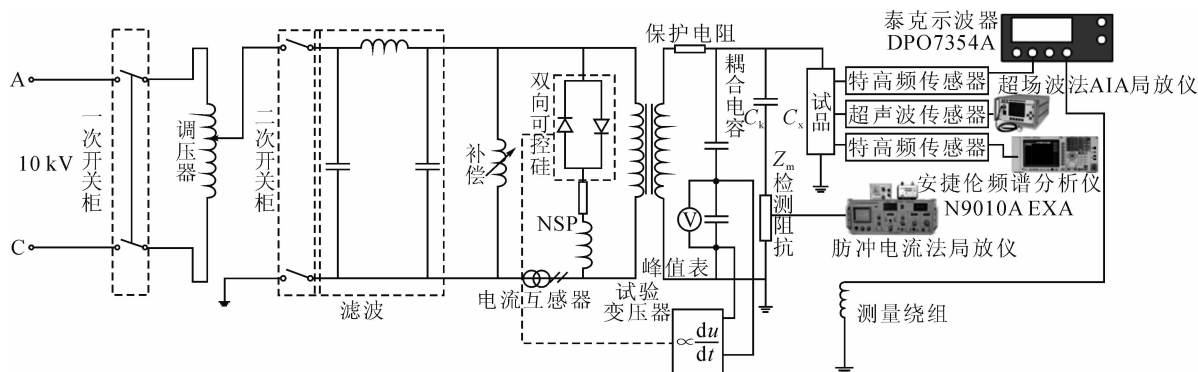


图 4 局部放电测量原理图

Fig. 4 Principle diagram of partial discharge measurement system

测仪。同时,将特高频传感器输出信号放大后经高频电缆送至 Agilent 频谱分析仪,便于对局放脉冲进行频谱特征分析。电源电压经过分压器变为低压信号输入到测量系统作为频谱分析仪的外部触发信号。在工频“0”相位的时候,触发电路触发频谱仪开始采样,从而可以得到放电频谱和电源相位的关系。

2 试验中用到的检测方法

GIS 局部放电时会伴随产生电脉冲、超声波、电磁辐射、光、局部发热、化学反应等现象,这些现象都可以用来检测局部放电的发生^[10-13]。文中选择了具有代表性的脉冲电流法、特高频法和超声波法检测局部放电。脉冲电流法又称为耦合电容法、电荷法,是 IEC 60270—2000 推荐方法。该方法通过高压电源与耦合电容器测量和分析局部放电产生的电流脉冲。主要是利用局部放电频谱中的较低频段部分,一般为数 kHz 至数百 kHz,以避免无线电干扰。这种方法简单易于实现,但现场应用中无法避免电磁噪声的影响,灵敏度也较低^[14-16]。脉冲电流法应用广泛,已成为局部放电测试中最基本的方法,但主要用于出厂测试,在线监测应用较少。

特高频法是通过安装在非金属绝缘子上的特高频外置传感器或内置传感器测量 GIS 局部放电激发产生的电磁波的一种方法。由于 SF₆ 气体具有很高的击穿强度,所以 GIS 内局部放电产生的电流脉冲上升时间及持续时间仅为纳秒范围的电流陡脉冲,频率一般为 300 MHz~3 GHz,即特高频(ultra high frequency, UHF)范围。由于 GIS 的同轴结构,电磁波不仅可以在 GIS 内部传播,而且可以透过盆式绝缘等非金属材料泄漏到 GIS 外,使用 UHF 天线可以检测到 GIS 局部放电产生的电磁波。该方法的主要优点是灵敏度高、抗干扰能力强,并能够根据电磁波从放电源到不同传感器的时间差对放电源进行定位,目前已经成功应用到 GIS 生产和在线运行

检测中^[17-18]。

超声波法是通过安装在外壳上的超声波传感器测量 GIS 内产生局部放电信号时产生的振动及声音信号。超声波法可以进行局部放电的定位,但其灵敏度较低。超声波法是目前使用的除 UHF 方法之外较为成熟的局部放电监测方法,由于其检测特点,主要作为便携式带电检测使用^[16,18-19]。

3 局部放电测量及分析

3.1 特高频局部放电脉冲特征分析

将频谱分析仪设置为 FREE RUN /MAX SPAN 模式,在该模式下得到的局放脉冲的特高频信号时域和频域谱见图 5,从图 5 可以看出,悬浮电极缺陷局放脉冲持续时间约为 0.3 μs,其能量主要集中在 400 MHz~2.7 GHz,能量最大处为 1~1.2 GHz,1.3 GHz 以上信号开始迅速衰减,到 2.7 GHz 基本无局放信号,仅剩背景噪声。将频谱分析仪设置为 ZERO SPAN 模式,将局放脉冲信号中能量最集中的频率点 1.2 GHz 作为中心频率,得到时域波形见图 6,从图 6 可以看出,放电在正负半周均有发生。

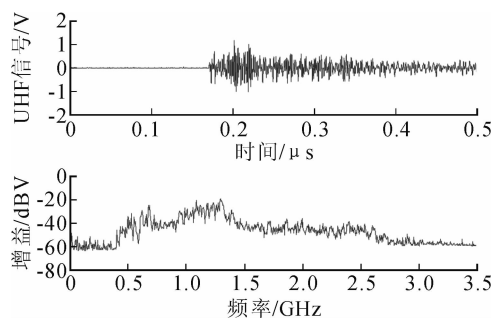


图 5 370 kV 局放脉冲特高频信号时域与频域谱图

Fig. 5 Spectra of UHF signals in time domain and frequency domain under 370 kV

3.2 特高频信号 PRPD 谱图分析

笔者设计的悬浮电极缺陷物理模型中,悬浮垫片与导电杆之间耦合出一个电容,属于容性放电。

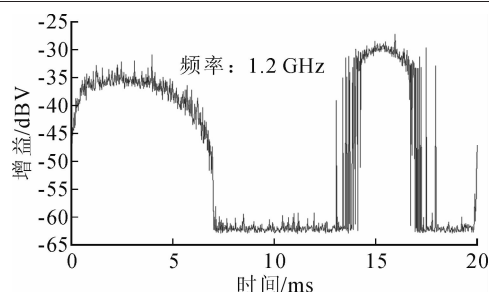


图6 零展频模式下1.2 GHz频率的时域波形图

Fig. 6 Spectra of UHF signals with 1.2 GHz in time domain at zero-span mode

当发生局部放电时,特高频传感器所采集的放电信号幅值较大。当 SF_6 气体压强为0.4 MPa、电源施加电压达到296、370、410 kV时,通过特高频法获得的放电信号谱图见图7。

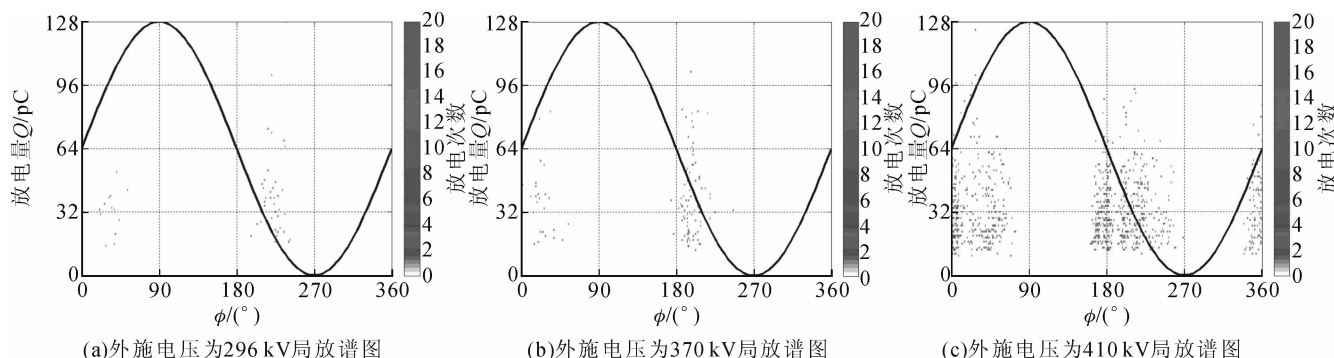


图7 特高频法局放谱图

Fig. 7 PD spectra of UHF method

当电压进一步增大到410 kV时,对应图7(c),放电幅值更大,放电也更为密集,正半周放电次数增长显著,但仍少于负半周。放电区间变得更宽,分布在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 、 $150^\circ\sim 270^\circ$ 、 $330^\circ\sim 360^\circ$,将工频信号的首尾相接,可以看出,悬浮电极缺陷其放电可以分为两个簇,均位于外施工频信号的过零点附近,可以进一步判定,该缺陷放电与外施电压的变化率密切相关,而与外施电压幅值关系较小。

当施加电压升到418 kV时,发生击穿。在高压导体上也留下了电灼伤的痕迹,见图8。

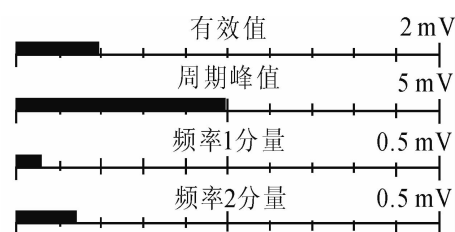
由以上分析可知,随着外施电压的升高,悬浮电极缺陷局部放电具有以下特征:正半周和负半周的放电次数均增多,放电相位区间逐渐变宽。放电相位特征明显,放电比较稳定,正、负半周基本对称。

3.3 超声波法与脉冲电流法测量与分析

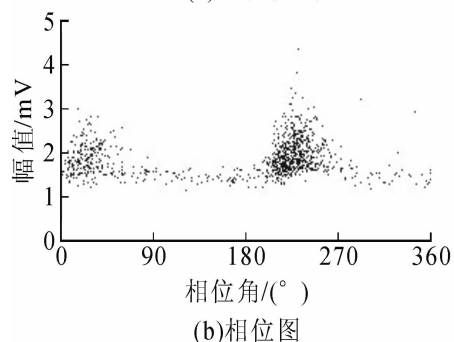
当发生局部放电时用AIA便携式超声波局放检测仪对局部放电信号进行采集分析,在工频信号正负半周均能检测到局部放电信号。在外施电压为370 kV时,其检测结果见图9,从图9中可以看出,超声波法检测结果与特高频方法得到的放

由于悬浮体与高压导体之间的间隙是固定的,其放电波形、放电相位及放电量规律性强。试验中观察到初始放电发生在施加工频电压负半周的下降阶段和正半周的上升阶段。当施加电压为296 kV时,放电幅值小,放电次数少。放电区间主要集中在 $20^\circ\sim 60^\circ$ 和 $190^\circ\sim 240^\circ$ 。这种局部放电以流注放电或流注直接击穿为主要表现形式。由于悬浮电极一般接近高压导体,故多发生在负极性电压下。

电压继续升高到达370 kV时,放电发展到第2阶段,由放电图谱图7(b)可以看出正、负半周放电次数明显增多,放电量也明显增大,正半周的放电次数少于负半周,负半周有连续的放电脉冲出现。放电区间扩展到 $0^\circ\sim 60^\circ$ 和 $180^\circ\sim 230^\circ$ 。



(a)连续模式



(b)相位图

图8 悬浮电极缺陷放电击穿

Fig. 8 Breakdown photo of floating electrode

电谱图的结果是一致的,放电相位区间为 $20^\circ\sim 60^\circ$ 和 $190^\circ\sim 240^\circ$,正负半周基本对称,负半周放电次数多于正半周。

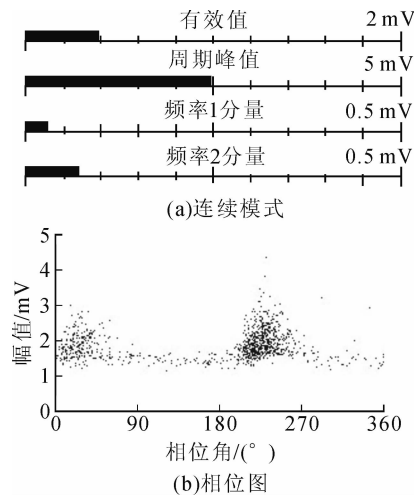


图 9 在 370 kV 电压下超声波法局放图

Fig. 9 PD spectra with the ultrasonic method under 370 kV

表 1 所示为不同电压下的脉冲电流法测得的放电量以及超声波法测得的声波幅值及有效值随施加电压的变化规律, 超声波法测试频率范围 10~100 kHz。从表 1 可以看到,随着放电电压增大脉冲电流法和超声波法得到的放电幅值均比较稳定,这主要是因为悬浮电极与高压导体之间间隙固定,电容值比较稳定,所以放电量也比较稳定。

表 1 悬浮电极缺陷超声波法和脉冲电流法测试数据

Table 1 Test data of floating electrode with the ultrasonic method and IEC 60270—2000 method

充气 压力/ MPa	脉冲电流法		超声局放数据				
	施加 电压/ kV	放电 量/pC	施加 电压/ kV	测试 有效 值/mV	测试 峰值 /mV	50 Hz 相关 性/mV	100 Hz 相关 性/mV
0.4	296	132	248	1.8	13.5	0.16	0.50
	350	603	275	1.7	13.2	0.98	0.47
	370	610	325	2.1	15.0	0.23	1.10
	390	703	373	1.8	25.0	0.25	1.10
	400	794	425	2.3	18.0	0.20	1.20
	410	620	460	2.3	20.0	0.55	1.00

4 结论

笔者采用脉冲电流法、特高频法和超声波法,对试验 GIS 中的悬浮电极模型进行了局部放电试验研究,获取了该模型的放电特征。试验表明,3 种方法均能有效捕获局部放电,但特高频方法获得的局放信息更丰富、更全面,能够更好地为 GIS 局放评估及模式识别提供依据。

参考文献:

[1] 苑 舜. 高压开关设备状态监测与诊断技术[M]. 北京:机械工业出版社,2001.

[2] 邱昌容,王乃庆. 电工设备局部放电及其测试技术[M]. 北京:机械工业出版社,1994:30-45.

[3] OKUBO H,HAYAKAWA N. A novel technique for partial discharge and breakdown investigation based on current pulse waveform analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2005,12(4):736-744.

[4] 王建生,邱毓昌. 气体绝缘开关设备中局部放电的在线监测技术[J]. 电工电能新技术,2000,19(4):44-48. WANG Jiansheng,QIU Yuchang. On-line partial discharge monitoring techniques for gas insulated substations[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2000,19(4):44-48.

[5] 耿弼博. GIS 金属颗粒放电发展的试验研究[J]. 电网与清洁能源,2011,27(7):16-20. GEGN Bibo. Experimental study on developing processes of metallic particle discharges in GIS[J]. Power System and Clean Energy,2011,27(7):16-20.

[6] SAKAKIBARA T,NAKAJIMA T,MARUYAMA S,et al. Development of GIS fault location system using pressure wave sensors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999,14(2):371-377.

[7] HASEGAWA Y,LZUMI K,KOBAYASHI A,et al. Investigation on phenomena caused by insulation abnormalities in actual GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994,9(2):796-804.

[8] QI Bo,LI Chengrong,GENG Bibo,et al. Severity diagnosis and assessment of the partial discharge provoked by high-voltage electrode protrusion on GIS insulator surface[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(4):2363-2369.

[9] LAPP A,KRANZ H G. The use of the CIGRE data format for PD diagnosis applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2000,7(1):102-112.

[10] KIM J B,KIM M S,PARK K S,et al. Development of monitoring and diagnostic system for SF₆ gas insulated switchgear[C]//Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Boston, US-A: IEEE,2002:453-456.

[11] IEC Pub. 60270—1981 Partial discharge measurements[S]. 1981.

[12] PEARSON J S,HAMPTON F B,SELLARS A G. A continuous UHF monitor for gas-insulated substations[J]. IEEE Trans.on Electrical Insulation,1991,6(3):469-478.

[13] HOSHINO T,KATO K,HAYAKAWA N,et al. Frequency characteristics of electromagnetic wave radiated from GIS apertures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2001,16(4):552-557.

[14] JIN Lijun,HU Qing,ZHANG Mingrui,et al. On-line detection and examination research on PD in GIS[C]//ISEIM. Japan:[s.n.],2005:53-55.

- [15] TANG Ju, XU Zhongrong, ZHANG Xiaoxing, et al. GIS partial discharge quantitative measurements using UHF microstrip antenna sensors[C]//CEIDP. Canada: [s.n.], 2007: 117-120.
- [16] HAMPTON B F, MEATS R J. Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations[J]. IEEE Proceedings Pt.c, 1998, 135(2): 137-144.
- [17] BARTNIKAS R. Partial discharges: Their mechanism, detection and measurement[J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2002(9): 763808.
- [18] International Electrotechnical Commission. IEC 60270—2000 High voltage test techniques-partial discharge measurements[S]. Switzerland: IEC Publication, 2000.
- [19] CIGRE Working Group 33/32.12. Insulation coordination of GIS: Return of experience, on site tests and diagnostic

techniques[J]. Electra, 1998, 176(2): 67-95.

路俊勇(1979—),男,工程师,主要从事智能高压设备状态在线监测、EMC抗干扰技术。

张 婷(1981—),女,工程师,主要从事智能高压设备状态在线监测、设备通讯与上位机软件的研发。

司刚全(1980—),男,副教授,研究方向为GIS局放测量。

姚 锐(1986—),女,博士研究生,研究方向为GIS局放模式识别。

王 岗(1984—),男,工程师,主要从事智能高压设备状态在线监测、电子电路硬件系统开发。

史亚斌(1983—),男,工程师,主要从事智能高压设备状态在线监测与可靠性研究。

(编辑 吴俊丽)

新书介绍

《SF₆高压电器设计》(第4版)即将发行

随着最新一版《SF₆高压电器设计》的脱销,该书作者黎斌教授已将第4版修定稿交付机械工业出版社,即将出版发行,请广大读者注意。据作者介绍,本书第4版除对一些章节作了少量补充勘误之外,重点补充了以下内容:

1)在第2章中,作者再次强调了进一步修改GB/T8905—2005国标的必要性,希望“按相对湿度进行水份的限值和控制在%”。

2)在第6章中,补充了盆式绝缘子设计中对“楔形气隙危害”的不理解和处理不当的种种表现,其中有些随进口产品进入电网,望相关人员注意。

3)在第9章补充了“特高压GCB灭弧室设计思路”。

4)为加快GIS小型化,第17章提出“现在应抓紧研发和积极使用252kV三相共箱式GIS”。并对其中的关键技术——GCB短路开断三相热气流的冷却与排放提出了结构设计思路。

5)由于高压电器产品的设计制造者,运行维护管理者大都毕业于高电压绝缘或高低电器制造专业,对与局部放电息息相关的微波技术比较生疏,这对研究和局放智能监测技术是个障碍。作者在第4版中增写了第18章“超高频(UHF)局放电磁波的辐射、传输与接收”,将与局放有关的微波技术引入高压行业,有助于从理论上对局放监测有更深入的理解,在这一章,作者对各种局放传感器的研制也提出了一些建议。

6)第19章中,作者首次提出了GIS/H·GIS与电容式复合绝缘母线结合的可能性,指出了这种有机绝缘母线引入高压/超高压SF₆电器后,具有减少SF₆气体用量、减少开关站占地面积、降低电站投资等环保和经济上的重要意义。

7)新增的第20章“SF₆气体绝缘输电线GIL设计”,结合国内已投运的某些进口GIL技术提出了一些新看法,可供有关工作人员参考。

8)在第22章中补入了“超高压交流滤波器开断”,介绍了GCB在这种工况下所遇到的新问题,分析了现有GCB不适应这种工况而发生爆炸的事故原因,提出了改进现有开关结构的有关措施,也为用户提出了选择这类开关的建议。

我国高压电器正跨入创新升级的发展期,创新发展,理论先行,作者愿以此书给正在拼搏的年轻同行助一臂之力。

受作者之托本刊转告读者:

鉴于第4版有以上多方面的修改补充和旧版本难免有因技术进步而落伍的内容,也鉴于第4版很可能是作者封笔之作,为了工作,作者建议本书的爱好者封存旧版本,使用新版本。