

# 1000 kV 气体绝缘封闭装置关键出厂试验

王晨, 施景奎

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**在变电工程建设中,为保证气体绝缘封闭装置(GIS)制造质量,需对GIS制造过程实行有效监造。从监造角度出发介绍了1000 kV特高压GIS关键出厂试验的试验方法以及试验过程中可能存在问题,对其他各电压等级GIS设备出厂试验监造工作也具有参考意义。

**关键词:**气体绝缘封闭装置;出厂试验;监造;特高压

**中图分类号:**TM595

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2016)03-0071-05

气体绝缘封闭装置(GIS)是由断路器、隔离开关、接地开关、电流互感器、电压互感器、避雷器、电缆终端及进出线套管等组成,并注入绝缘且消弧能力很强的SF<sub>6</sub>气体的封闭式组合电器。其实现了小型化、模块化,绝缘不受外界影响,对周围不产生电磁场、杂音和无线电干扰,合乎环保要求,具有可靠性高,安全性能好,配置灵活,安装周期短,维护方便和检修周期长等优点。目前大量新增开关设备均采用GIS,尤其是在特高压变电站开关设备全部采用GIS。但GIS一旦发生内部故障,修复周期长、过程复杂、对供电系统影响较大,因此用户对GIS质量要求特别高。

为了保证GIS制造质量,需对其制造过程实行有效监造,以保证设备到达现场后能够顺利安装、调试和投产,实现变电站的一次成功投运和可靠运行。通过开展GIS出厂试验见证工作,实现关口前移,把潜在的产品质量问题消除在制造厂内,提高产品入网质量,保障电网安全可靠运行,防止不合格产品进入电网。文中介绍了1000 kV特高压GIS关键的出厂实验方法。

## 1 气体密封试验

SF<sub>6</sub>气体密封试验通常采用局部包扎法,如图1所示。包扎范围有:壳体法兰密封面及对应的角焊缝、直动密封和转动密封处、压力表接头、管接头及阀门处、瓷套密封面、法兰胶装及粘接处、壳体的环焊缝处等,如图1所示。

进行包扎法测量SF<sub>6</sub>气体泄漏率时,要求试验场地通风良好,周围环境SF<sub>6</sub>气体浓度测量值在 $5 \times 10^{-7}$ (体积比)以下才允许包扎。如果环境中浓度大于 $1 \times 10^{-6}$ (体积比)时,停止包扎,应采取措施降低环境中SF<sub>6</sub>气体浓度。包扎一定时间后(不少于24 h),测定包扎腔内SF<sub>6</sub>气体的浓度,并通过计算来确定SF<sub>6</sub>气体年泄漏率,年泄漏率不超过0.5%<sup>[1]</sup>,计算公式如下:

$$r = \rho TVK / tM \times 100\% \quad (1)$$

其中: $\rho$ 为SF<sub>6</sub>气体密度 $6.15 \text{ kg/m}^3$ ( $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ); $T$ 为1年时间; $V$ 为估算出的检漏罩和试品之间的净容积; $K$ 为包扎检漏前后SF<sub>6</sub>气体浓度变化值; $M$ 为SF<sub>6</sub>质量; $t$ 为包扎时间。

值得注意的是不同生产商为提高产品质量,会不同程度提高气密性内控标准。因此厂内监造试验时气密性试验经常会出现满足国标,却达不到内控标准的要求。



图1 气密性试验

## 2 主回路电阻试验

主回路电阻测量是验证设备装配状况的有效方法,根据产品图纸或技术条件的要求进行主回路电阻的测量,且总的测量方案考虑现场安装后、设施维护或维修期间的测量能够进行对比。产品主回路电阻测量一般在装配完成后立即进行,以确认装配无异常。测量结果一般不大于出厂试验标准的120%,相同测量段三相之间的测量结果一般相差不超过 $\pm 10\%$ 。1000 kV工程一般按照每个运输形态进行主回路电阻测量,且每个测量单元都有一个作为参考的电阻计算值。

主回路电阻测量一般采用电压降法,回路电阻仪引出的电流线在外侧、电压线在内测。测量线与主回路接触应牢固,接触面应处理干净保证电接触良好,接触部分应使用单线或平面接线端子,避免使用尖锐的金属夹子夹住导体(易破坏导体表面光滑,影响局放试验值),避免使用铜绞线直接接触导体(防止铜屑进入导体内部,耐压试验时可能引起闪络)。利用接地开关的

绝缘座接地端子进行测量时,要注意将接地端子表面的污物、锈等清除,以免接触电阻大造成误差。

### 3 机械特性试验

断路器出厂时的机械特性试验是通过开关综合测试仪绘制机械行程特性曲线实现的。试验主要包括控制电源(电压)和动力源(油压或气压)在允许的变动范围内的组合条件下(现场试验一般只做额定电压与额定油压)断路器的分闸、合闸、合分以及重合闸特性测试,具体包括分闸时间、速度、同期性以及合闸电阻的预投入时间等内容,1000 kV GIS 试验项目见表 1, $U_a$  为额定电压。

表 1 机械特性试验项目

	项目	电压	油压 /MPa
分闸特性	分闸速度		
	平均分闸速度	$100\%U_a$	
	分闸通周期性		
	分闸时间		57.3
	平均分闸速度	$120\%U_a$	
	分闸时间		
	平均分闸速度	$65\%U_a$	
	分闸时间		51.5
	平均分闸速度	$65\%U_a$	
	合闸特性	合闸时间	
平均合闸速度		$100\%U_a$	
合闸通周期性			
合闸电阻预接入时间			57.3
合闸时间			
平均合闸速度		$110\%U_a$	
合闸时间			
平均合闸速度		$85\%U_a$	
合闸时间			53.8
平均合闸速度		$85\%U_a$	
合分特性	合闸时间		
	平均合闸速度		
	分闸速度	$100\%U_a$	57.3
	平均分闸速度		
	合分时间		
	合闸预接入时间		
重合闸特性	第一分闸时间		
	合闸时间		
	合分时间		
	第二分闸时间	$100\%U_a$	57.3
	平均合闸速度		
	第一分闸速度		
	第二分闸速度		
	合闸电阻预接入时间		

各机械特性参数的定义如下;

(1) 合闸时间:从断路器操动机构合闸线圈接通到弧触头接触这段时间。

(2) 分闸时间:分为固有分闸时间和熄弧时间两部分。固有分闸时间是指从操动机构分闸线圈接通到弧触头分离这段时间。熄弧时间是指从触头分离到电弧熄灭为止这段时间。所以分闸时间也称为全分闸时间(实际测量一般指固有分闸时间)<sup>[2]</sup>。

(3) 刚分(合)速度:开关在分(合)闸过程中,动静触头分离(接触)瞬间的运动平均速度。通常以辅助接点变位后 10 ms 以内的平均速度来反映。

(4) 平均速度:分合闸过程中中间 80%行程的平均速度,在已知行程长度的情况下可以有计数器捕获功能得到 10%和 90%行程位置,进而计算出该段的平均速度。

(5) 最大速度:分合闸整个过程中的最大速度。分合闸时间与速度都是衡量分合闸快慢的指标。分闸过慢,则电弧燃烧时间增加,从而加速断路器触头的磨损,降低断路器的寿命;分闸过快,一方面会使运动机构承受过大的机械应力和冲击,从而造成个别部件的损坏缩短断路器寿命,另一方面在电流自然过零点前就“截流”,强迫电弧熄灭,则将产生较大的过电压,对线路及设备将产生不利影响。合闸过慢,同样会导致燃弧时间增加,加快触头磨损;合闸过快,机构、触头都会承受较大的冲击力,还容易造成合闸弹跳超标。

(6) 合分时间:合闸操作中主触头刚接触到紧接着的分闸操作中主触头分离时刻之间的时间。若断路器合分时间过短,则断路器在重合闸方式时,特别是切断永久短路故障情况下,会因为断路器灭弧室的绝缘强度和灭弧能力恢复不够,出现断路器不能够切断故障电流,或出现重燃或重击穿,导致严重的电网事故;若合分时间过长,由于断路器不能及时快速切断故障电流,而导致电网稳定破坏事故。

(7) 不同期时间:从首相分(合)到三相分(合)之间的时间,可由首相有合闸电流到三相有合闸电流之间的时间差确定。断路器分合闸严重不同期将会导致线路和变压器的非全相运行,从而可能出现导致绝缘损坏的操作过电压、继电保护误动作等不利现象<sup>[2]</sup>。

(8) 合闸电阻预投入时间:合闸电阻开关闭合到断路器主触头接触时刻之间的时间。合闸电阻的主要作用是抑制断路器合闸过程中的过电压,其预投入时间控制在 8~11 ms,若时间过短,则达不到抑制过电压的理想效果;若预投入时间过长,又会容易导致电阻长时间发热,缩短合闸电阻的使用寿命。

## 4 机械操作试验

### 4.1 断路器机械操作试验

断路器的机械操作试验(SF<sub>6</sub>压力为 0.58 MPa)主要包括:

(1) 额定电压下、额定油压下的分闸、合闸各 30 次,分合分 5 次,动作应可靠;

(2) 最高电压(分闸线圈 120%额定电压,合闸线圈 110%额定电压)、额定油压下分闸、合闸各 5 次,动作应可靠;

(3) 最低电压(分闸线圈 65%额定电压,合闸线圈 85%额定电压)、低油压下分闸、合闸各 5 次,动作应可靠;

(4) 30%额定电压、额定油压下分闸、合闸各 3 次,机构不应动作;

(5) 额定电压下、额定油压下连续 200 次的机械操作,其中第 81~100 次与 181~200 次进行 10 次重合闸操作;200 次连续操作之后要解体检查、清理(进入壳体前先要充如足量空气,保证氧气浓度),保证无肉眼可见异物;同时检查操作机构内部储能电机的尼龙齿轮无明显磨损,如图 2 所示。



(a) 连续操作后的内部清理 (b) 储能电机的尼龙齿轮检查

图 2 机械操作试验后的检查

#### 4.2 隔离开关机械操作试验

隔离开关、地刀的机械操作试验(无 SF<sub>6</sub> 气体)主要包括:

(1) 额定电压下分、合闸操作 DS280 次,ES200 次,机构动作正常,辅助开关切换正常、可靠,无卡滞现象,分合闸位置可靠,隔离开关的分合闸时间 ≤ 3 s,下同;

(2) 85%额定电压下分合闸 DS、ES 各 10 次;

(3) 110%额定电压下分合闸 DS、ES 各 10 次;

(4) FES 进行 500 次操作(原来为 200 次),分合闸时间 ≤ 5 s,合闸速度在 5.7~7 m/s 之间(速度定义:刚合点与 50%行程点之间的直线斜率);

(5) 操作之后要解体检查、清理,保证无肉眼可见异物。

值得注意的是是一般机械操作试验在机械特性试验后面做,防止在部分机械性能不合格的情况下反复操作试验,对设备造成损坏。

### 5 雷电冲击试验

1000 kV GIS 出厂试验中雷电冲击试验,需保持最小 SF<sub>6</sub> 气体压力(闭锁压力,试验前要对所有试品内的 SF<sub>6</sub> 气体压力采用密度计进行检查),冲击电压幅值

不小于 2400 kV(也不宜超过 2472 kV),正负极性各 3 次,并且记录波前时间与半峰时间。对于开关类设备,要分别在分闸、合闸状态下进行对断口和对地的雷电冲击耐压试验。1000 kV GIS 一般要求波前时间波头时间 1.2 μs,容许偏差 30%,波尾时间 50 μs,容许偏差 20%<sup>[3]</sup>(如工程技术协议里另有要求,按技术协议执行)。

雷电冲击耐压的试验回路主要包括冲击电压发生器、测量装置以及保护回路等。冲击电压发生器需满足两个要求:一是能输出几十万到几百万伏的电压,二是电压要具有一定的波形,通常是用 MARX 回路来达到这些目的,如图 3 所示。冲击电压发生器“并联充电、串联放电”的原理如下:试验变压器 T 和高压硅堆 D 构成整流电源,经过保护电阻  $r$  及充电电阻  $R$  给电容器  $C1\sim C4$  充电,充电到电压  $U$ ,球隙  $g1\sim g4$  上的电位差也是  $U$ 。事先把球间隙距离调大到放电电压稍大于  $U$ ;当需要使冲击机动作时,可向点火球隙( $g1$ )送去一脉冲电压,针极和球皮之间产生一小火花,引起点火球隙放电,于是电容器  $C1$  的上极板(负极性板)经过  $g1$  接地,点 1 的电压由地电位变为  $+U$ (在充电结束后,电容器的上极板电压为  $-U$ ,下极板为 0;当  $g1$  放电之后,电容器  $C1$  的上极板被强迫钳制在地电位,同时由与电容两端电压不能突变,1 点电位变为  $+U$ );电容器  $C1$  与  $C2$  之间隔有较大阻值的充电电阻  $R$ ,且由于电容  $C'$  的存在,点 2 和点 3 的电位不可能突然改变,点 3 的电位仍未  $-U$ ,中间球隙  $g2$  的电位差突然上升到  $2U$ ,立刻放电,于是点 3 的电位被钳制在  $U(r_d$  非常小),点 2 电位变成  $2U$ 。以此类推,最终输出的电压即为所有电容器电位的总合,即  $4U$ 。在这个过程中,要求球隙具有较好的“同步性”,即  $g1$  不放电则都不放电,一旦  $g1$  放电则按顺序逐个放电。除此基本电路之外,还有双边充电以及高效率回路( $R_f$ 、 $R_i$  分布在各级回路中,没有专门的  $r_d$ ;采用一边充电电阻,另一边由  $R_f$ 、 $R_i$  兼作充电电阻)等形式的冲击电压发生器。

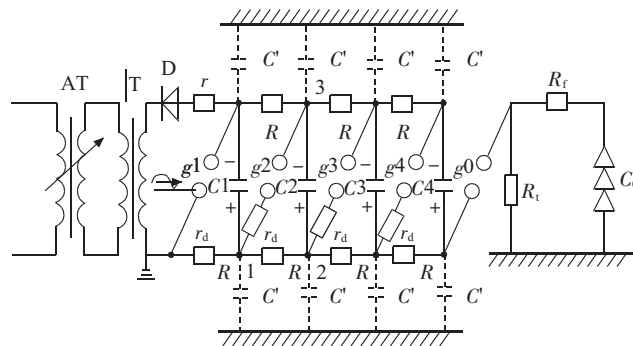


图 3 冲击电压发生器的基本回路

图 4 中显示的是正常正极性雷电冲击试验波形,图 5、图 6 分别显示的是正、负极性下雷电冲击试验放

电波形图,图中红圈处发生击穿,击穿后回路对地导通产生一个快速的放电过程,故而红圈后波形斜率较大。

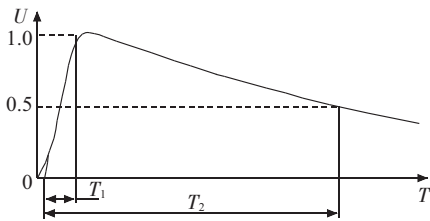


图4 雷电冲击耐压波形

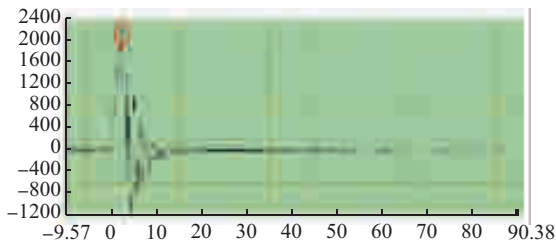


图5 正极性雷电冲击试验放电波形

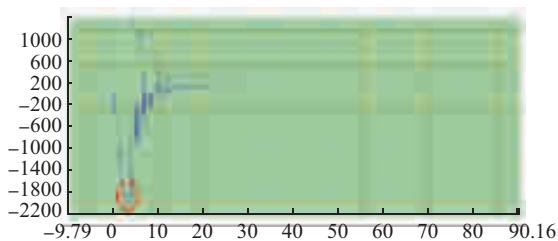


图6 负极性雷电冲击试验放电波形

## 6 工频耐压试验与局部放电试验

工频耐压试验回路包括开关柜(前级、后级)、调压器、补偿电抗器、过电压保护器、试验变压器、弱阻尼电容分压器以及峰值电压表与示波器装置。一般采用自耦式调压器。为减小流经变压器高压绕组中的电流,降低试验变压器的容量,往往采用补偿电抗器对容性试品进行补偿,并根据试品电容大小进行补偿量的调节。与普通变压器相比,试验变压器具有容量大、额定电压较高、允许持续工作时间短、多工作在容性负荷、无附加散热、体积小等特点,且高压绕组一端接地。制造厂一般有1500 kV,1250 kV,750 kV等多种等级变压器,分别用于形态耐压、绝缘盆子耐压与其他绝缘件耐压试验。为提高工作效率,通常一次进行多个试品的耐压试验,通过试验工装来实现。形态耐压试验的试验工装是一条母线筒和多个隔离开关与接地开关组成,既可进行单个试品试验,又可同时进行多个试品试验。同时,工装母线分别通过两个隔离开关与雷电冲击耐压试验回路和工频耐压试验回路相连,前一个试验结束后只需要倒闸操作即可,不需要重新拆装设备。绝缘盆子试验工装一次可以进行多个绝缘盆子的耐压试验;其他绝缘件的耐压试验工装类似与形态耐压试验工装,但由于没有外壳密封,绝缘

件放在一个金属筒里,里面再充一定压力的 $\text{SF}_6$ 气体。

对于所有工频耐压试验来说, $\text{SF}_6$ 压力为最低工作压力(闭锁压力),工装气体压力稍高(以保护工装,防止长时间施压破坏),每次试验前要用密度计进行校验。同时注意检查隔离开关与接地开关的状态,防止接地加压。

形态与单个绝缘件工频耐压试验的加压大小、持续时间如图7、图8所示,电压大小通过峰值电压表显示,持续时间通过计时器进行计时。其中第一段加压到635 kV(额定相电压)并持续5 min为“老练净化”阶段,其作用是将混入设备的导电微颗粒移动到低电场强度区域和微颗粒陷阱中,同时烧蚀电极表面的毛刺、尖端或杂质。

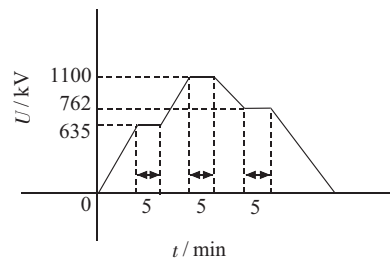


图7 形态试验加压时间

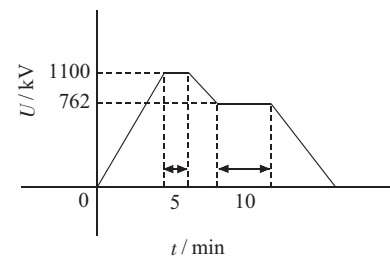
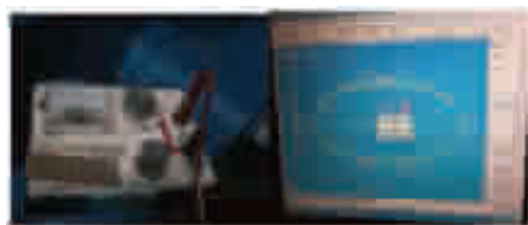


图8 绝缘盆子加压时间

最后一段在762 kV(1.2倍额定相电压)下进行局部放电测量,以及早发现设备绝缘内气隙、气泡等微弱放电缺陷。整个形态要求背景不超过2.5 pC,放电量不超过5 pC;对于单个绝缘件(包括绝缘盆子)要求背景值不超过1.5 pC,放电量不超过3 pC<sup>[3]</sup>。

在进行局部放电测量之前,要进行回路校准,其目的是一是检查试验回路,验证系统能够正确地测量出规定的局放值;二是确定完整回路中视在电荷量的刻度因素,如图9所示。校准通常是将标准脉冲发生器的一端接到接地开关的动触头外部,这样就与内部高压导体连接到一起(通过绝缘法兰与壳体隔开),另一端接到外壳,通过外壳接地。校准脉冲发生器发出5 pC或50 pC(根据环境干扰情况而定)的信号,观察示波器上的放电量并进行相应调整,便完成了校准。此外,要求在每一次重新接线或者更换试品后要求重新进行校准(因为整个回路的电容量发生变化,会影响校准值)。

在局部放电量测量过程中,有时会出现较大的干扰信号,导致放电量超标。干扰可能来自电源,也可能



(a) 校准脉冲发生器 (b) 校准方波

图9 方波校准

来自接线回路或者试品外部悬浮金属。图10是监理过成中常见的2种干扰信号。



(a) 变频电源干扰 (b) 电机干扰

图10 监理过成中常见的两种干扰信号

## 7 盆子破坏型水压试验

盆式绝缘子水压试验包括例行试验与破坏试验。例行水压试验逐个进行,在凹面承受水压、凸面接触大气压的状态下进行试验;压力上升速度不超过0.4 MPa/min,试验压力升至2.31 MPa(3倍设计压力),保持1 min,无裂纹或泄露现象。水压破坏试验目的是验证运行条件下绝缘盆子的承受压力的安全裕度;存在一定的抽样比例,如表2所示<sup>[4]</sup>。

表2 抽样样本容量数值

批量	样本容量
$N \leq 30$	3
$30 < N \leq 60$	4
$60 < N \leq 100$	5

注:批次划分原则为生产日期跨度不大于3个月。

水压破坏试验同样是凹面承受水压、凸面接触大气压的状态下进行试验;压力上升速度不超过0.4 MPa/min,试验压力升至3倍设计压力保持1 min,然

后继续升压直至破坏,记录破坏时刻的压力值和影像资料,并在裂纹处取样进行分析,如图11所示。



图11 盆子破坏性水压试验

## 8 结束语

GIS制造过程中,试验项目众多,除了传统的电气试验,还有涉及原材料、关键组部件以及装配过程中的各项试验。文中仅就其中几项关键试验进行了详细介绍。其中,气体密封试验、主回路电阻试验为现场见证点;机械特性试验、机械操作试验、雷电冲击试验、工频耐压与局部放电试验、盆子破坏型水压试验为停工待检点。监理人员应对以上试验逐项现场见证,停工待检点在监理人员未见证签认前不得转入下一环节。监理过程发现的质量和管理问题应及时汇报、及时处理、及时总结,充分保证了产品的质量和生产进度。

### 参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部国家质量监督检验检疫总局. GB/T 50832—2013 1000 kV 系统电气装置工程电气设备试验交接标准[S]. 北京:计划出版社,2013.
- [2] 刘军福,赵中标,康宝英. 一起 SF<sub>6</sub> 断路器分闸时间异常分析[J]. 宁夏电力, 2011(S): 31-32, 48.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化委员会. GB/T 16927.1—2011 高电压试验技术 第一部分:一般定义及试验要求[S]. 北京:中国标准出版社, 2011.
- [4] 国家电网公司. Q/GDW 11127—2013 1100 kV 气体绝缘金属封闭开关设备用盆式绝缘子技术规范[S]. 北京:中国电力出版社, 2013.

### 作者简介:

王晨(1990),男,江苏盐城人,助理工程师,从事开关方面的研究工作;

施景奎(1986),男,江苏盐城人,助理工程师,从事开关方面的研究工作。

## Key Factory Test for 1000 kV GIS

WANG Chen, SHI Jinglei

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Effective supervision is required in GIS manufacturing process to ensure its quality in substation engineering construction. This paper introduces the key factory test method and problems of the test process for 1000 kV GIS from the perspective of supervision manufacture. The paper provides a reference for the supervisor factory test of other voltage level GIS.

**Key words:** GIS; factory test; supervision manufacture; ultra-high voltage