

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.10.012

1 100 kV GIS低温防液化设计方法及试验研究

杨喜龙, 李心一, 穆双录, 顾群, 王浩宇, 他远超

(西安西电开关电气有限公司, 西安 710077)

摘要: 随着国家特高压工程建设规模的不断扩大,严寒地区建设特高压变电站也逐渐常态化。有些地区的环境温度接近 -40°C 。特高压开关设备的 SF_6 绝缘气体在低温环境会发生液化,降低设备可靠性,需采取措施保证设备的绝缘性能。本文通过对 SF_6 气体低温特性分析并结合产品结构,提出采用辅助加热装置防止 SF_6 气体液化的设计方法;对于不能直接使用辅助加热装置的元件采取降低气压的方法防止液化;同时对低温环境下采用辅助加热装置后壳体内部 SF_6 气体的温度变化、各主要元件低温下的密封性能、密度继电器的低温性能等进行了试验研究,验证了辅助加热装置对于提升 SF_6 气体温度的有效性、1 100 kV GIS各元件低温下的可靠性以及辅助加热装置对产品温升的影响情况。试验结果将为后续低温地区特高压站的建设和运行提供指导。

关键词: 1 100 kV GIS; 低温防液化; 设计方法; 试验研究

Design Method and Experimental Research on Low-temperature Anti-liquefaction Measures for 1 100 kV GIS

YANG Xilong, LI Xinyi, MU Shuanglu, GU Qun, WANG Haoyu, TA Yuanchao

(Xi'an Xidian Switch Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: With the continuous expansion of national ultra-high voltage engineering construction scale, the construction of ultra-high voltage substations in cold regions is gradually becoming normalized. The ambient temperature in some areas is close to -40°C . The SF_6 insulation gas of ultra-high voltage switchgear will liquefy in low-temperature environments, reducing equipment reliability. Measures need to be taken to ensure the insulation performance of the equipment. This article proposes a design method for using auxiliary heating devices to prevent SF_6 gas liquefaction by analyzing the low-temperature characteristics of SF_6 gas and combining it with product structure. For components that cannot be directly used with auxiliary heating devices, the method of reducing air pressure is adopted to prevent liquefaction. At the same time, experimental research was conducted on the temperature changes of SF_6 gas inside the shell, the sealing performance of various main components at low temperatures, and the low-temperature performance of density relays after using auxiliary heating devices in low-temperature environments. The effectiveness of auxiliary heating devices in improving SF_6 gas temperature, the reliability of various components in 1 100 kV GIS at low temperatures, and the impact of auxiliary heating devices on product temperature rise were verified. The test results will provide guidance for the construction and operation of ultra-high voltage stations in low-temperature areas in the future.

Key words: 1 100 kV GIS; low-temperature anti-liquefaction; design method; experimental study

0 引言

近年来,随着国民经济的快速发展,能源中心与消费中心不一致问题日益突出。长距离高电压输变电成为能源输送的必要手段。中国东北、西北地区蕴藏丰富的油气资源和风能、太阳能等清洁能源,对其进行联合开发并通过特高压电网进行优化配置,可满足中国对于清洁能源、低碳和可持续发展的要求^[1]。与中国其他地区相比,东北和西北地区冬季平均气温低、风速高,环境成为制约特高压电网建设的重要因素。全球能源互联网规划也对特高压GIS的恶劣使用环境适应能力提出了更高要求。低温易使SF₆气体发生液化,特性骤变,影响气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)的绝缘特性和灭弧特性^[2-5],为避免开关设备因低温造成运行故障,需研究低温应对措施,提高设备耐受低温能力,确保电网系统安全稳定。

1 低温防液化设计方法

SF₆是一种分子量很大的重气体,其具有较高的液化点^[6]。SF₆气体在不同密度和不同温度下的压力情况,随着SF₆气体密度的升高,其液化点也会急剧升高^[7-10]。为保证设备的经济性,GIS额定气压一般设置为20℃时0.4~0.6 MPa。依据对SF₆气体物理特性的研究,在中国西北及东北地区接近-40℃环境下,断路器灭弧室、断路器合闸电阻、隔离开关以及套管气室的SF₆气体均会液化,从而带来绝缘风险。必须对存在液化风险的气室采取防止液化的措施。

目前针对低温环境下防止SF₆气体液化的措施主要有两种,一种是在GIS设备外壳上加装辅助加热装置;另一种是适当降低GIS中SF₆气体压力。这两种方法均可以有效防止SF₆气体在低温环境下发生液化。

1.1 设计辅助加热装置防止气体液化

为防止断路器灭弧室、断路器合闸电阻以及隔离开关气室内SF₆气体液化对产品绝缘性能产生影响,采用在GIS设备外壳增加辅助加热装置的方案。辅助加热方案见图1。

辅助加热装置设有保护罩、隔热板、温控器、加热板等,该装置通过控制电缆与温控器联接,温控器控制部分安装在控制柜内,感应温度部分装配在GIS设备本体上,这样可以保证温控器精确感应环境温度进而实现对辅助加热装置的投切。辅助加

热装置结构见图2。

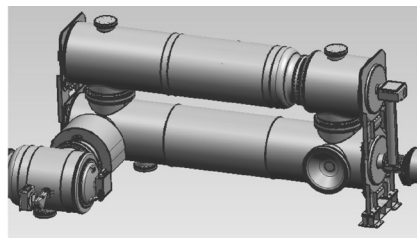


图1 辅助加热方案

Fig. 1 Auxiliary heating scheme



图2 加热装置装配结构图

Fig. 2 Assembly structure diagram of heating device

1.1.1 辅助加热装置功率计算

辅助加热装置已在550、800 kV断路器上进行了相关的试验研究及工程应用。结合相关研究结果,对1 100 kV GIS断路器、隔离开关辅助加热装置进行设计。

根据设备的外形结构以及计算公式,选取合理的加热装置覆盖比,根据应用环境的最低温度,确定设备内部最低维持温度,然后根据选取的覆盖比和最低维持温度确定加热装置功率。辅助加热装置的功率采用《SF₆高压电器》的公式进行估算

$$P = \frac{R I_r^2 \Delta T_1}{K_s K_r \Delta T_2} \quad (1)$$

式(1)中: R 为设备回路电阻, $\mu\Omega$; I_r 为设备额定电流,A; ΔT_1 为设计时留裕度,取补充温升, $\Delta T_1 = 15^\circ\text{C}$; ΔT_2 为设备温升试验时SF₆气体的温升, $^\circ\text{C}$; K_s 为加热保温套面积与散热面积之比; K_r 为加热器传热系数, $K_r = 0.8$ 。

通过式(1)可以理论计算出各元件辅助加热装置所需的功率。考虑到产品实际运行过程中,受到风速、日照、霜冻等其他环境因素的影响,散热条件会有有一定变化,在确定辅助加热装置功率时考虑30%左右的裕度,计算结果见表1。

1.1.2 辅助加热装置加热片布置原则

断路器灭弧室和合闸电阻分别采用独立的加热装置,功率均为5 800 W。断路器每个加热装置共设置4组加热片,每组加热片的功率为2 900 W;隔离开关的加热装置功率为2 000 W,每个加热装

表1 辅助加热装置所需功率				
Table 1 Power required for auxiliary heating device				
元件	散热面积比 K_s	加热保温套补充温升/℃	加热保温套功率/W	考虑约30%裕度后的加热功率/W
断路器灭弧室	0.89	15	3 823	5 800
断路器合闸电阻	0.89	15	3 823	5 800
隔离开关	0.67	15	1 190	2 000

置也设置4组加热片,每组加热片功率为1 000 W。断路器和隔离开关均采用一主一备的设计思路,将4组加热片分为两组进行投入,即1、3组合和2、4组合,具体见图3。这样可以有效提升加热装置的可靠性和使用寿命。

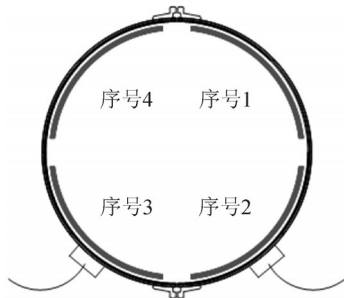


图3 辅助加热装置加热片布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the arrangement of the heating plates of the auxiliary heating device

1.2 采取降压措施防止气体液化

1 100 kV 套管的额定气压为0.48 MPa,液化温度-33.5 ℃,需采取措施防止-40 ℃环境不液化。可以考虑在套管下部壳体上设置辅助加热装置,提高套管耐受低温的能力^[11-15],但实际工程中套管竖直布置,高度较大,在套管下部壳体上加热很难保证套管顶部的气体温度有效提高,并且此种方法成本较高。因此我公司考虑采用降低套管SF₆额定气压的方法提高设备耐受低温的能力。将1 100 kV 套管的额定压力由0.48 MPa降至0.36 MPa,气体液化温度由-33.5 ℃降至-40.4 ℃,可以满足-40 ℃低温要求。

为确保额定气压降低后的套管具备1 100 kV 特高压输电所需的绝缘水平,对降低气压后的套管进行了绝缘试验考核^[16],试验项目和要求见表2。通过了绝缘试验的考核,证明气体压力降低后的套管依然具有较高绝缘水平,完全可以满足-40 ℃低温地区特高压工程的绝缘要求。

表2 套管绝缘试验要求		
Table 2 Bushing insulation test requirements		
试验项目	施加电压/kV	加压方式
工频耐受电压试验	635	5 min
	1 100	5 min
操作冲击耐受电压试验	±1 800	各15次
雷电冲击耐受电压试验	±2 400	各15次

2 低温验证试验

为了保证1 100 kV GIS在-40 ℃低温环境下运行的可靠性,分别开展了低温环境下辅助加热装置加热效果的验证、密度继电器的验证、密封性能的验证以及辅助加热装置对产品温升影响的验证。

2.1 低温环境下辅助加热装置加热效果的验证

在断路器灭弧室、断路器合闸电阻及隔离开关外壳上分别加装辅助加热装置,在机构箱内部也布置了相应的加热器;低温试验过程中在断路器灭弧室、合闸电阻、电阻开关、隔离开关壳体内部以及相应的机构箱内部布置一定数量的测温传感器,研究断路器灭弧室、合闸电阻、电阻开关、隔离开关、接地开关、快速接地开关壳体内部以及相应的机构箱内部在-40 ℃低温环境下,采取辅助加热装置后壳体内部SF₆气体温度和机构箱内部温度的实际变化情况,每半小时记录传感器监测到的温度值。

2.1.1 测温传感器的布置

断路器灭弧室壳体、合闸电阻壳体及电阻开关壳体内部共布置了12个测温点,考虑到试验过程中壳体内部充入额定压力的SF₆气体,为了避免某一位置的温度传感器失效,影响试验数据,在每个测温点设置2个传感器,互为备用;液压机构箱内部设置了1个传感器测温点;另外根据标准要求在规定位置设置了两个环境温度测量点。具体测温点布置图见图4。

隔离开关、接地开关及快速接地开关壳体内部共布置了6个测温点;各自的机构箱内部分别设置了1个测温点;同时根据标准要求设置了两个环境温度测量点。具体测温点布置见图5。

2.1.2 测温传感器的选取

通常采用热偶电阻进行温度测量,热偶电阻埋点难度大,低温试验样机需要进行多次机械操作,机械操作过程中容易导致热偶电阻脱落。为了保证试验过程中温度测量的可靠性,经研究决定采用PT100型号的测温传感器和配套的温度显示系统,将PT100用支架固定在测温区域进行温度的测量,温度传感器安装固定见图6;传感器的数据线通过

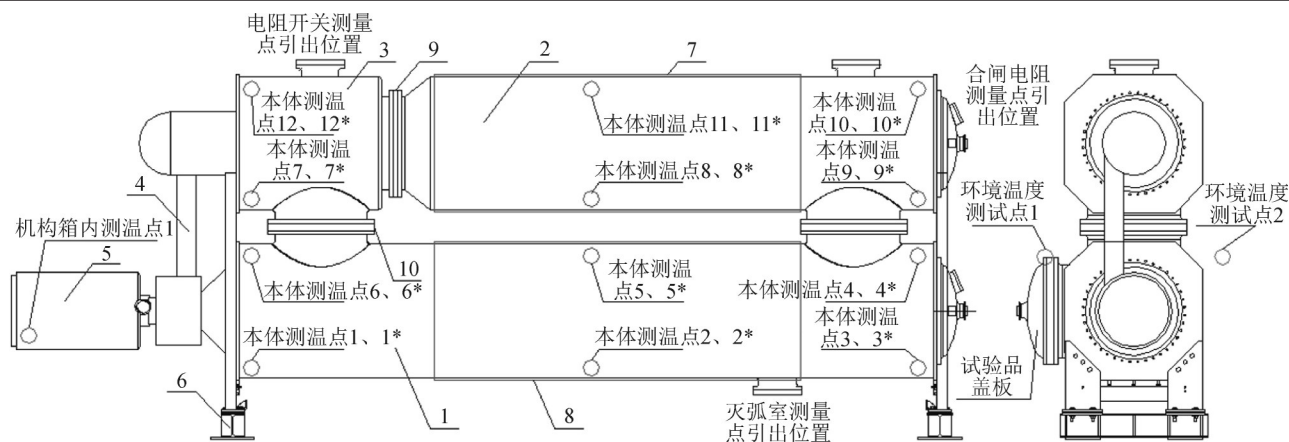


图4 断路器温度测量点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of circuit breaker temperature measurement points

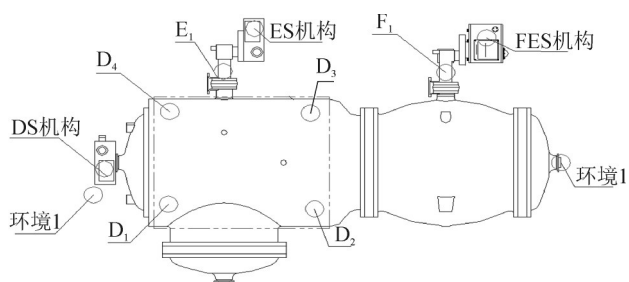


图5 隔离开关、接地开关、快速接地开关温度测量点示意图

Fig. 5 Schematic diagram of temperature measurement points of isolating switch, grounding switch and fast grounding switch

浇注法兰引致壳体外部,与温度显示系统连接,温度显示系统见图7。



图6 温度传感器安装

Fig. 6 Temperature sensor installation



图7 温度显示系统

Fig. 7 Temperature display system

2.1.3 低温试验结果

低温试验过程中在断路器灭弧室壳体及合闸电阻壳体上分别加装了5 800 W的辅助加热装置,液压机构安装270 W加热器,试验形态见图8;在隔

离开关壳体上加装了2 000 W的辅助加热装置,隔离开关和接地开关机构分别安装50 W加热器,快速接地开关机构采用100 W加热器,试验形态见图9。



图8 断路器低温试验形态

Fig. 8 Circuit breaker low temperature test form

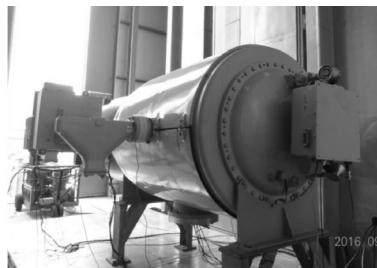


图9 隔离开关低温试验形态

Fig. 9 Low temperature test form of disconnector

根据断路器低温试验的试验数据,生成断路器各测温点的温度变化曲线,见图10。从曲线图分析可以看出,辅助加热装置投入,壳体内部温度达到平衡后,在 -40°C 下壳体内各测量点的最低温度约为 -18°C ,高于断路器气室的液化温度 -28.5°C ;根据标准要求,断路器在 -40°C 下保持24 h后,加热装置需要断电2 h,在此期间壳体内各点的最低温度约为 -25°C ,也高于该气室的液化温度 -28.5°C 。根据各个测温点的实测温度值,可以看出,整个低温试验过程中,断路器壳体内所有监测点的温度均高于液化温度 -28.5°C 。所以在 -40°C 低温环境下,采取辅助加热装置后断路器壳体内部的 SF_6 气体不会出现液化现象。

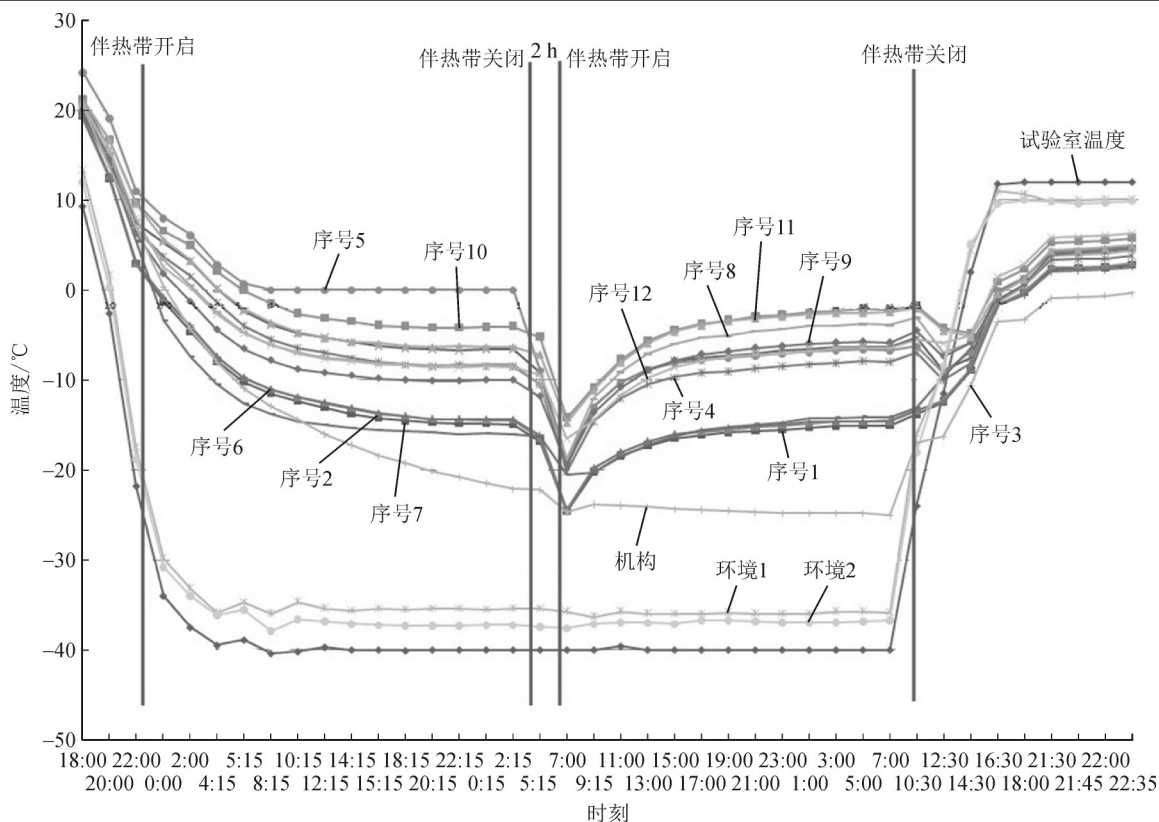


图 10 断路器各温度测量点曲线

Fig. 10 Curve of each temperature measurement point of the circuit breaker

根据隔离开关、接地开关以及快速接地开关低温试验的试验数据,生成各测温点的温度变化曲线,见图 11。从曲线图分析可以看出,在辅助加热装置启动前,所有监测点温度的变化率与环境温度的变化率比较接近;在辅助加热装置启动后,隔离开关壳体内部的监测点由于辅助加热装置的加热作用,温度下降速率明显变慢,在 -40°C 下隔离开关壳体内部最低温度约为 -18°C ,接地开关壳体内部最低温度约为 -20°C ,均高于该气室的液化温度 -28.5°C ,隔离开关辅助加热装置可以有效的防止壳体内 SF_6 气体的液化;未加装辅助加热措施的快速接地开关壳体内部在 -40°C 下最低温度为 -33°C ,也高于该气室的液化温度 -40.4°C 。所以整个试验形态在 -40°C 低温环境下,隔离开关、接地开关以及快速接地开关壳体内部的 SF_6 气体不会出现液化的现象。

根据以上试验结果,采用辅助加热装置,在 -40°C 低温试验的整个过程中,各元件气室 SF_6 的最低温度均高于气室气体的液化温度,各元件气室的 SF_6 气体均不会出现液化现象。因此本次设计的辅助加热装置完全可以满足 1 100 kV GIS 在 -40°C 环境下防止气体液化的要求。

2.2 低温环境下密度继电器的验证

低温试验时,在隔离开关和断路器试验的形态

上分别安装了压力表、WIKA 密度继电器和华伟密度继电器^[17],用来验证压力表和两种密度继电器在 -40°C 环境下的工作情况。

1)隔离开关/接地开关低温试验时,密度继电器的验证情况。1 100 kV 隔离开关、接地开关低温试验时,隔离开关气室内充气压力为 0.58 MPa ,接地开关与隔离开关为同一气室;快速接地开关气室内压力为 0.36 MPa 。试验过程中,随着温度的降低,压力表的读数逐渐下降,温度上升时,压力表读数也随之上升,压力表的读数与温度的变化成正比的关系;而 WIKA 密度继电器和华伟密度继电器的读数,由于其内部均设计有温度补偿单元,所以随着温度的降低,它们的读数会有所升高,从统计曲线可以看出是 WIKA 表和华伟表的读数较为接近。具体见图 12。

2)断路器低温试验时,密度继电器的验证情况。断路器低温试验时,气室内充气压力为 0.58 MPa 。整个试验的过程中,压力表的读数与温度的变化成正比的关系,且 WIKA 表和华伟表在温度最低时读数较高,变化规律与隔离开关低温试验时的情况是一致的。通过对比发现,在低温下 WIKA 表的读数比华伟表的读数略大, -40°C 下, WIKA 表最大读数为 0.68 MPa ,华伟表最大读数为 0.63 MPa ,读数的最大差值约 0.05 MPa 。具体见图 13。

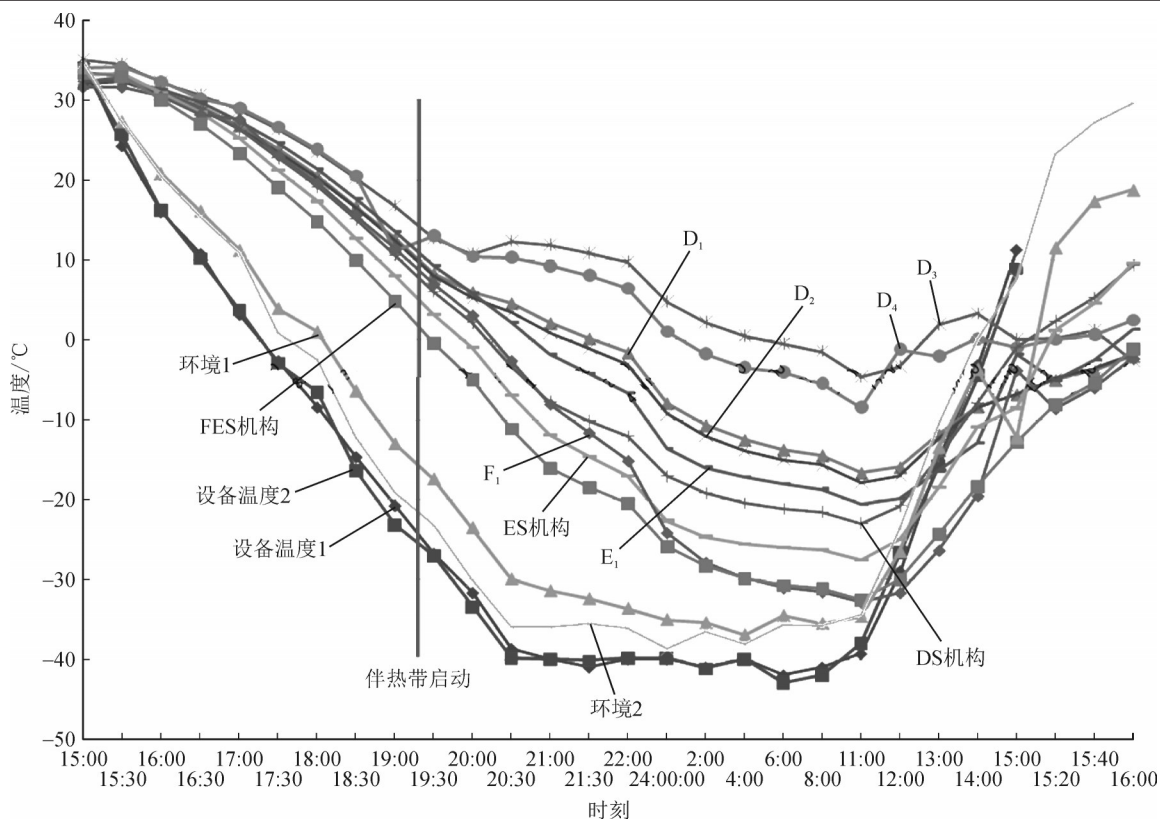


图11 隔离开关、接地开关各测监测温度曲线

Fig. 11 Monitoring temperature curves of isolating switch and grounding switch

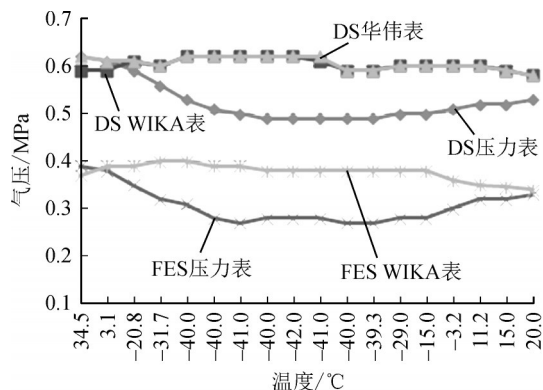


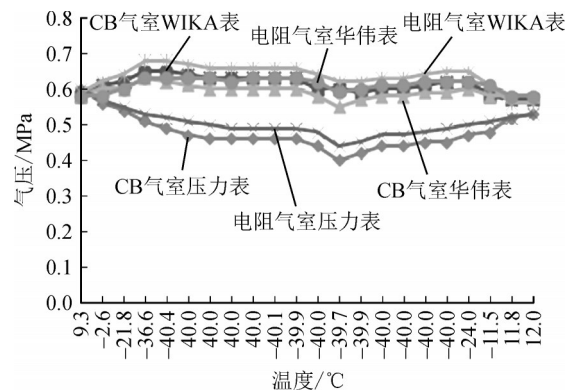
图12 隔离开关、接地开关低温试验时压力表及密度继电器读数

Fig. 12 Readings of pressure gauge and density relay during low temperature test of isolating switch and earthing switch

根据试验情况,低温环境下压力表的读数与温度的变化成正比关系,WIKA 和华伟的密度继电器的温度补偿都发挥了作用,相同温度下 WIKA 密度继电器的温度补偿压力数值要略大于华伟的密度继电器。

2.3 低温环境下密封性能的验证

密封性能作为 GIS 设备的关键性能,也是 GIS 设备低温环境下备受关注的点,因此在低温试验时对断路器、隔离开关的密封性能也进行了试验验证。

图13 断路器低温试验时压力表及密度继电器的读数
Fig. 13 Readings of pressure gauge and density relay during low temperature test of circuit breaker

证。目前气体密封件的主要材质为三元乙丙橡胶,三元乙丙橡胶是乙烯、丙烯和少量的非共轭二烯烃的共聚物,其主链是由化学稳定的饱和烃组成,只在侧链中含有不饱和双键,其耐臭氧、耐热、耐候等耐老化性能优异,同时能够耐受 SF₆ 气体,高弹性范围在 -50 ~ 130 °C,与低温地区 GIS 运行情况比较吻合^[18]。

本次低温试验中所用密封件均为特高压工程中常用密封件,可以在 -50 °C 低温环境下正常使用,断路器、隔离开关低温试验时均充入 0.58 MPa 的 SF₆ 气体,试验前后进行了密封试验,年漏气率均满

足标准要求。

1)断路器密封试验。低温试验前按照标准要求对断路器进行了包扎,经过 24 h 静置后检漏;低温试验开始前对断路器重新进行包扎,经过 50 h 的低温试验后进行检漏,断路器检漏结果见表 3,检漏部位见图 14。

表 3 断路器检漏结果

Table 3 Leak detection results of circuit breakers

序号	包扎容积/ m ³	试验前检漏值/ (μL·L ⁻¹)	试验后检漏值/ (μL·L ⁻¹)
1	0.084 0	0.10	1.00
2	0.084 0	0.50	0.90
3	0.084 0	0.20	0.70
4	0.084 0	0.09	1.50
5	0.084 0	0.20	0.70
6	0.034 0	0.19	0.85
7	0.034 0	0.10	1.10
8	0.004 0	0.10	0.90
9	0.004 0	0.50	0.55
10	0.004 0	0.40	0.90
11	0.794 0	0.09	2.00
12	0.794 0	0.40	1.00
13	0.000 7	0.50	1.50
14	0.000 7	0.67	0.80
15	0.000 7	0.45	0.55
16	0.000 7	0.30	0.70

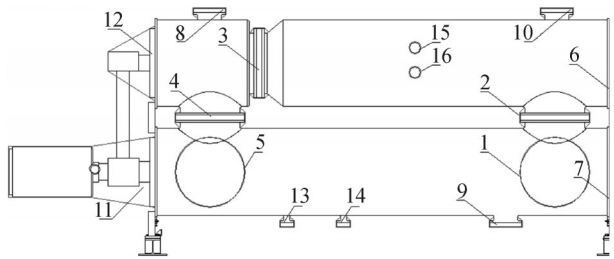


图 14 断路器检漏包扎示意图

Fig. 14 Schematic diagram of leak detection and dressing of circuit breaker

2)隔离开关及接地开关密封试验。低温试验前按照标准要求对隔离开关、接地开关以及快速接地开关进行了包扎,经过 24 h 静置后检漏;低温试验开始前对隔离开关、接地开关以及快速接地开关重新进行包扎,经过 24 h 的低温试验后进行检漏,隔离开关、接地开关以及快速接地开关检漏结果见表 4,检漏部位见图 15。

3)泄漏率的计算。根据标准要求^[19],气体年泄漏率的计算与包扎封闭罩中 SF₆ 气体的泄漏浓度、封闭罩的容积、被试气室的体积等均有关系。以上参数以及气室年漏气率的计算方法如下。

表 4 隔离开关、接地开关以及快速接地开关检漏结果

Table 4 Leak detection results of isolating switch, earthing switch and quick earthing switch

序号	包扎容积/ m ³	试验前检漏值/ (μL·L ⁻¹)	试验后检漏值/ (μL·L ⁻¹)
1	0.034	0.6	1.1
2	0.084	0.7	0.5
3	0.084	0.9	0.6
4	0.020	0.6	1.1
5	0.084	0.5	0.5
6	0.034	1.0	1.6
7	0.034	2.0	0.8
8	0.034	0.6	0.8

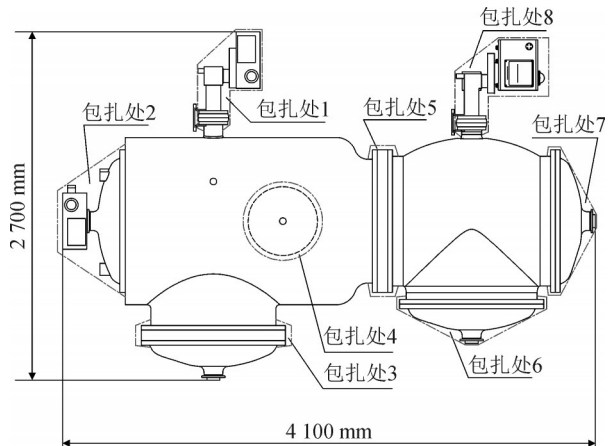


图 15 隔离开关、接地开关以及快速接地开关检漏包扎示意图

Fig. 15 Schematic diagram of leakage detection and wrapping of isolating switch, grounding switch and quick grounding switch

漏气率 F 的计算方法为

$$F = \sum \Delta C \times V \times P / \Delta t \quad (2)$$

式(2)中: F 为漏气率,MPa·m³/s; ΔC 为 SF₆ 泄漏气体体积分数,μL/L; Δt 为测量 ΔC 的间隔时间,s; V 为包扎容积,m³; P 为绝对大气压,0.1 MPa。

相对年漏气率 F_r 的计算方法为

$$F_r = F \times 31.5 \times 10^6 / [V_i \times (P_r + 0.1)] \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中: F_r 为相对年漏气率; V_i 为试品气体密封系统的容积,m³; P_r 为 SF₆ 气室压力,MPa。

根据式(2)、(3)对断路器、隔离开关的年漏气率进行计算。

断路器形态低温试验前的年漏气率为:0.000 14%;断路器形态低温试验后的年漏气率为:0.000 20%;隔离开关形态低温试验前的年漏气率为:0.000 45%;隔离开关形态低温试验后的年漏气率为:0.000 41%;断路器、隔离开关、接地开关以及快速接地开关的年漏气率远小于标准要求的 0.1%,产品所用密封件

在低温环境下的密封性能良好。

2.4 辅助加热装置对产品温升的影响

在断路器、隔离开关外壳上分别加装辅助加热装置,可以有效防止断路器、隔离开关气室内的SF₆气体在低温环境下发生液化。但同时带来了另外一个需要考虑和研究问题,那就是在低温地区夏季的环境温度升至常温^[20]附近时,辅助加热装置断电不加热,这时安装在外壳上的辅助加热装置会不会因为影响断路器和隔离开关的散热而导致其温升超标。为此组织断路器和隔离开关样机,按照标准要求^[21]完成了额定电流6 300 A的通流试验研究。

1)断路器温升试验研究。考虑实际运行中,断路器灭弧室通运行电流,合闸电阻不通电流。因此温升试验只对断路器灭弧室进行,试验时在灭弧室外壳上加装同规格、同结构的辅助加热装置,试验样机见图16。

温升试验时采用热电偶进行温度测量,断路器



图16 加装辅助加热装置的断路器温升

Fig. 16 Temperature rise of circuit breaker with auxiliary heating

共布置了42个温度测量点,通入6 300 A的额定电流,待温度稳定后,记录各个测量点的温升值,并将测量的温升值与同电流下未加装辅助加热装置的断路器温升进行对比,见图17。通过对比分析,加装辅助加热装置与未加装辅助加热装置的温升差别不大,均未超出标准要求值,且温升变化规律也大致相同。

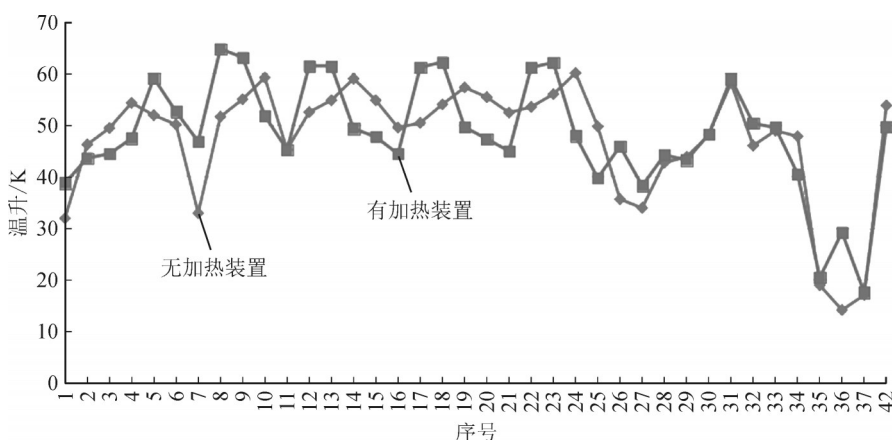


图17 断路器温升结果对比

Fig. 17 Comparison of circuit breaker temperature rise results

2)隔离开关温升试验研究。隔离开关温升试验时在其外壳上加装同规格、同结构的辅助加热装置,试验样机见图18。



图18 加装辅助加热装置的隔离开关温升

Fig. 18 Temperature rise of isolating switch with auxiliary heating device

温升试验时采用热电偶进行温度测量,隔离开关共布置了21个温度测量点,通入6 300 A的额定电流,待温度稳定后,记录各个测量点的温升值,并

将测量的温升值与同电流下未加装辅助加热装置的隔离开关温升进行对比,见图19。通过对比分析,加装辅助加热装置与未加装辅助加热装置的温升基本一致,均未超出标准要求值,且温升变化规律也基本相同。

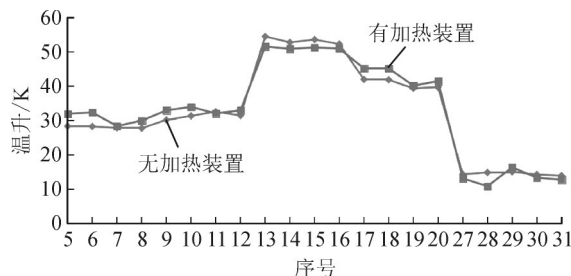


图19 隔离开关温升结果对比

Fig. 19 Comparison of isolating switch temperature rise results

3 结论

为了适应严寒地区特高压工程的建设,文中对 1 100 kV GIS 在高寒地区应用遇到的 SF₆ 气体液化问题进行了分析研究,制定了防止液化的方法并通过了低温试验验证;同时对低温环境下的密封问题,密度继电器受低温环境的影响情况进行了试验研究;另外对采取防液化措施的产品的温升情况进行了试验验证,主要形成以下几个结论。

1)设计了断路器灭弧室及合闸电阻辅助加热装置,加热功率分别为 5 800 W,完成了低温试验验证,试验表明,在-40 ℃ 环境下断路器灭弧室及合闸电阻壳体内最低温度约为-18 ℃,加热装置断电 2 h,断路器灭弧室及合闸电阻壳体内最低温度约为-25 ℃,可有效提高设备耐受低温能力,防止断路器气室 SF₆ 气体发生液化。

2)设计了隔离开关辅助加热装置,加热功率为 2 000 W,完成了低温试验验证,试验表明,在-40 ℃ 环境下隔离开关壳体内部最低温度约为-18 ℃,接地开关壳体内部最低温度约为-20 ℃,快速接地开关壳体内部最低温度约为-33 ℃,有效防止隔离开关、接地开关及快速接地开关气室 SF₆ 气体发生液化。

3)研究了压力表、WIKA 及华伟密度继电器低温下的数值变化和补偿情况,试验表明,压力表随温度降低,读数也随之减小;WIKA 和华伟的密度继电器由于温度补偿的作用,随温度降低读数的均有所增加,且相同温度下 WIKA 密度继电器的温度补偿压力数值略大于华伟密度继电器,两种密度继电器的温度补偿功能明显。

4)对采用辅助加热装置的断路器和隔离开关分别进行了额定电流下的温升试验,并将试验结果与未采取辅助加热装置的产品进行对比分析,采用辅助加热装置与未采用辅助加热装置的产品温升基本一致,均未超出标准要求值,因此采用辅助加热装置不会影响产品的温升。

5)通过试验研究分析,1 100 kV GIS 各元件均具备耐受低温的能力,当然一般情况下低温环境下的特高压工程现场较试验室环境更为恶劣。基于试验研究的低温应对措施在实际应用过程中还需不断调整,不断完善,不断补充,确保产品在低温环境下的可靠稳定运行。

参考文献:

[1] 刘振亚. 构建全球能源互联网有四个重点[J]. 电气时

代,2015(7):28-31.

LIU Zhenya. Four points to build the global energy internet [J]. Electric Age,2015(7):28-31.

[2] 黎 斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

LI Bin.SF₆ high voltage electric equipment design[M]. Beijing:China Machine Press,2003.

[3] 尹凯强,陈 功,安韵竹,等.气压和温度对 SF₆ 气体绝缘性能的影响研究[J]. 电瓷避雷器,2023(2):71-77.

YIN Kaiqiang, CHEN Gong, AN Yunzhu, et al. Influence of pressure and temperature on SF₆ insulation performance[J]. Insulators and Surge Arresters,2023(2):71-77.

[4] 张宗九,陈少波. SF₆ 气体的压力和温度的关系[J]. 华东电力,2002,30(9):19-22.

ZHANG Zongjiu, CHEN Shaobo. Relationship between pressure and temperature of SF₆[J]. East China Electric Power,2002,30(9):19-22.

[5] 赵颖博,李文慧,秋向飞,等.基于低温冷阱富集方法的 SF₆ 分解产物富集系统研制[J]. 电网与清洁能源,2022,38(11):80-87.

ZHAO Yingbo, LI Wenhui, QIU Xiangfei, et al. Development of the SF₆ decomposition product enrichment system based on the low temperature cold trap enrichment method[J]. Power System and Clean Energy,2022,38(11):80-87.

[6] 李国兴,姜子秋,关艳玲,等. 六氟化硫气体低温液化特性试验研究[J]. 黑龙江电力,2015,37(5):399-403.

LI Guoxing, JIANG Ziqiu, GUAN Yanling, et al. Research on characteristic test of SF₆ gas low - temperature liquefaction[J]. Heilongjiang Electric Power,2015,37(5):399-403.

[7] 姜明占,李 涛,孙 毅. 关于 500 kV SF₆ 罐式断路器低温压力闭锁的探讨[J]. 黑龙江电力,2012,35(5):384-386.

JIANG Mingzhan, LI Tao, SUN Yi. Investigation on pressure blocking at low temperature for 500 kV SF₆ tank-type breaker[J]. Heilongjiang Electric Power,2012,35(5):384-386.

[8] 刘海析,潘世岩,董元清,等.气体绝缘金属封闭开关设备低温环境运行的改进设计[J]. 上海电气技术,2013,6(2):38-42.

LIU Haixi, PAN Shiyan, DONG Yuanqing, et al. The improving design of gas insulated metal - enclosed switchgear for low temperature operation[J]. Journal of Shanghai Electric Technology,2013,6(2):38-42.

[9] 王永光. SF₆ 断路器运行中气体低温液化解决方案[J]. 内蒙古电力技术,2009,27(4):35-37.

WANG Yongguang.Solution to gas low - temperature liquefaction in operation of SF₆ circual breakers[J]. Inner Mongolia Electric Power,2009,27(4):35-37.

[10] 李 强. 严寒地区防止全封闭组合电器 SF₆ 气体液化的

- 方案探讨[J]. 四川冶金, 2015, 37(3): 87-90.
- LI Qiang. Investigation on preventing SF₆ gas liquefaction for gas insulated metal-enclosed switchgear in alpine region [J]. Sichuan Metallurgy, 2015, 37(3): 87-90.
- [11] 刘 焱, 崔博源, 王宁华, 等. 1 100 kV 特高压交流变电站开关设备低温应对措施[J]. 高压电器, 2019, 55(5): 220-225.
- LIU Yan, CUI Boyuan, WANG Ninghua, et al. Countermeasures on low temperature for switchgear in 1 100 kV UHVAC substation[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5): 220-225.
- [12] 贾明月, 郭 夫, 刘树新, 等. LW15-252 型断路器低温运行特点及应对措施的研究[J]. 高压电器, 2011, 47(11): 106-109.
- JIA Mingyue, GUO Fu, LIU Shuxin, et al. Study on low-temperature features and corresponding countermeasure for LW15 - 252 circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(11): 106-109.
- [13] 杨俊朋, 曹云龙, 付伟峰. 一种气体绝缘金属封闭开关设备在低温地区的应用[J]. 电工电气, 2011(7): 39-41.
- YANG Junpeng, CAO Yunlong, FU Weifeng. Application of kind of gas insulated metal-enclosed switchgear in low temperature area[J]. Electrotechnics Electric, 2011(7): 39-41.
- [14] 宁 琳, 于观超. SF₆ 断路器低温运行压力闭锁原因分析[J]. 电子制作, 2014(22): 29-30.
- NING Lin, YU Guanchao. Analysis the cause of SF₆ pressure block when the SF₆ circuit-breaker operates under low temperature[J]. Practical Electronics, 2014(22): 29-30.
- [15] 李波涛, 周 毅, 徐党国, 等. SF₆ 断路器高寒地区使用探讨[J]. 华北电力技术, 2015(1): 37-40.
- LI Botao, ZHOU Yi, XU Dangguo, et al. Discussion on use of SF₆ circuit breakers in alpine region[J]. North China Electric Power, 2015(1): 37-40.
- [16] 徐国政. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- XU Guozheng. The theory and application of high voltage circuit breaker[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [17] 倪同江. 六氟化硫气体密度继电器(表)的结构原理和运行中的注意事项[J]. 科技资讯, 2007(2): 38.
- NI Tongjiang. The structure principle and operation notice of SF₆ density relay[J]. Science & Technology Information, 2007(2): 38.
- [18] 秦晓宇, 吕寻浩, 陈 玉, 等. 高寒地区 GIS 的适应性研究[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 72-78.
- QIN Xiaoyu, LYU Xunhao, CHEN Yu, et al. Study on adaptability of GIS in extreme cold region[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 72-78.
- [19] 高压开关设备六氟化硫气体密封试验方法: GB/T 11023—2018[S]. 2018.
- Test method of SF₆ gas tightness for high - voltage switchgear: GB/T 11023—2018[S]. 2018.
- [20] 朱立明. 万能式断路器温升影响因素及降温升方法探讨[J]. 电器与能效管理技术, 2016(24): 20-25.
- ZHU Liming. Discussion on temperature rise influence factors of air circuit breaker and how to reduce temperature rise[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(24): 20-25.
- [21] 高压交流开关设备和控制设备标准的共用技术要求: GB/T 11022—2020[S]. 2020.
- Common specifications for high-voltage alternating-current switchgear and controlgear standards: GB/T 11022—2020 [S]. 2020.
- 杨喜龙(1981—), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事六氟化硫高压开关设备的研发、工程设计以及相关问题的分析处理(E-mail: xdse4251@163.com)。