

特高压 GIS 设备现场标准雷电冲击耐压试验技术的应用

文 韬¹, 张乔根¹, 赵军平¹, 陶风波², 贾勇勇²

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 气体绝缘金属封闭组合电器(GIS)在电力系统中应用广泛,其运行安全可靠对电力系统至关重要。现场雷电冲击耐压试验受制于设备体积和回路电感,难以在GIS变电站,尤其是特高压GIS变电站应用。本文分析了目前GIS设备冲击耐压试验现状,并从波形参数、电压极性和加压间隔时间等方面阐述了GIS设备冲击电压绝缘缺陷检出影响因素。基于研发的特高压GIS变电站现场冲击耐压试验用的可移动式气体绝缘标准雷电冲击试验成套设备,成功在1000 kV南京站和苏州站开展了现场标准雷电冲击耐压试验。

关键词: 气体绝缘金属封闭组合电器(GIS); 现场绝缘耐压试验; 冲击耐压试验; 标准雷电冲击; 冲击电压发生器; 特高压GIS变电站

中图分类号: TM862

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)01-0030-05

气体绝缘金属封闭组合电器(GIS)^[1-5]是现代电力系统中的关键设备,相比传统的敞开式开关设备具有占地面积少、受外界环境影响小、运行安全可靠、检修周期长等显著优点^[6-10]。随着江苏电网特高压工程建设的稳步推进,1100 kV GIS设备在全部已投运与在建特高压变电站中得到了广泛应用。统计数据表明,GIS的故障率一般只有常规设备的20%~40%,但由于GIS设备采用全封闭结构,一旦发生故障,后果比敞开设备更严重,且故障修复时间长、诊断过程复杂,将造成巨大的经济损失和不良的社会影响。

GIS绝缘耐压试验是检查GIS绝缘性能最直接、最严格及最有效的试验方法^[11,12],试验电压波形主要有工频电压和冲击电压两类,其中工频耐压试验技术成熟,在厂内单元耐压试验与设备现场安装完成后的整体耐压试验阶段均可开展,而冲击耐压试验却难以在设备现场安装完成后进行,仅在设备出厂前进行冲击电压试验考核。而实际运行经验表明,已通过交流耐压试验的GIS设备在冲击耐压试验中与入网运行后仍有可能出现绝缘故障^[13],如三峡电站550 kV GIS现场交接试验中,工频耐压试验通过后,冲击耐压试验中发生了3处闪络。因此,有必要研究GIS现场雷电冲击耐压试验技术,与交流耐压试验形成互补,提供GIS设备投运前全面的最终检查。

1 GIS设备现场冲击耐压试验现状

国际大电网组织(CIGRE)曾对比不同试验电

压波形对GIS中绝缘缺陷的检测有效性,提出雷电冲击电压对高压电极表面突出物、绝缘界面金属微粒等缺陷的检测更加灵敏。IEC 62271-203:2011和GB 7674-2008绝缘耐压程序C中推荐对252 kV及以上GIS设备进行现场雷电冲击试验^[14-15]。但目前实际情况是现场多采用绝缘耐压程序B开展交流耐压试验的同时进行局部放电检测,冲击耐压试验鲜有开展的原因为工作效率低和波形质量低。

1.1 工作效率低

传统冲击电压发生器为敞开式结构,采用空气作为绝缘介质,结构尺寸庞大,例如标称电压3000 kV冲击电压发生器,本体高度达12 m。而目前GIS变电站设计建设趋于紧凑,现场道路狭窄,大体积设备安装条件较差,现场安装困难。此外,对于容量较大的GIS设备,为了满足波形参数需要,往往需要进行分段试验,冲击设备需要在变电站内进行短距离移动,此时需要拆卸重复安装,工作耗时耗力,难以适应现场实际应用需要。

1.2 波形质量低

随着电压等级的提高,GIS设备负载电容量增加,现场冲击耐压试验对于冲击电压发生器带负载能力提出新要求。传统冲击电压发生器由于结构设计和元器件选型造成本体回路固有电感较大,例如标称3000 kV冲击电压发生器,本体电感可达100 μH 。接入负载后冲击电压发生器输出双指数冲击电压波形波前时间 T_f 受制于回路电感 L 和负载电容 C ,可由公式(1)进行估算^[16],即:

$$T_f = 4.66\sqrt{LC} \quad (1)$$

收稿日期:2016-10-21;修回日期:2016-11-23

基金项目:国家电网公司科技项目(SHJJGC1500189)

假定 $C=3000\text{ pF}$, $L=100\text{ }\mu\text{H}$, 则 $T_f=2.55\text{ }\mu\text{s}$, 超过标准雷电冲击波前时间上限 $1.56\text{ }\mu\text{s}$ 。对于现场冲击耐压试验, 尤其是特高压 GIS 设备, 单个间隔负载电容量更高, 波形质量更低。现场实际应用时, 调波困难, 波形参数往往不能满足预期要求。

基于此, 文献[14][15]放宽了现场雷电冲击耐压试验波形参数要求: 雷电冲击电压波前时间可延长至 $8\text{ }\mu\text{s}$; 如果采用振荡雷电冲击电压, 波前时间可延长至约 $15\text{ }\mu\text{s}$ 。迄今为止, 振荡雷电冲击现场试验已在浙南特高压变电站中得到应用, 但雷电冲击和标准雷电冲击现场试验至今仍未开展。

2 GIS 设备绝缘缺陷检出影响因素

2.1 波形参数影响

采用波前时间约为 $10\text{ }\mu\text{s}$, 振荡频率 25 kHz 的冲击电压模拟现场冲击耐压试验用振荡雷电冲击电压。图 1 为标准雷电冲击电压和长波前振荡雷电冲击电压下, $r=0.5\text{ mm}$ 、 $d=60\text{ mm}$ SF_6 棒-板间隙 50%放电电压随气压变化曲线。从中不难看出, 长波前振荡雷电冲击比标准雷电冲击的击穿电压高约 $10\%\sim 20\%$, 即现场采用的长波前振荡雷电冲击电压检测绝缘缺陷的有效性低于标准雷电冲击电压。此外, 振荡雷电冲击波形参数受负载特性和回路参数的影响很大, 对不同负载进行试验时, 很难产生波形参数比较一致的试验电压波形。

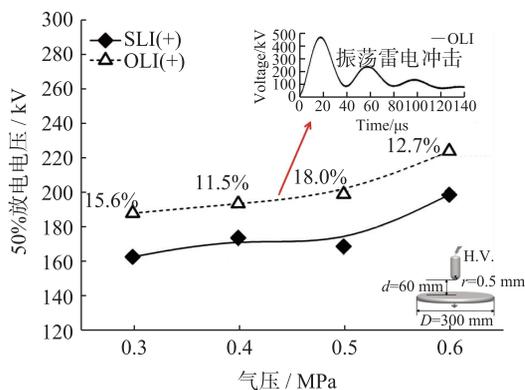


图 1 标准雷电冲击电压和长波前振荡雷电冲击电压下间隙 50%放电电压随气压变化曲线 (SLI: 标准雷电冲击; OLI: 振荡雷电冲击)

上述实验发现在长波前振荡雷电冲击电压下, 放电多发生在波形上升沿, 说明波前时间对放电特性影响较大。图 2 为 $r=0.5\text{ mm}$ 、 $d=60\text{ mm}$ SF_6 棒-板间隙在不同气压下, 50%放电电压随非振荡双指数冲击电压波前时间变化曲线。当波前时间 $T_f > 1.2\text{ }\mu\text{s}$ 时, 间隙放电电压随波前时间增加而升高, 其放电电压高于标准雷电冲击 ($1.2\text{ }\mu\text{s}$)。因此, 建

议采用标准雷电冲击电压对 GIS 设备进行绝缘耐压试验, 可提高绝缘缺陷检出概率。

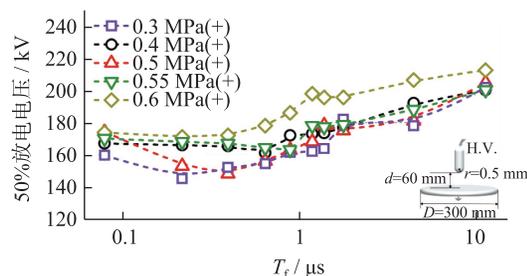


图 2 不同气压下 50%放电电压随非振荡双指数冲击电压波前时间变化曲线

2.2 电压极性影响

通常情况下, SF_6 极不均匀电场间隙正极性击穿电压低于负极性, 因此采用正极性冲击电压对 GIS 设备绝缘缺陷检测更为有效。

但近几年 SF_6 气体的放电特性研究表明, 极不均匀电场下, SF_6 棒-板间隙在冲击电压下放电电压随气压变化会出现“极性反转”现象^[17]: 在较低气压下, 负极性放电电压高于正极性; 在较高气压下, 正极性放电电压高于负极性。这种现象是由空间电荷的迁移和扩散造成的, SF_6 气体的强电负性使其极容易吸附电子, 从而形成质量和体积较大的负离子团, 致使迁移和扩散变得困难, 该负离子团易于积聚在流注头部, 严重畸变电场。伴随着气压的升高, 离子团的迁移和扩散更为不易, 加重了电场的畸变程度。另外, SF_6 气体对电场不均匀程度十分敏感, 其净电离系数随电场的增强而显著增大。

因此, 采用正、负极性冲击电压对 GIS 设备进行绝缘缺陷检测更为可靠, IEC 和 GB 试验程序 C 也这样规定: 按规定试验电压值进行工频电压试验持续 1 min , 并且对每一极性进行 3 次雷电冲击电压试验。

2.3 加压间隔时间影响

大量冲击试验实践表明, 利用升降法测量试品的 50%放电电压时, 若相邻两次加压的时间间隔太短, 会出现试品连续击穿或连续不击穿的跟随现象, 导致测量结果分散性增大, 影响试验结果准确性。间隔时间取 1 min 时试品的击穿情况如图 3 所示, 将四次以上连续耐受或击穿视为出现跟随现象, 则图中区域 I 与区域 III 出现了连续击穿的负跟随现象; 区域 II 与区域 IV 出现了连续不击穿的跟随现象。

出现跟随现象的原因为前一次加压导致的介质状态变化未得到充分恢复, 改变了后一次放电的初始条件。极不均匀电场下 SF_6 气体间隙击穿与否

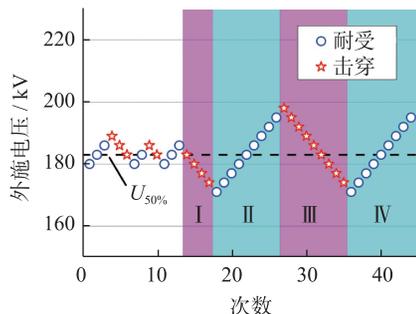


图3 1 min 间隔时间下试品放电的跟随现象

主要取决于引发电子崩的有效电子产生率与初始流注电晕对小曲率半径电极附近电场的屏蔽作用,在某次加压引发击穿后,由放电通道向外扩散的大量电子被 SF_6 分子俘获形成负离子,与 SF_6 分子相比,这些负离子在下次加压时因脱附作用更容易产生电子,使有效初始电子产生率升高,导致气隙连续击穿,出现负跟随现象;若某次加压未引发击穿,较短的时间间隔使此次加压所产生的电晕屏蔽层内空间电荷不能完全消散,这些空间电荷在下次加压时仍发挥屏蔽作用,导致气隙连续耐受,出现正跟随现象。试验研究表明,当加压间隔时间 $T_{\text{im}} \geq 5 \text{ min}$ 时,介质状态能够得到充分恢复,试品不再出现多次连续击穿或连续耐受的跟随现象。

综合考虑现场试验情况,建议两次冲击电压施加时间不小于 5 min,其从操作规范方面提高了冲击电压检测绝缘缺陷的有效性。

3 标准雷电冲击耐压试验技术及应用

3.1 标准雷电冲击耐压试验成套设备

为了使 GIS 设备现场冲击耐压试验,尤其是标准雷电冲击耐压试验,得以在 GIS 变电站安全、便捷开展,结合特高压 GIS 变电站特点,提出了适用于特高压 GIS 变电站现场冲击耐压试验用的可移动式气体绝缘标准雷电冲击试验成套设备(如图 4 所示)。

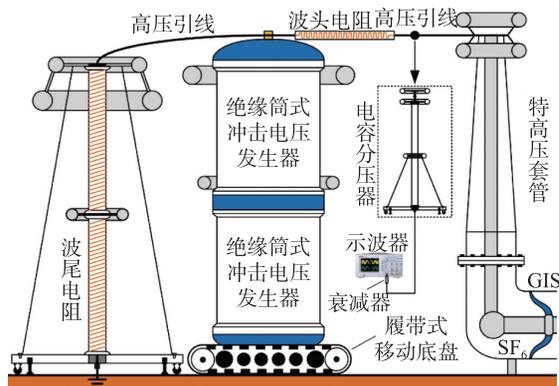


图4 特高压 GIS 现场冲击耐压试验成套设备
绝缘筒式冲击电压发生器以高压 SF_6 气体为

绝缘介质,并通过外置波头电阻、波尾电阻的方式极大地压缩了发生器体积,减小了发生器自身的固有电感,与传统 Marx 发生器相比,其带负载能力更强,尤其适用于特高压 GIS 现场冲击耐压试验。外置的波头电阻连接在冲击电压发生器与电容分压器之间,被试 GIS 套管通过高压引线与电容分压器相连,并通过电容分压器-衰减器-数字示波器测量系统实现冲击电压的测量。

综合考虑现场装卸工作量与运输高度限制,冲击电压发生装置采用两段式模块化设计,其中,下段设计为 7 级,标称电压为 1400 kV;上段设计为 8 级,标称电压为 1600 kV。两段高度均小于 3.8 m,分段运输能够满足运输高度要求

为保证冲击电压发生装置移动灵活性、提高试验效率,采用“履带式移动底盘”。现场试验时,将冲击电压发生装置放置于“履带式移动底盘”上,并通过螺栓固定,利用机电控制“履带式移动底盘”实现冲击电压发生装置的移动与转向。

3.2 标准雷电冲击耐压试验成套设备的应用

基于所研设备,在 1000 kV 南京站和苏州站成功开展了现场标准雷电冲击耐压试验,如图 5 所示。

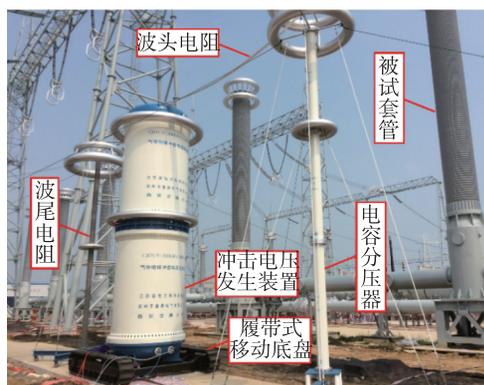


图5 1000 kV 南京站现场应用

1000 kV 南京站和苏州站都采用 3/2 接线,为了提高冲击电压试验波形的质量,即让波前时间尽可能短,负载接入方式为单台短路去接入,带一部分分支母线和一台断路器,如图 6 所示(红色部分为接入负载)。试验采用冲击电压试验波形为双指数冲击电压,试验电压幅值为 1705 kV, 1800 kV, 1920 kV, 相对误差 $\leq 3\%$ 。对于一个试品,正负极性各进行一次,共施加 6 次冲击电压。典型冲击电压试验波形如图 7 所示,对于不同负载,分支母线长度不同,波形参数变化范围为:波前时间 $T_f = 1.52 \sim 2.28 \mu\text{s}$,波尾时间 $T_r = 48.9 \sim 59.4 \mu\text{s}$,相对过冲系数 $\beta' = 100(1 - (U_b/U_e))\% = 4.3 \sim 8.3\%$ 。因冲击电压发生装置本体、高压引线、套管、母线和断路器等

部件波阻抗不连续,使冲击电压上升阶段出现“先下降再上升”的波形畸变现象。

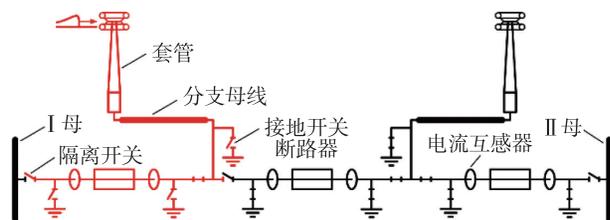


图6 试验负载接入示意图

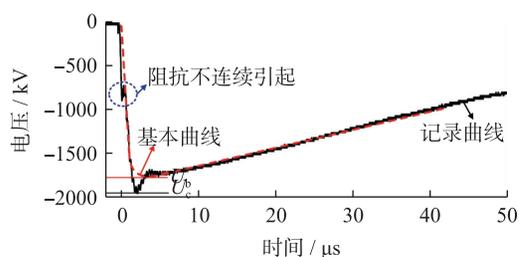


图7 典型冲击电压试验波形(LI:雷电冲击)

在试验过程中,某一 GIS 间隔在正极性1800 kV 外施电压下发生放电。通过放电定位系统,准确判别人放电室^[18]。打开气室发现导体上有 1 个放电点,从套管向串内方向看,在导体 9 点钟方向;外壳有 2 个放电点,从套管向串内方向看,上部放电点在筒体方向,下部在 8 点钟方向。推测为导体上有细微金属毛刺,放电由毛刺起始,在发展过程中分叉,导致外壳出现 2 个放电点。

出现绝缘击穿后 GIS 厂家及时对放电单元进行现场处理。根据试验方案,对此间隔不再进行雷电冲击试验,处理完毕后进行交流耐压结合局部放电试验时没有出现绝缘问题。

4 结束语

GIS 设备现场绝缘耐压试验作为 GIS 设备投运前的最后一道关口,是提高入网质量的重要保障。现场标准雷电冲击耐压试验技术的提出,丰富了现场检测手段,有助于提高缺陷检出概率。通过绝缘特性实验,明确冲击电压波形参数、电压极性和加压间隔时间等因素对缺陷检测有效性的影响,进而从试验装备技术革新和试验方案优化两方面,完善 GIS 现场标准雷电冲击耐压试验技术方案,在 GIS 变电站中推广应用。

参考文献:

[1] 杨景刚,贾勇勇,赵 科,等. GIS 内典型绝缘缺陷的局部放电信号超声特性分析[J]. 江苏电机工程,2015,34(2):10-14.

[2] SRIVASTAVA K, MORCOS M. A Review of Some Critical Aspects of Insulation Design of GIS/GIL systems [C] // Proceedings of 2001 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta, USA IEEE, 2001: 787-792.

[3] TEKLETSADIK K, CAMPBELL L. SF₆ Breakdown in GIS[J]. IEEE Proceedings on Science, Measurement and Technology, 1996, 143(5): 270-276.

[4] SABOT A, PETIT A, TAILLEBOIS J. GIS Insulation Co-ordination: On-site Tests and Dielectric Diagnostic Techniques, a Utility Point of View [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1309-1316.

[5] 赵 科,李洪涛,杨景刚. 特高压 GIS 集中监造工作的若干思考[J]. 江苏电机工程,2016,35(2):69-71.

[6] RIECHERT U, HOLAUS W. Ultra High-voltage Gas-insulated Switchgear-a Technology Milestone[J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(1): 60-82.

[7] LI C, HE J, HU J, et al. Switching Transient of 1000 kV UHV System Considering Detailed Substation Structure [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 112-122.

[8] 王 磊,万 磊,王 浩,等. 取消特高压 GIS 变电站隔离开关阻尼电阻的研究[J]. 高电压技术,2015,41(5): 1746-1752.

[9] 文 韬,张乔根,秦逸帆,等. 冲击电压下 SF₆ 棒-板间隙放电的临界半径现象[J]. 高电压技术,2015,41(12): 4131-4136.

[10] 关永刚,郭珮琪,陈维江,等. 铁氧体磁环抑制 252 kV GIS 中 VFTO 的试验研究[J]. 高电压技术,2014,40(7): 1977-1985.

[11] 侍海军,张少炎,王光前. 气体绝缘组合电器现场试验现状与发展[J]. 绝缘材料,2004,9(6):44-51.

[12] 张文亮,张国兵. 特高压 GIS 现场工频耐压试验与变频谐振装置限频方案原理[J]. 中国电机工程学报,2007,27(24):1-4.

[13] 胡伟涛. 500 kV HGIS 雷电冲击试验击穿的原因分析[J]. 高压电器,2013,49(12):145-149.

[14] High Voltage Switchgear and Controlgear-gas-insulated Metal Enclosed Switchgear;IEC 62271-203; 2011[S], 2011.

[15] 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备: GB 7674-2008 [S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[16] WEN T, ZHANG Q, GUO C, et al. 3-MV Compact Very Fast Transient Overvoltage Generator for Testing Ultra-high-voltage Gas-insulated Switchgear[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2014,30(6):26-33.

[17] 文 韬,张乔根,郭 璨,等. 冲击电压下 SF₆ 棒-板间隙放电极性效应的反转现象[J]. 高电压技术,2015,41(1):275-281.

[18] 腾 云,赵 科,贾勇勇,等. 特高压 GIS 击穿定位方法及其应用研究[J]. 江苏电机工程,2016,35(4):24-27.

(下转第 53 页)

- [7] 肖 浩, 朱 佳, 李银红, 等. 多馈入直流系统换相失败免疫水平快速确定方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2711-2717.
- [8] 李新年, 刘 耀, 朱艺颖, 等. 华北电网直流多馈入系统动态特性实时仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 75-80.
- [9] 李新年, 陈树勇, 庞广恒, 等. 华东多直流馈入系统换相失败预防和自动恢复能力的优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 134-140.
- [10] 郭春义, 张岩坡, 赵成勇, 等. STATCOM 对双馈入直流系统运行特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 99-106.
- [11] 倪晓军, 赵成勇, 郭春义, 等. 混合双馈入直流系统中 VSC-HVDC 对 LCC-HVDC 受端系统强度的影响[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4052-4061.
- [12] 徐 岩, 刘泽锴, 应璐曼. 含 VSC-HVDC 的混合 MIDC 系统强度计算及仿真分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2015, 42(2): 30-35.

作者简介:



李 猛

李 猛(1991—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,研究方向为高压直流输电;

夏成军(1974—),男,湖北黄冈人,博士,副教授,研究方向为电力系统分析运行与控制、HVDC 与 FACTS;

杜兆斌(1977—),男,广东佛山人,博士,讲师,研究方向为电力系统稳定性分析与控制。

Research on the Mechanism and Suppression Method of Double Bridge Discontinuous Commutation Failure in Hybrid HVDC

LI Meng, XIA Chengjun, DU Zhaobin

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: With the development of high voltage direct current(HVDC) transmission technology, hybrid multi-infeed direct current transmission become a development trend. The mechanism of double bridge commutation failure of line commutated converter based high voltage direct current (LCC-HVDC) in hybrid double-infeed system is analyzed. And the major influence factors of double bridge continuous and discontinuous commutation failure are distinguished. Through simulation under different AC system fault extent and trigger time, the effect of these two factors on commutation failure types is studied, and it is found that the AC voltage waveform distortion under slight fault is the main cause of double bridge discontinuous commutation failure. Then the control parameter of voltage source converter based high voltage direct current(VSC-HVDC) is optimized by Simplex algorithm to suppress double bridge discontinuous commutation failure of LCC-HVDC in slight fault.

Key words: hybrid HVDC; double bridge commutation failure; waveform distortion; Simplex algorithm

(上接第 33 页)

作者简介:



文 韬

文 韬(1990—),男,陕西南郑人,在读博士生,研究方向为 GIS 绝缘特性及气体放电;

张乔根(1965—),男,江苏泰州人,博士,教授,博导,研究方向为气体绝缘与放电等离子体技术、大功率脉冲技术及应用;

赵军平(1979—),男,陕西三原人,博士,研究方向为脉冲功率和气体放电理论及应用;

陶风波(1982—),男,江苏常州人,博士,高级工程师,从事高压电气设备试验及故障诊断技术研究;

贾勇勇(1986—),男,江西九江人,硕士,工程师,从事高压电气设备试验及故障诊断技术研究。

Application of On-site Standard Lightning Impulse Test Technology for UHV GIS Equipment

WEN Tao¹, ZHANG Qiaogen¹, ZHAO Junping¹, TAO Fengbo², JIA Yongyong²

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing, 211103, China)

Abstract: Gas-insulated metal-enclosed switchgear (GIS) has been widely used in power system, and the safe and reliable operation of the GIS are very important. Restrained by the device structure and circuit inductance, the on-site lightning impulse (LI) withstand test is difficult to be carried out in the GIS substation, especially in the ultra-high voltage (UHV) GIS substation. In this paper, the present situation of GIS impulse test is analyzed. And then the influence factors of insulation defect detecting using impulse test such as waveform parameters, polarity and interval time between two impulse tests are elaborated. Finally, based on the moveable gas-insulated impulse voltage test complete equipment, the on-site standard lightning impulse test is applied successfully in 1000 kV Nanjing substation and 1000 kV Suzhou substation.

Key words: gas-insulated metal-enclosed switchgear (GIS); on-site insulation withstand voltage test; standard impulse test; standard lightning impulse; impulse voltage generator; ultra-high voltage GIS substation