

GIS 加压加流现场试验方法研究及应用

任继云^{1,2,3}, 韩旭涛⁴, 马永福^{1,2,3}, 包正红^{1,2,3}, 王丽丽^{1,2,3}

(1. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 西宁 810008; 2. 青海省高海拔电力研究重点实验室, 西宁 810008; 3. 青海省高海拔电力工程技术研究中心, 西宁 810008; 4. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: GIS 现场试验是保障设备投运后安全运行的最后一道防线。目前工程现场普遍采用交流耐压试验, 但由于其试验条件与 GIS 实际运行工况下的“高电压一大电流”叠加应力存在显著差异, 导致多起设备在通过交流耐压试验后仍在短期内发生击穿故障的问题。针对现有试验的不足, 文中提出开展 GIS 加压加流现场试验, 旨在提高投运前绝缘缺陷的检出率, 提升设备投运后的运行可靠性。分析了在现场条件下同时向 GIS 施加高电压与大电流的技术路线, 提出基于谐振电压一感应电流联合激励的新型现场试验方法, 构建了完整的试验流程; 进一步研制了适用于现场应用的感应式大电流试验装备, 并首次在真实 GIS 交接试验现场完成加压加流试验验证。试验结果表明: 采用感应法向 GIS 内部导杆施加大电流时, 应避免 GIS 外壳、外壳接地及接地网之间形成导通回路; 通过两套低功率叠加电源的协同使用, 可在保证安全性的前提下有效实现 GIS 加压加流试验, 为提升 GIS 交接试验的真实性与有效性提供了可行方案。

关键词: 气体绝缘组合电器; 现场试验; 加压加流; 交接试验; 局部放电; 有效性; 感应式升流器

Development and Field Application of a Combined Voltage-current On-site Test Technique for GIS

REN Jiyun^{1,2,3}, HAN Xutao⁴, MA Yongfu^{1,2,3}, BAO Zhenghong^{1,2,3}, WANG Lili^{1,2,3}

(1. State Grid Qinghai Electric Power Research Institute, Xining 810008, China; 2. Qinghai Key Laboratory of High-Altitude Power Research, Xining 810008, China; 3. Qinghai High-Altitude Electric Power Engineering Technology Research Center, Xining 810008, China; 4. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: On-site testing of gas-insulated switchgear(GIS)is the final safeguard to ensure safe operation after commissioning. At present, AC withstand voltage tests are widely used in engineering practice; however, significant discrepancies exist between the test conditions and the actual “high-voltage-high-current” combined stresses experienced during GIS operation. As a result, multiple cases have been reported in which severe insulation breakdown occurred shortly after the equipment had successfully passed the AC withstand test. To address the limitations of existing test methods, this paper proposes a combined voltage-current on-site test for GIS, aiming to enhance the detection of insulation defects before commissioning and improve the operational reliability of GIS. A technical approach for applying high voltage and large current simultaneously under field conditions is analyzed, and a novel on-site test method based on resonant voltage and induced current combined excitation is proposed, together with a complete testing procedure. Furthermore, an induction-type high-current test device suitable for field application is developed, and the combined voltage-current test is conducted for the first time on an actual GIS during its handover testing. The results indicate that when applying a large induced current to the GIS internal conductor, conductive loops involving the GIS enclosure, enclosure grounding, and substation grounding grid must be avoided. By coordinating two low-power excitation sources, the proposed method can safely and effectively realize combined voltage-current on-site testing, offering a practical solution to improve the authenticity and effectiveness of GIS handover tests.

Key words: GIS; on-site testing; combined voltage-current test; handover test; partial discharge; effectiveness; induction-type current booster

0 引言

气体绝缘组合电器(GIS)是当前电网中占比最高、增长最快的核心装备之一, 其运行可靠性直接

关系到电网的安全与稳定。由于 GIS 设备尺度大、结构复杂, 整体长度可达数百米, 因此必须采用分段运输、现场组装的方式完成安装。在西北地区, 受风沙大、昼夜温差显著等自然环境影响, GIS 现

场组装过程中更易产生绝缘和机械缺陷。为此，设备投运前需开展严格的现场试验，以确保其长期稳定运行。

目前工程中普遍采用交流耐压与局部放电联合检测作为 GIS 投运前的主要、甚至唯一的验收手段^[1-3]。然而实践表明，该方法仍存在缺陷漏检的风险，多起设备虽通过交流耐压试验却在投运后短期内发生闪络的案例已在现场报告^[4-6]。其根本原因在于：一方面，单纯施加交流电压的方式主要对绝缘类缺陷敏感，而对内部安装不良等非绝缘类缺陷的检出能力有限^[7-8]；另一方面，单一电压激励与 GIS 投运后同时承受高电压、大电流的真实工况存在差异，难以引发机械振动与热效应的共同作用，对内部异物等需机—电及热—电耦合激发的缺陷检出效果不足。这些因素使得现场交接试验的有效性受到制约，对 GIS 运行的安全性构成威胁^[9-10]。典型如青海电网 330 kV 安通变电站，其 363 kV GIS 在安装过程中受制于严苛现场环境，罐体内部清洁度不足、绝缘表面残留灰尘。尽管交接试验顺利通过，但设备在投运过程中发生闪络，严重影响了工程投运质量。类似地，在其他青海电网的现场案例中也出现了交流耐压试验合格但存在导体未对中插接、吸附剂袋遗落等问题，说明现行交接试验方法也对机械类缺陷的敏感性有待提升。

为弥补传统交流耐压试验的不足，近年来研究者提出了多种新的现场考核手段。例如，青海电科院与西安交通大学联合开展的振荡雷电冲击试验研究，有效提升了异物类等电场集中型缺陷的检出率^[11]，并已在特高压工程中得到验证。但无论是雷电冲击试验还是交流耐压试验，本质上均属于电压耐受性考核，难以模拟 GIS 运行时电压、电流共同叠加的实际应力状态。在实际运行中，高压开关、套管等设备需长期承受额定电压与额定电流，但现行 IEC 及国家标准均未要求开展电压、电流叠加的全工况试验。已有研究对单独的大电流通流试验开展过探索，但电压激励与电流激励的独立试验均无法等效于运行中的机—电或电—热联合作用。在加压加流的全工况下，内部缺陷更易被激发，绝缘老化加速，从而引发击穿事故^[12]。当前尚未见在 GIS 现场交接试验中同时施加电压与电流的研究报道。在单独施加电流方面，由于实验室条件下回路搭建和试品调整较为灵活，因此应用较多，如 GIS 温升试验^[13]、户外大电流试验场验证^[14]等。但在实际工程现场，大电流试验目前仅局限于电流互感器等单一部件的检测试验^[15-17]，尚无在 GIS 整间隔回路中开展大电流试验的成熟经验。

鉴于此，文中面向现场实际工况，系统探索了大尺度 GIS 设备同时施加高电压与大电流的加压加流试验方法，研究形成可在现场实施的试验流程，并研制了相应的大电流发生装备。最终在实际 GIS 交接试验现场首次完成了加压加流试点应用，为提升 GIS 交接试验的有效性与真实性提供了新的技术路径。

1 加压加流现场试验原理

1.1 电压电流现场联合施加原理

现场交接试验不同于出厂试验，其试验环境与试验条件存在显著差异，必须充分考虑试验实施的便利性及设备的便携性。本研究采用现场常用的串联谐振方式施加高电压，施加大电流则采用对检修电源要求低、适合现场应用的感应式大电流发生方法。通过两套小功率电源的协同工作，可实现 GIS 在低负载条件下高电压与大电流的联合施加。

在电压施加方面，现场通常采用串联谐振装置。该方法将固定电抗器与试验回路中的电容串联，通过变频电源调节频率，使试验回路达到谐振状态，从而在被试设备上产生高电压。

在电流施加方面，采用基于电磁感应原理的感应式大电流发生方法。其一次绕组接至调压器输出，在一次绕组中通以电流后，根据电磁感应规律，二次绕组产生感应电动势；当二次侧形成闭合回路时，即可在回路中产生电流。通过设计合适的一、二次绕组匝数比，可在二次侧获取所需的大电流。

1.2 电压电流现场联合施加技术条件

针对加压回路，现场试验需满足一定条件，包括：保持试验设备与被试 GIS 之间的安全距离；确保 GIS 充气至额定压力并按标准要求静置；对试验回路中电流互感器的二次侧进行短接等措施。

而对于加流回路，则需重点解决电流通路的形成问题。与实验室条件不同，现场 GIS 全部密封于金属筒体内，以气体作为绝缘介质，各相之间无电气连接，因而无法在设备内部直接形成电流通路。因此，电流路径只能利用裸露于外的套管端部，通过外部导体人为构建闭合通路。现场能够实现电流通路的方法有以下两种：一种是同相不同间隔形成电流回路，见图 1，将同一相不同间隔的 GIS 出线/进线套管利用大电流导线进行连接，从而形成导电回路；另一种是不同相不同间隔形成回路，见图 2，将同一间隔中的两相 GIS 间隔出线/进线套管分别进行连接，从而在两相中形成闭合回路。

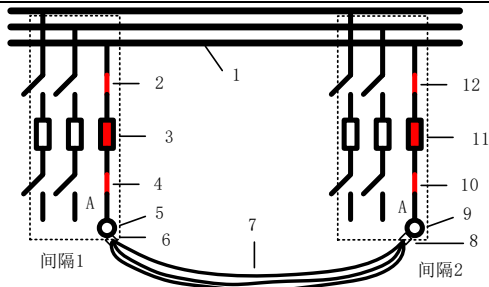


图 1 同相不同间隔形成回路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of loop formation with in-phase but different intervals

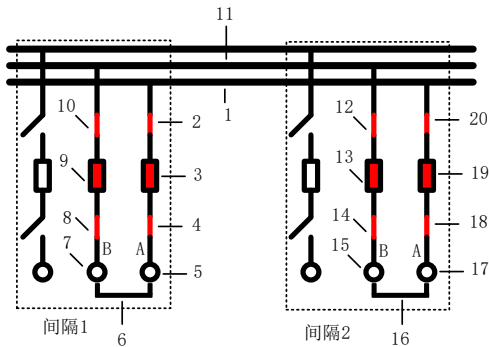


图 2 不同相不同间隔形成回路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of circuit formation with different phases and different intervals

相比而言，第一种方式形成的回路较短，但需要的大电流连接导线会更长一些，适用于母线长度较短的 GIS 设备；而对于母线长度较长的 GIS 设备而言，可采用第二种方式，从而使用较短的大电流导线实现导电回路的构造。

采用感应法在 GIS 内部导体上施加工频大电流时，外部金属外壳可能形成并联导电回路，从而对内部导体的升流效果产生影响。为定量分析外壳导电特性对电流分布的作用，建立的电磁场仿真模型见图 3：GIS 内部导体封闭于金属外壳之中，金属外壳外侧套装感应式升流器，在升流器一次绕组中通以电流。

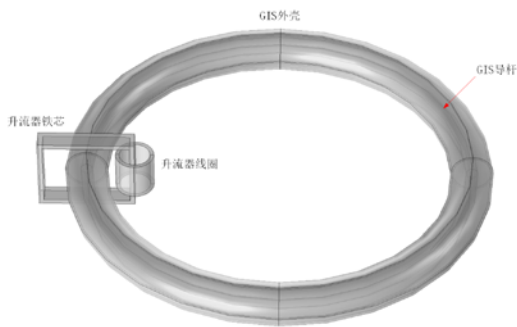


图 3 感应式升流器套装于 GIS 设备回路仿真模型

Fig. 3 Simulation model of inductive current booster set for GIS equipment circuit

在保持一次侧条件一致的前提下，分别将外壳设定为导电性良好的连续闭合回路以及具有绝缘隔断的高阻回路，对比得到的电流分布结果见图 4、5。

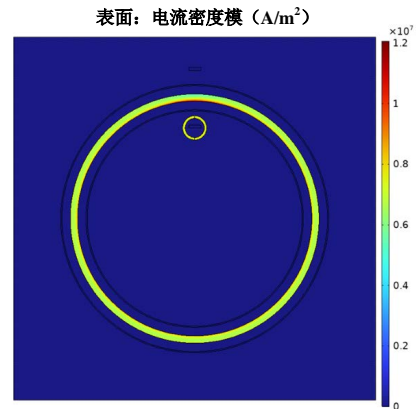


图 4 外壳导电性良好时感生电流分布

Fig. 4 Induced current distribution when the external shell has good electrical conductivity

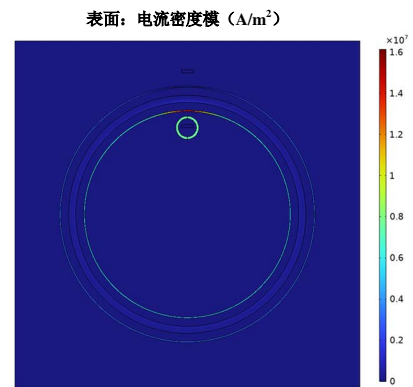


图 5 外壳导电性较差时感生电流分布

Fig. 5 Induced current distribution when the external shell has poor electrical conductivity

仿真结果表明，当外壳构成低阻连续回路时，感生电流主要集中流经外壳，内部导体上的电流幅值较小；当在外壳上引入绝缘隔断或显著提高外壳回路电阻时，感应电流则主要分布于内部导杆，外壳上的电流基本可以忽略。

上述规律可从磁场耦合机理加以解释：当外壳回路导电性良好时，外壳中感生环流产生的磁场与励磁铁心在 GIS 回路中建立的主磁场方向相反，等效上削弱了铁心向内部导体耦合的有效磁通量，使内导体获得的交变磁场强度明显降低，导致内部导体的可通流电流受限。

在现场加压加流试验条件下，虽然按照图 1 和图 2 所示的接线方式，工作电流回路需经 GIS 出线/进线套管闭合，套管绝缘结构在拓扑上将金属外壳与载流回路隔离，有利于在内部导体上建立大电流

通道,但工程现场中 GIS 外壳通常通过多点与接地网连接。金属外壳、各接地点及接地网之间仍可能形成低阻闭合回路,在励磁铁芯二次侧构成外壳电流环路,从而削弱内部导体的升流效果。因此,在现场实施 GIS 加压加流试验时,需要结合实际接地布置对外壳接地方式进行临时优化与调整,必要时对部分接地点进行断开或提高其等效阻抗,以避免形成连续外壳导电回路,保证感应电流主要作用于 GIS 内部导体。

2 加压加流现场试验系统搭建

2.1 现场试验对象及技术要求

现场加压加流试验主要在各电压等级的 GIS 设备上开展,目前青海省内 GIS 设备主要分布在 750、330、110 kV 电压等级,其中 750 kV 及 330 kV 电压等级 GIS 设备基本采用三相分箱布置,110 kV GIS 设备除部分老旧设备采用三相分箱布置结构外,基本采用三相共箱结构布置。750 kV 及 330 kV 电压等级 GIS 设备基本采用户外布置,110 kV GIS 设备以户内布置居多。750 kV GIS 设备布置均为 3/2 接线方式,330 kV GIS 设备以 3/2 接线方式及双母双分段方式为主,110 kV GIS 设备以双母双分段及单母分段方式为主。GIS 设备同一间隔内 ABC 三相出线套管之间距离基本固定,以保证设备安全稳定运行的绝缘距离为依据,而不同出线间隔之间的距离则无法固定,根据站内电气平面图设计结构决定。不同电压等级的 GIS 设备的外壳筒径统计见表 1。

表 1 典型 GIS 设备外壳尺寸

Table 1 Typical External Dimensions of GIS Equipment

Enclosures	
GIS 设备	外壳直径/mm
750 kV 分箱设备	626
330 kV 分箱设备	400
110 kV 三相共箱	516~600
110 kV 三相分箱	350

现场升压升流试验需满足的试验技术条件如下:

- 1) SF₆ 气体已注完,静置时间满足要求。
- 2) SF₆ 气体试验、GIS 设备常规试验已完成且数据合格,设备外观检查无异常。
- 3) 检修电源箱离试验设备距离 ≤ 100 m; (300 A 空开); 且上端电源容量及电缆满足检修电源箱需求。
- 4) 试验需拆除 GIS(GIL)设备各进出线间隔引流。

5) 试验开始前应确认 GIS 外壳接地良好,试验前所构成的 GIS 回路可形成单点接地情况,其余接地点可暂时解除。

6) GIS 设备避雷器、电压互感器有单独的隔离开关。如 GIS 设备避雷器、电压互感器无隔离开关,避雷器、互感器与 GIS 间的隔离已做好。如 GIS 设备有电缆出线间隔,电缆与 GIS 间的隔离已做好。

2.2 试验升流器的设计

试验升流器需在现场的 GIS 设备内部中心导体上产生交流电流,现场试验时需满足便携、对检修电源容量要求小、同时能够承受交流高压的绝缘性能要求。感应式大电流发生器通过电磁感应的方式产生大电流,使用时套装在需要施加大电流的试验回路中,试验回路中施加的高压通过 GIS 内部绝缘气体完成,是适用于现场 GIS 设备升压升流试验的合适路径。

试验升流器需满足以下要求:

- 1) 升流器应具备开合功能,便于套装在已施工完成的 GIS 筒体上;
- 2) 升流器应满足对 GIS 设备导体施加电流 2 小时,回路长度为 100 m 左右,回路电流为 0~5 000 A 的试验要求。

3) 升流器一次侧电源为 380V 站内检修电源箱。试验升流器设计思路如下:

1) 根据闭合回路长短,算出阻抗(感抗),结合所需电流数,计算出所需大电流发生器的容量,最后分配为合理的数量。主回路原理图见图 6。

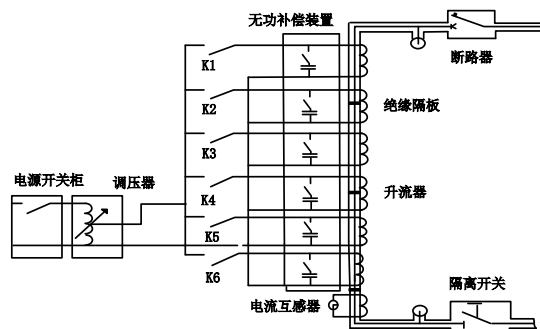


图 6 试验升流器主回路原理图

Fig. 6 Schematic diagram of the main circuit of the test current booster unit

2) 铁心选型与加工,根据容量来设计铁心,首先要保证中间口的大小,再选用合适截面积的铁芯,同时要考虑叠片的系数,然后将铁芯分为上下左右 4 个柱来加工;

3) 线圈设计,根据整体技术参数计算出线圈的匝数,根据线圈所承受的最大电流选择合适的导线,结合线圈的损耗、温升设计出合理的线圈;

4) 整体设计出图与加工,考虑到使用的环境、

方式、过程等一系列的因素，结合铁心、线圈初步设计出总装图；总装图待审核完毕后开始拆图，图纸完成后校对、审核，之后下达生产。

2.3 成套试验装置的研制

按照在 100 m 长的 330 kV GIS 设备上开展应用进行预估，电流大小为 5 000 A，利用 3.1 节中关于升流器容量参数的计算方法，所需升流器容量为 800 kVA，根据输入电压及输出电流的要求，升流器总体技术参数见表 2(单相)。

表 2 试验升流器参数

Table 2 Parameters of the test current booster unit

参数	数值
额定容量/kVA	800
频率/Hz	50
额定输入电压/kV	0.38
额定输出电压/V	160
噪音/dB	≤70
额定输入电流/A	789.5
额定输出电流/A	5000
运行时间/min	额定电压、额定电流时能连续运行 120

根据单台升流器重量、现场便携性及升流器二次侧安全电压等方面考虑，800 kVA 升流器由 5 台 150 kVA 升流器与 1 台 50 kVA 升流器组成，运行过程中各台升流器可串联、并联灵活接线，任意两台之间无环流产生，根据试品的需求组合投切。单台升流器参数见表 3(单相)。

表 3 单台试验升流器参数

Table 3 Parameters of a single test current booster unit

参数	数值
额定容量/kVA	150/50
额定输入电压/kV	0.4
额定输出电压/V	30/10
频率/Hz	50
额定输出电流/A	5000
阻抗电压/%	<26
绝缘水平	一次侧 AC 6 kV/1 min
过流能力	在 120% 额定电流持续时间 3 min 工况下，过电流对升流器绕组均不会造成热损伤、绕组变形及其他损伤
输出电流波形	输出电流总谐波畸变率(THDI)<3%
升流器温升	额定容量下能够运行 120 min 下绕组平均温升≤60 K
结构型式	开启式，开口尺寸 670 mm×650 mm、470 mm×450 mm、455 mm×450 mm

根据现场 GIS 设备外径尺寸分布情况，对单台升流器的开口尺寸进行调整，分别包含：3 台开口

尺寸为 670 mm×650 mm 的 150 kVA 升流器、2 台开口尺寸为 470 mm×450 mm 的 150 kVA 升流器、1 台开口尺寸为 455 mm×450 mm 的 50 kVA 升流器。

该套试验升流器在容量及开口尺寸上可支持 330 kV 及以下电压等级 GIS 设备的试验应用，也可满足部分回路较短(容量需求在 450 kVA 以内)的 750 kV GIS 设备的现场试验要求。其中开口尺寸为 455 mm×450 mm 的 50 kVA 升流器加工图纸见图 7，升流器从其左下方向上开口，方便现场安装布置。

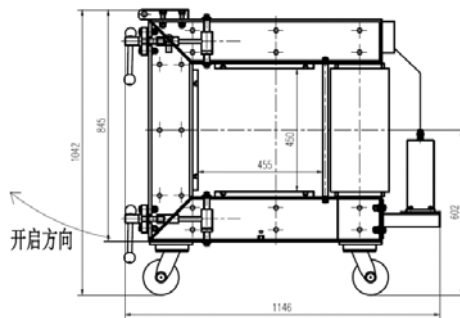


图 7 试验升流器加工图纸

Fig. 7 Processing drawings of the test current booster

除核心设备成套试验升流器装置外，该试验系统还包括前级电源开关柜、300 kVA 单相调压器、无功补偿装置、计算机测量及控制装置、电流互感器等。

由于加流回路的感抗通常远大于电阻，其无功功率需求较高，对升流器、调压器以及站用电源容量提出较高要求，易造成现场实施困难。利用回路感抗占比高的特点，通过在加流回路中引入电容进行无功补偿，从而降低对电源与试验装置容量的要求。主要的补偿方式包括：在升流器一次侧并联电容进行补偿；在加流回路二次侧并联电容；在加流回路二次侧串联电容。

后两种补偿方式需在升流器二次侧加入电容装置，且在加压加流条件下需同时满足试验绝缘要求，工程现场难以实施，因此采用一次侧并联补偿方式，无功补偿装置分布在每台试验升流器上，通过补偿电容补偿试验回路感抗产生的无功功率，从而降低调压器负载。单个无功补偿装置参数见表 4。

表 4 无功补偿装置参数

Table 4 Parameters of the reactive power compensation device

参数	数值
最高工作电压/V	450
单台电容量/kvar	45
最大补偿电流/A	100

3 加压加流试验现场应用

3.1 电压电流现场联合施加方法

3.1.1 试验前的参数计算

在开展加压加流现场试验前，需要对试验回路的关键电气参数进行预估，以指导试验设备的选型与现场布置。

对于加压部分，现场已有较成熟的实施经验。试验前通常需估算被试 GIS 装置的对地电容量，并结合耐压试验所要求的谐振频率范围，反算所需配置的试验电抗器额定电感量，从而保证串联谐振装置能够在目标频率下实现稳定输出。

对于加流部分，则需重点计算加流回路的等效阻抗。根据试验电流的目标值，可进一步得到升流器二次侧所需的感应电压，从而确定升流器、调压器及站内电源的容量配置。

加流试验回路的单位长度电感可参考圆形截面空心直导体的近似公式进行估算

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{rc} - 1 \right) \quad (1)$$

式(1)中： μ_0 为磁常数，取 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ； l 为导线长度，m； r 为导体截面的外半径，m； c 为内半径与外半径的比值经查表得出数值。加流试验回路的电阻可结合现场测试结果进行估算。由此可得到回路阻抗，并据此计算所需试验电流下的感应电压与试验设备容量。

例如，某 330 kV GIS 设备的 10 m 加流试验回路等效阻抗约为 0.004Ω 。当目标加流电流为 5 000 A 时，升流器二次侧所需感应电压约为 20 V，对应所需输出容量约为 100 kVA。现场试验时，升流器的额定电压及容量应不低于该计算值。

根据上述估算，当加流试验回路较长或试验电流较大时，GIS 外壳上可能产生较高的感生电压，超过人体可触及安全电压范围，试验布置时需采取必要的防护隔离措施。

3.1.2 试验开展流程

依据加压加流试验方法有效性研究的相关结论^[18-19]，结合现场试验可实施性，制定 GIS 加压加流交接试验流程如下。

1) 交流耐压试验。按照现行标准开展常规现场交流耐压试验。当试验过程中检测到放电信号时，结合采集到的局部放电谱图对缺陷类型进行判别；若交流耐压试验未出现异常放电信号，则进入下一阶段试验。

2) 电流振动效应试验。在保持试验回路稳定的条件下，首先施加交流电流，电流幅值依次取额定电流的 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 倍，各电流水平分

别独立施加。电流稳定后，立即按照传统交流耐压试验方式采用阶梯式升压方法施加电压，并同步开展局部放电与振动信号监测。若在试验过程出现闪络击穿，则试验不通过，若检测到异常放电或振动信号，则结合局部放电谱图或振动频谱特征对缺陷类型进行分析与判定；若未检测到异常信号，则进入 3)。

3) 电流热效应试验。在施加额定电流并保持稳定的条件下，分别在 20、40、60、80、100 min 后开展交流耐压试验，同时同步采集局部放电、振动及温度信号。若试验过程中出现击穿闪络，则试验不通过，若检测到异常的放电、振动或者温度信号，则根据信号特征对设备状态进行判断；若试验全过程未检测到异常信号，则判定加压加流试验通过，设备具备投运条件。

3.2 现场试验应用和结果

为验证所述的试验方法能够在现场进行推广应用，选取某 110 kV 变电站 110 kV GIS 设备试点开展应用，选取该变电站新建 110 kV GIS 间隔 3 A 相、I 母 A 相、间隔 5 联络断路器 A 相、II 母 A 相、间隔 8 A 相进行试验，试验部位如图 8 中的粗线所示，现场试验回路布置图见图 9。

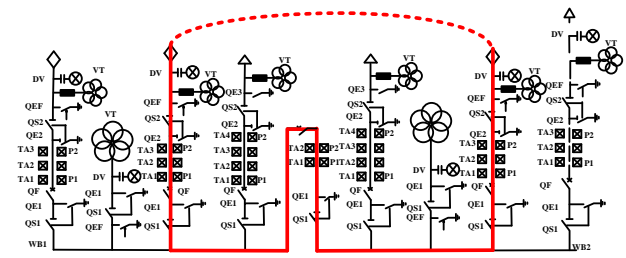


图 8 现场加压加流试验位置图

Fig. 8 Location diagram for on-site voltage and current application test

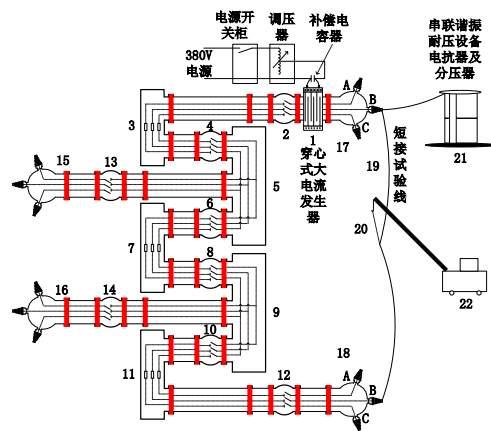


图 9 加压加流回路布置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of voltage and current application circuit layout

现场加压加流试验开展情况见图 10，通过短接

试验线将间隔 3 A 相出线套管、间隔 8 A 相出线进行短接。在间隔 8 A 相出线套管处施加电压，穿心式升流器间隔 8 出线套管 A 相附近分支母线处。该处 GIS 外壳通过两侧支撑架金属连接至接地网，支撑架上方即为出线套管，因此此处的金属接地连接在试验过程中未进行擅自处理，试验过程中该接地回路未影响对 GIS 导杆加流试验。

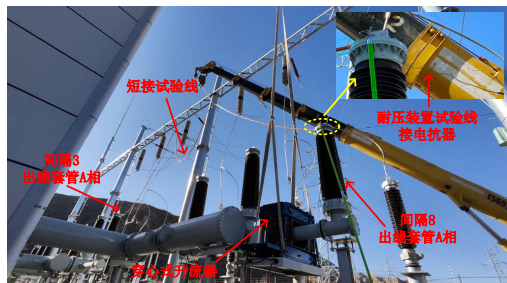


图 10 现场加压加流试验开展情况

Fig. 10 The progress of on-site voltage and current application tests

期间超声波局部放电检测及红外热成像检测情况见表 5(背景值 2.1/2.2 mV)、6(环境温度 1.2 °C)。

表 5 回路中 GIS 设备超声波局部放电检测结果

Table 5 Ultrasonic partial discharge detection results of GIS equipment in the circuit

检测位置	有效值/mV	峰值 mV	50 Hz 相关性	100 Hz 相关性
间隔 8 组合开关	2.1	2.3	0	0
间隔 8 电流互感器	2.2	2.4	0	0
间隔 8 断路器	2.2	2.5	0	0
母线	2.1	2.6	0	0
间隔 5 断路器	2.1	2.4	0	0
组合开关	2.2	2.4	0	0
母线	2.1	2.5	0	0
间隔 8 组合开关	2.1	2.3	0	0
间隔 8 电流互感器	2.1	2.3	0	0
间隔 8 断路器	2.1	2.4	0	0

表 6 回路中 GIS 设备红外测温检测结果

Table 6 Infrared temperature measurement results of GIS equipment in the circuit °C

检测位置	温度	检测位置	温度
间隔 8 出线套管	1.9	GIS 母线	5.8
GIS 分支	1.8	GIS 分支	1.8
间隔 8 断路器	5.3	间隔 3 出线套管	1.8
GIS 母线	5.3	短接试验线	5.4
间隔 5 断路器	5.9	短接试验线 2	5.2
间隔 3 断路器	5.2		

整个试验过程中局部放电检测及红外精确测温未见异常，无电压下降及闪络情况，无明显振动及异响情况，顺利完成该 110 kV GIS 设备现场加压

加流试验。加压加流试验完成后严格按照传统耐压程序再次开展试验，未见电压下降及闪络情况，超声波局部放电检测未见异常。

4 结论

文中围绕 GIS 现场交接试验中传统交流耐压方法对实际运行工况模拟不足的问题，开展了 GIS 加压加流现场试验方法及工程应用研究，主要结论如下：

1)针对 GIS 实际运行中承受高电压与大电流叠加作用的特点，提出了一种基于串联谐振电压与感应式大电流联合施加的现场加压加流试验方法。该方法在低负载条件下实现了高电压与大电流的协同作用，满足现场试验对安全性与可实施性的要求。

2)研制了 GIS 设备现场加流试验系统，利用该系统可现场开展 750 kV 电压等级及以下 GIS 设备现场加流试验，试验电流可施加至 5 000 A，系统现场便于安装、对前级电源要求低，对 GIS 设备现场安装后交接试验开创了新方向。

3)通过电磁场仿真与现场条件分析，揭示了 GIS 外壳导电回路对感应升流效果的影响机理。结果表明，当外壳形成低阻连续回路时，感生电流主要分布于外壳，内部导体升流效果显著受限；通过对外壳接地方式进行合理处理，可有效避免外壳形成闭合回路，保证大电流主要作用于 GIS 内部导体。

4)建立了适用于现场条件的加压加流试验流程，分别从电流振动效应与电流热效应两个层面开展联合考核。

5)在实际 GIS 设备交接试验现场首次完成了加压加流试点应用，验证了所提出方法的可行性与工程适用性。研究结果为提升 GIS 现场交接试验的真实性与有效性提供了新的技术手段，可为相关试验方法的进一步研究与标准化工作提供参考。

参考文献:

- [1] 贾志杰, 陈少卿, 陈洪波, 等.超声波局部放电检测在 GIS 耐压试验的应用[J].中国电力, 2013, 46(12): 29-32. JIA Zhijie, CHEN Shaoqing, CHEN Hongbo, et al. Application of ultrasonic partial discharge detection in GIS withstand voltage test[J]. Electric Power, 2013, 46(12): 29-32.
- [2] 杨宏伟, 陈宇民, 彭 晶, 等.GIS 交流耐压试验发展趋势[J].云南电力技术, 2018, 46(3): 54-57. YANG Hongwei, CHEN Yumin, PENG Jing, et al. Development trend of GIS AC withstand voltage test [J].

- Yunnan Electric Power Technology, 2018, 46(3): 54-57.
- [3] 气体绝缘金属封闭开关设备现场耐压及绝缘试验导则: DL/T 555—2004[S].2004.
DL/T 555-2004, Guide for on-site withstand voltage and insulation tests of gas-insulated metal-enclosed switchgear: DL/T 555—2004[S].2004.
- [4] 徐世山, 孟可风, 刘文泉.一起 363 kV GIS 充电闪络故障的原因分析[J]. 高压电器, 2007, 43(1): 74-76.
XU Shishan, MENG Kefeng, LIU Wenquan. Analysis on the cause of a 363 kV GIS charging flashover fault[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(1): 74-76.
- [5] 喻文球, 罗建锋, 靳 坤.特大型水电站 GIS 雷电冲击试验分析[J].人民长江, 2016, 47(15): 71-74.
YU Wenqiu, LUO Jianfeng, JIN Kun. Analysis of lightning impulse test for GIS in ultra-large hydropower station[J]. Yangtze River, 2016, 47(15): 71-74.
- [6] 孙 强, 董 明, 任 重, 等.现场用 GIS 冲击耐压试验及局部放电检测装置设计[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 639-644.
SUN Qiang, DONG Ming, REN Zhong, et al. Design of GIS impulse withstand voltage test and partial discharge detection device for on-site[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 639-644.
- [7] 吴张建, 李成榕, 齐 波, 等.GIS 局部放电检测中特高频法与超声波法灵敏度的对比研究[J]. 现代电力, 2010(3): 31-36.
WU Zhangjian, LI Chengrong, QI Bo, et al. Comparative study on sensitivity of uhf method and ultrasonic method in GIS partial discharge detection[J]. Modern Electric Power, 2010(3): 31-36.
- [8] 于建辉, 李海德.GIS 绝缘问题研究综述[J]. 陕西电力, 2013(5): 33-39.
YU Jianhui, LI Haide. Review of GIS insulation problem research[J]. Shaanxi Electric Power, 2013(5): 33-39.
- [9] 蒋西平, 李永福, 王 谦, 等.基于声学成像的 GIS 设备异响振动缺陷检测技术研究[J]. 高压电器, 2023, 59(10): 215-222.
JIANG Xiping, LI Yongfu, WANG Qian, et al. Research on abnormal noise and vibration defect detection technology of GIS equipment based on acoustic imaging[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 215-222.
- [10] 王旭鹏, 郝 建, 钟 尧, 等.基于 ILPSO-LSSVM 的 GIS 设备隔离开关机械异响振动识别方法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 172-183.
WANG Xupeng, HAO Jian, ZHONG Yao, et al. Research on the identification method of mechanical abnormal noise vibration of GIS equipment disconnecter based on ILPSO-LSSVM[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 172-183.
- [11] 胡 伟, 陈 勇, 万启发, 等.三峡 550 kV GIS 的雷电冲击耐受试验方法[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 883-887.
HU Wei, CHEN Yong, WAN Qifa, et al. Lightning impulse withstand test method for Three Gorges 550 kV GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 883-887.
- [12] 李华良, 王 博, 孙 敏, 等.1 100 kV/10 kA 特高压交流长期带电试验回路的设计[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 107-113.
LI Hualiang, WANG Bo, SUN Min, et al. Design of 1 100 kV/10 kA UHV AC long-term live test circuit[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 107-113.
- [13] 罗 园, 吴盛刚, 陈慧欣, 等.GIS 的温升验证试验方法评述[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(4): 120-122.
LUO Yuan, WU Shenggang, CHEN Huixin, et al. Review of Temperature Rise Verification Test Methods for GIS[J]. Mechanical Research & Application, 2021, 34(4): 120-122.
- [14] 王晓琪, 吴春风, 栗 刚, 等.1 000 kV/8 kA 升流装置的研制[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 99-103.
WANG Xiaoqi, WU Chunfeng, LI Gang, et al. Development of 1 000 kV/8 kA current boosting device[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 99-103.
- [15] 杨晓西, 宋晓林, 张 飞, 等.750 kV 电流互感器大电流升流装置的研制[J]. 陕西电力, 2008(9): 22-26.
YANG Xiaoxi, SONG Xiaolin, ZHANG Fei, et al. Development of high current boosting device for 750 kV current transformer[J]. Shaanxi Electric Power, 2008(9): 22-26.
- [16] 章述汉, 李 前, 吴良科, 等.GIS 电流互感器现场检定中的大电流升流方法[J]. 电测与仪表, 2009, 46(12): 6-8.
ZHANG Shuhan, LI Qian, WU Liangke, et al. Method of generating large current for on-site calibration of GIS

current transformer[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2009, 46(12): 6-8.

[17] 孙一宁, 焦通, 李昊, 等. 穿心式升流器在电流互感器现场检定中的应用研究[J]. *东北电力技术*, 2017, 38(9): 7-9.

SUN Yining, Jiao Tong, Li Hao, et al. Research on the Application of Through-type Current Booster in On-site Calibration of Current Transformers[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2017, 38(9): 7-9.

[18] BAO Zhenghong, REN Jiyun, WANG Lili, et al. Research on partial discharge characteristics of suspension defect in

GIS under the action of voltage and current[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2774(1): 012084.

[19] REN Jiyun, BAO Zhenghong, MA Yongfu, et al. Research on the impact of current on partial discharge caused by surface defect of basin insulator in gas insulated metal enclosed switchgear[C]//2024 4th International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering (EPEE).[S.l.]: IEEE, 2024: 753-757.

任继云(1995—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高电压技术研究(E-mail: 2389908592@qq.com)。