

「构电模型」

GIS母线设计及工程应用

文/西安西电开关电气有限公司 罗四娇

母线是气体绝缘金属封闭开关设备（简称GIS）重要组成元件之一，承担汇集进线电流，分配出线电流的重要功能。结合各电压等级的特点，简述了母线的常用结构形式、导体选用因素、电接触形式对母线设计结构的确定；然后根据工程母线应用提出常需的关注点，以保证母线长期运行的可靠，维护、扩建的便利。

气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）由断路器、隔离开关、接地开关、互感器、避雷器、主母线、分支和出线终端等多种元件组成。GIS母线是GIS中汇总和分配电能的重要组成元件。其用途是将GIS各功能间隔机械地、电气地连接起来，以便满足不同电站的总体布置需求。因此GIS母线设计结构的充分验证及工程实际应用的合理布置尤为重要，其关系到设备的运行可靠性、维护方便性、扩建灵活性。

由于不同的产品母线的结构和布置不尽相同，笔者结合实际工作以252 kV GIS母线的设计及应用为例进行说明。

GIS母线设计

在新产品的开发初期，由于GIS自身紧凑、集成度高的结构特点，一般结合产品的技术参数，如电压等级、额定电流、短时耐受电流等，从以下几方面考虑母线的设计：

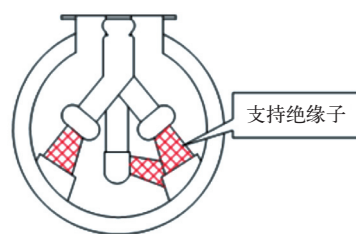
1. 结构形式

GIS母线有三相共箱和分相式两种。在363 kV及以下多采用布置紧凑尺寸较小的三相共箱式结构，但对同一产品若额定电流较大时，宜采用分箱结构；在550 kV及以上，多采用分箱式结构。

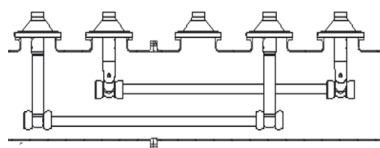
共箱式结构三相母线一般通过以下方式固定：

- 1) 支持绝缘子固定在外壳上（图1 a）；
- 2) 通过单相盆式绝缘子悬挂（图1 b）；
- 3) 通过三相盆式绝缘子固定在外壳上（图1 c）。

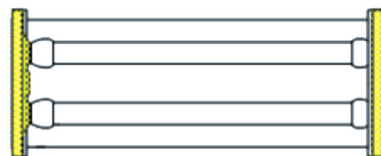
分箱式结构母线常采用单相盆式绝缘子或绝缘台支撑。



(a) 绝缘台支撑结构



(b) 单相盆式绝缘子支撑结构



(c) 三相盆式绝缘子支撑结构

图1 母线三相典型结构

从电气和机械性能考虑,只要支撑结构设计合理都可靠。支撑结构的确定更在于产品的成本和工艺实施的难度。

2. 导体设计

GIS母线导体承受高电压、额定电流和短路电流的功能。设计应从两方面考虑:

1) 先根据产品的外形尺寸等综合因素初步选材,再按额定电流的大小和选材允许电流密度计算通流面积,由计算结果优先选用型材。

导体设计时可参考下原则:

a) 优先选用铝材,质量轻,易加工。
b) 优先选用管材,趋肤效应小;铸母线,实心趋肤效应大,质量重且存在内部缺陷。

c) 按允许冲击场强 E_1 值优先选用散热面积大、趋肤效应小的大直径薄壁管,由设计及试验经验得到的不同材质的允许电流密度如表1。

表1 各材质电流密度

材料	电流密度
铜管T2	$j = 2.2 \sim 2.5 \text{ A/mm}^2$ (壁厚 $\delta \leq 17.5$)
导电率 $\geq 55\%$ 铝管	$j = 1.3 \sim 1.35 \text{ A/mm}^2$ (壁厚 $\delta \leq 17.5$)
	$j = 1.1 \sim 1.15 \text{ A/mm}^2$ (壁厚 $\delta \geq 20$)
导电率 $\leq 45\%$ 铝管	$j = 1.1 \sim 1.35 \text{ A/mm}^2$ (壁厚 $\delta \leq 17.5$)
	$j = 0.85 \sim 0.95 \text{ A/mm}^2$ (壁厚 $\delta \geq 20$)
铸铝	$j = 0.5 \sim 0.6 \text{ A/mm}^2$ (直径 $\phi 80 \sim \phi 110$)
铸铜	$j = 1 \sim 1.2 \text{ A/mm}^2$ (直径 $\phi 60 \sim \phi 90$)

导体截面计算:

如:当额定电流 $I_r = 5000 \text{ A}$,初步选材定为 $j = 1 \text{ A/mm}^2$ 时,截面积 S 为

$$S = I_r / j$$

式中, I_r 为额定电流,A。

2) 母线导体半径是否满足绝缘要求,见下式

$$r_1 = U_{th} / E_1$$

式中, U_{th} 为产品雷电冲击耐受电压,kV; r_1 为母线导体半径; E_1 为 24 kV/mm ($SF_6 = 0.4 \text{ MPa}$)供参考。

导体外径的选择由多种因素确定,导体的电流密度 j 、外壳半径及导体材料等。

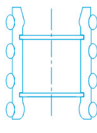
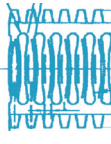
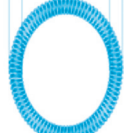
导体设计一面考虑最大外径要满足电场的计算结果,一面考虑选用材质截面满足额定电流的需求,同时结构上能承受短时电流和峰值电流产生的热应力和机械应力。

3. 母线触头

电接触的可靠性对于产品长期工作的温升及短路电流冲击时的动稳定性和热稳定性都有重

要的影响。常用的触头的基本结构有以下四种(表2)。

表2 触头常用结构

梅花触头	自力型触头	表带触头	螺旋弹簧触头
			
特点: 接触点多,导电性好,电动稳定性高	特点: 靠合闸后触指变形提供接触压力,结构简单,工作可靠	特点: 体积小,接触点多,导电能力强,电热稳定性高。但沟槽机加精度高	特点: 结构简单,体积小,成本低,一般采用导电性好的铍青铜线绕制而成

设计时根据产品的电流及电接触部位的空间尺寸及各触头的特点选用相应触头。应用时为保证触头和导体的可靠接触(见图2)其有效接触距离 $L_1 \geq 5$;同时考虑安装、加工和最恶劣温度环境下主母线筒体热胀冷缩变形的影响,合理地设计 L 值。

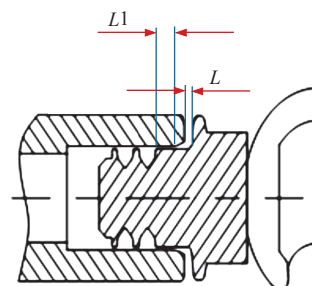


图2 导体和触头配合间隙

4. 母线验证

GIS母线是GIS设备的主要导电回路,为保证产品的安全可靠运行,在应用之前必须进行相关的型式试验。试验项目如下:

- 1) 外壳强度试验。
- 2) 绝缘试验。
- 3) 主回路电阻测量和温升试验。
- 4) 内燃故障电弧试验。
- 5) 短时耐受电流和峰值耐受电流试验。

GIS母线应用

目前母线在应用方面没有统一标准,它受各产品的结构特点、各工程布置方式、环境温度

等因数影响,在设计时具有一定的灵活性。但总的设计原则是要保证产品的可靠运行、维护方便等。现从以下方面对母线应用进行介绍。

1. 气室

GIS与常规的配电装置比其结构紧凑、运行安全可靠、维护工作量小。但难免出现SF₆气体的泄漏、绝缘子老化等因素而导致GIS内部发生故障,有时会波及到母线气室,如图3母线隔离开关盆式绝缘子更换,故障气室DS81和母线气室1气体的回收,相邻母线气室2和3降至安全操作气压,若母线气室较大,气体的回收和充放时间长,带来了不必要的经济损失。若气室过小,气体的泄漏及内部故障电弧的产生的能量引起GIS内部压力剧增,都会影响产品的安全运行,最小气室的压力必须保证内部产生的过压力能够自身限制到不超过型式试验的压力。因此母线气室的合理性,除考虑最小气室的运行可靠和经济性同时,当发生故障时尽可能缩小波及范围和缩短作业时间。

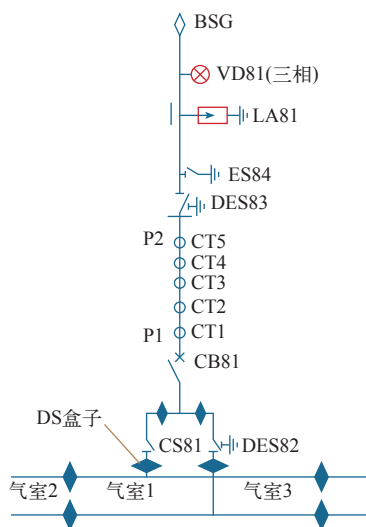


图3 间隔气室图

2. 伸缩节布置

由于GIS母线较长,基础施工误差、设备安装误差等原因造成相邻母线在水平轴和垂直面上下偏差,另外设备在正常运行过程中,由于壳体热胀冷缩等因素必然造成母线壳体法兰连接之间会产生一定的变形或应力集中,为了确保设备安全可靠的运行,消除以上不利因素,常常需要装设一定数量的伸缩节。

伸缩节一般具有以下作用:

- 1) 调整安装过程中出现的各类误差。
- 2) 吸收由于热胀和冷缩引起的壳体变形或应

力集中。

3) 吸收设备运行时由于电力而引起的振动

首先考虑各种温差、温升、日照及母线导体插入量等因素,通过分析及计算可得出为补偿运行时母线温度变化引起的轴向变形量,确定轴向调节的伸缩节的数量和位置,吸收母线在运行时的变形量,保证母线在运行时的安全。

以下为安装时,最低周围空气温度下壳体轴向的变化量 ΔL_1 的计算

$$\Delta L_1 = L\alpha_1(T_h + T_i + T_s - T_{al}) - L\alpha_2(T_h - T_{al})$$

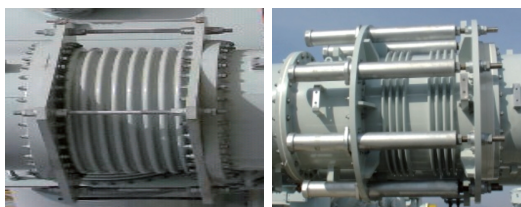
式中, T_i 为壳体的实际温升,按温升型式试验报告,K; $T_i \sim T_h$ 为周围空气温度, $-35 \sim +40^\circ\text{C}$; T_{al} 为安装环境温度, $-5 \sim +40^\circ\text{C}$; T_s 为太阳辐射引起壳体的温升,10 K; T_e 为壳体最大允许温升,30 K; α_1 为壳体的线胀系数; α_2 为基础的线胀系数; L 为需补偿热胀冷缩变形壳体的长度。

表3 常见材料的线胀系数

壳体材料	线胀系数 $\alpha \times 10^{-6} (1/K)$
碳钢	11.7
不锈钢	17.3
铝合金	23.9
聚四氟乙烯	103
混凝土	11.7

伸缩节数量 = $K(\text{安全系数}) \times \Delta L_1 / (\text{壳体轴向的变化量}) / \Delta L_b (\text{伸缩节运行变形量})$

常用的伸缩节种类见图4。



普通型伸缩节

压力平衡型伸缩节

自平衡型伸缩节

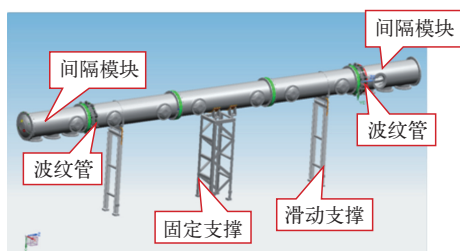
横向补偿型伸缩节

图4 伸缩节典型结构

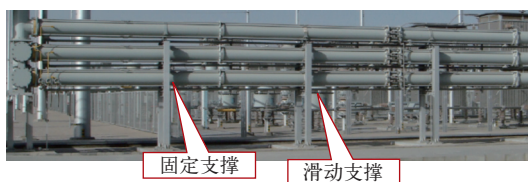
普通型伸缩节、压力平衡型伸缩节、自平衡型伸缩节仅可补偿轴向和径向二个方向的伸缩量。但横向补偿型伸缩节可以补偿三个方向的伸缩量,轴向的调整量一般为 $\pm 15 \text{ mm}$,径向则可以吸收与伸缩节轴线夹角 3° 以内的伸缩量。一般

横向补偿型伸缩节与母线壳体轴向呈垂直布置。550 kV GIS常采用横向补偿型伸缩节进行布置,不同的电压等级,合理地选用和设置伸缩节大大地提高产品可靠性,从实际运行角度出发,现以126~363 kV GIS长距离母线筒为例简介。

由于363 kV以下电压等级产品,壳体直径相对小, SF_6 气体在设备盲端产生的盲板力较小;另外一方面由于设备的尺寸相对较小,母线长度相对较短,热胀冷缩的变形量小,部分应力可通过设备的形变有效消除,采用普通型伸缩节即可,但母线的支撑强度必须满足力的作用,常用的支撑分固定支撑和滑动支撑。只有综合考虑母线支撑与伸缩节的设置,才使伸缩节起到热胀冷缩的补偿作用,典型的支撑布置如图5。



(a) 普通伸缩节支撑结构



(b) 普通伸缩节拉杆支撑结构

图5 典型母线支撑

波纹管设置后,根据其调节量设计触头和导电杆的配合间隙,使其被压缩或被拉伸的时候,才能保证中间导体的正常通流能力。

3. 可拆卸单元的设计

GIS设备的母线一般由几十米到几百米,每节壳体都是直接相连,设计时常设置可拆卸结构解决母线故障的检修。不同的产品采用的可拆的方式不同。对于363 kV以下电压等级产品,由于母线多为三相共箱式结构,产品布置紧凑,可在每间隔设计可拆卸导体,通过母线壳体手孔实现导体的可拆。对于550 kV以上电压等级产品,母线为三相分箱式结构,且与其他的元件布置相对独立,常常每隔一段距离设置一个可拆卸单元来预防母线的故障见图6。

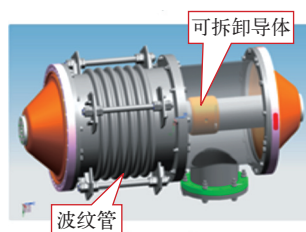


图6 可拆卸单元

4. 预留接口与扩建接口的设计

GIS设备尤其是高电压等级的,由于一次性投资大,多采用分期投资建设的方式,因此项目存在一次或多次扩建的现象。

若设计时因预留接口与扩建接口考虑不周或验证不充分,将出现扩建难度大,停电时间长、范围广等现象。保证设备可靠性的前提下,避免上述现象的出现,预留接口一般设计成独立气室,并设置 SF_6 监测装置、压力释放装置。压力释放装置的爆破压力根据接口气室的工作气压和壳体强度设计。对于没设压力释放装置的预留接口,应根据内部故障电弧引起的压力升高,设计经济、可靠容积的壳体。

扩建接口设计时采用可拆卸断口。内部导体为可拆卸导体;壳体配合伸缩节形成一定的操作空间去安装或拆卸导体、触头。保证扩建间隔设备能单独试验,试验后能可靠地与前期设备进行连接。对于连接后接口处的试验,由于涉及已运行的GIS设备,建议按不拆卸运输单元的简化方法进行,即在工厂试验过的接口单元不拆卸运输或拆卸仅限于简单的连接,根据制造厂和用户之间的协议,现场可以降低到:对于中性点接地系统,交流电压试验的电压为 $1.1U_L/\sqrt{3}$;对于中性点绝缘或谐振接地系统为 $1.9U_L/\sqrt{3}$;电压施加时间为10 min。

通常,在扩建的情况下,除非采取了特别措施防止扩建部分的破坏性放电影响已有GIS的带电部件,GIS相邻的已有部分在绝缘试验期间应停电并接地。

结束语

GIS母线是GIS的主要元件之一。本文前部分简述了母线设计过程的主要部分可选的方案,再根据产品的技术参数开发出可靠、经济的结构;后部分结合设计经验介绍了工程的具体应用考虑的几个重点,为设计人员在母线设计时提供参考。EA

(收稿日期:2017.04.24)

(编辑:白文亭)