

[开关设备]

GIS母线工程设计及应用

文/西安西电开关电气有限公司 南方 王全海 闫 练

母线是组成金属绝缘气体封闭开关设备（以下简称GIS）的重要部件之一，高电压等级、大规模电站中GIS设备母线长度达到几百米甚至上千米，在工程设计中必须对母线的布置结构、支撑结构和变形调整等各方面进行综合考虑，才能保证GIS设备长期运行的可靠性。总结分析了GIS母线工程设计中需要关注的问题，并结合母线工程应用实例介绍了几种典型母线的布置结构。

GIS母线是GIS中各种组件之间的电气连接设备，在工程设计中应做到布局合理、运行可靠和安装检修方便，并充分考虑母线设计的正确性、可靠性和经济性。设计中应根据工程的接线方式和电站布局确定母线的整体布置形式，根据温差变形和安装需要合理选择波纹管，综合考虑环境因素和设备布局确定母线支架的设计形式，在具体设计中关注导体长度、转角结构、气室分隔和外壳接地等设计要点，保证工程设计质量。

随着近年来电网建设的快速发展，变电站规模越来越大，变电站中GIS设备用母线越来越长，母线的结构也越来越复杂。图1所示为一种双层、大跨度且长距离的复杂母线工程设计实例，母线纵横交错且横跨多条道路，设计中需要充分考虑长母线温差变形的补偿，特殊设计多种形式的母线支架。

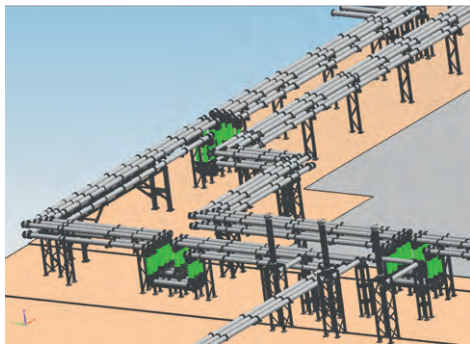


图1 GIS母线工程设计实例

某些工程项目如果结构不合理，设计时对电气性能和力学性能考虑不周全，以及现场安装工艺控制不良等因素会严重影响母线设备运行可靠性。在已经运行的变电站中因外壳接地不可靠、导体长度设计不合理和热胀冷缩考虑不充分等原因出现过漏气、异常温升、支撑开裂甚至内导烧熔等重大事故。因此需要对GIS母线的工程设计进行全面深入的研究，从设计源头确保工程质量。

基本结构

GIS设备母线有三相分箱和三相共箱两种形式。三相分箱式母线的各导电部分用绝缘子支撑置于接地的金属壳体中心，这种母线结构简单，相间电动力小，可避免两相或三相故障，主要涉及GIS设备用三相分箱形式母线的工程设计。母线按用途还可分为主母线和分支母线，如图2所示。主母线用于GIS本体设备之间的电气连接，分支母线用于与GIS以外设备的电气连接，根据设备主接线要求进行设置。

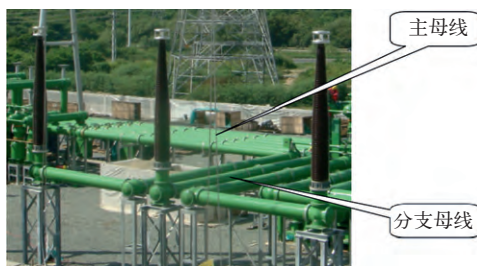


图2 三相分箱式母线

母线主要由外壳、内导和绝缘支撑三大类零件组成,以及直筒母线、转角接头和波纹管三种类型母线部件,直筒母线根据绝缘支撑方式不同有盆子支撑和绝缘台支撑两种主要结构,如图3所示。转角接头分为直角三通转角和可变换角度的斜转角两种典型结构,如图4所示。伸缩节按功能分为装配调整用和温度补偿用,将在伸缩节设置中详细介绍。

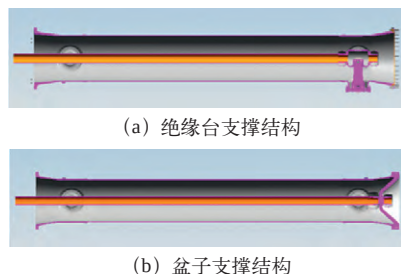


图3 直筒母线典型结构

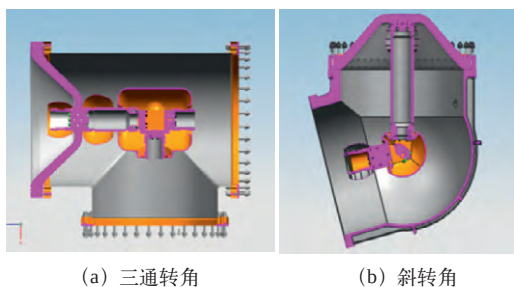


图4 转角接头典型结构

整体布局

合理的布局是母线设计的前提,电站布局、接线方式和设备接口是母线布置必须满足的条件。常见的布置形式可分为集中布置和分散布置,低布置和高布置,单层布置和双层布置,如图5所示。这几种布置形式各有优缺点,需根据工程实际进行选择。



图5 几种典型的GIS母线布置

伸缩节设置

伸缩节是在轴向可以适当伸缩变形,径向允许有限位移的一种连接壳体,在GIS用母线中用于补偿GIS零部件的误差积累、装配以及基础等原因造成的尺寸偏差,补偿不同基础大板之间由于基础沉降而造成GIS壳体的位移,补偿GIS壳体由于热胀冷缩造成的GIS壳体位移。在GIS中应用的最多是波纹管伸缩节,也有一些利用压缩弹簧与滑动密封组合的伸缩节。

GIS壳体充有一定压力的 SF_6 气体,在壳体的盲端会产生向外的推力,这个推力称为盲板力。工程中伸缩节所受盲板力为

$$F_p = p \times \frac{\pi}{4} \times D_m^2$$

式中, p 为气体压力; D_m 为波纹管平均直径。

在伸缩节设计和选用时必须充分考虑盲板力的作用。

1. 伸缩节种类

伸缩节按功能分为装配调整用伸缩节和温度补偿用伸缩节,温度补偿伸缩节有压力平衡型、自平衡型和偏角补偿型。以下是几种常用伸缩节的典型结构和使用特点。

(1) 普通型伸缩节

普通型伸缩节的外形如图6所示。普通型伸缩节主要通过波纹管的柔性变形,补偿GIS壳体在装配过程产生的轴向尺寸偏差,和有限的横向偏差。这种类型的波纹管可以在短时间内具有较大的压缩量,可以作为GIS设备检修时的解体单元。另外,在与变压器等设备连接时可以起到隔离振动的作用。

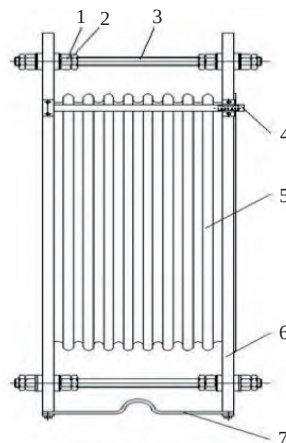


图6 普通型伸缩节

1—螺母 2—薄螺母 3—拉杆 4—刻度尺
5—波纹管 6—法兰 7—短接线

普通型伸缩节安装时通过放松锁紧螺母根据需调整轴向尺寸, 为保证产品运行时的可靠性, 尺寸的调整必须在波纹管的许用范围内。完成后GIS充气前必须锁紧外侧锁紧螺母, 依靠拉杆限制轴向尺寸, 防止充气后盲板力造成母线位移变形。

(2) 压力平衡型伸缩节

压力平衡型伸缩节如图7所示, 拉杆位置增加了碟簧用于抵消设备充气后产生的盲板力, 安装完成后将锁紧螺母调节到适当位置, 这样在设备运行中波纹管的变形可以吸收母线的热胀冷缩变形。

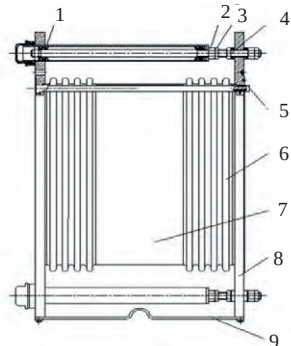


图7 压力平衡型伸缩节
1—碟簧 2—螺母 3—薄螺母 4—拉杆 5—刻度尺
6—波纹管 7—法兰 8—短接线

压力平衡型伸缩节主要用于补偿GIS壳体受到环境温度变化、内导温升等因素的影响引起的热胀冷缩变形。也可以补偿壳体在装配过程轴向产生的尺寸偏差和横向产生的有限偏差; 还可以作为GIS设备检修时的解体单元; 可以用于隔离振动的传递。

压力平衡型伸缩节变形时需要同时克服弹簧压力, 因此其整体刚度比普通型波纹管大很多, 使用此类波纹管时必须充分考虑母线热胀冷缩变形时作用在支架及基础上的应力。

(3) 自平衡型波纹管

自平衡型波纹管如图8所示, 这种波纹管由三段直径不同的波纹管组成, 位于两端的称为工作波纹管, 中间的称为平衡波纹管。

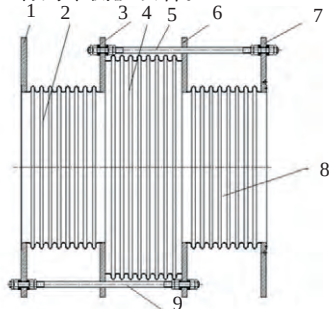


图8 自平衡型伸缩节
1—法兰A 2—波纹管A 3—法兰B 4—波纹管B 5—拉杆A
6—法兰C 7—法兰D 8—波纹管C 9—拉杆B

自平衡型波纹管是依靠自身的设计结构达到平衡盲板力的目的。其原理是法兰A受到的盲板力与法兰C相平衡, 在拉杆B的固定下, 不能相对移动; 法兰B受到的盲板力与法兰D相平衡, 在拉杆A的固定下, 不能相对移动。从而实现伸缩节自身盲板力的平衡。

自平衡型波纹管由于没有外加受力元件, 波纹管自身刚度较小, 对支架和基础的强度要求低。但是这种波纹管体积和自重较大, 波纹管中间的两个法兰靠拉杆支撑, 由于波纹管的横向刚度很小, 两个法兰的重量会使波纹管下沉产生变形, 影响GIS设备绝缘性能。

(4) 偏角补偿型伸缩节

偏角补偿型伸缩节如图9所示, 由两个波纹管和一段母线组成, 一圈拉杆将整个伸缩节连为一体, 用于平衡波纹管所受盲板力。

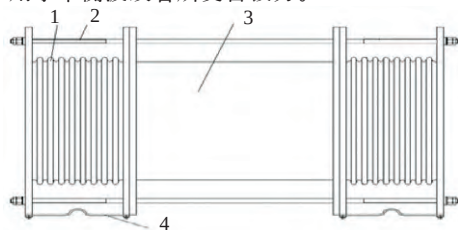


图9 转角补偿型伸缩节
1—波纹管 2—拉杆 3—壳体 4—短接线

偏角补偿型伸缩节利用波纹管允许径向有限位移的特性, 补偿与伸缩节夹角 90° 母线的装配误差和热胀冷缩。这种伸缩节补偿量由径向偏角允许量和伸缩节长度决定, 增加中间壳体的长度可以得到较大的补偿量。由于波纹管所受盲板力与伸缩节工作方向垂直, 因此可以不考虑盲板力对这种伸缩节热胀冷缩补偿性能的影响。

在工程中常利用这种伸缩节组成U形结构进行长母线的补偿, 如图10所示。由于偏角补偿型伸缩节单只补偿量大、运行时作用在支架和基础上的应力小、结构简单可靠, 因此在布置空间允许的情况下通常推荐使用这种类型的伸缩节。



图10 U形补偿单元

2. 伸缩节选用

工程设计中需要对各种伸缩节的性能特点充分了解、正确选用,根据环境温度、母线长度和伸缩节调整量合理确定温度补偿伸缩节的数量和设置位置,在确保可靠的前提下兼顾经济性。

(1) GIS中的伸缩节设置应注意的因素

- 1) 安装时因尺寸误差积累需要的补偿量。
- 2) 检修时需要的解体面。
- 3) 基础的分割缝,不同基础的沉降。
- 4) 与变压器油气套管的连接面。
- 5) 由于温度变化引起的热胀冷缩变形量。

(2) 温度补偿型伸缩节数量的计算

热胀冷缩引起的伸缩量计算公式如下。

$$\Delta L = L \alpha \Delta T$$

式中, L 为热胀冷缩体长度; ΔT 为热胀冷缩温差; α 为线胀系数。

常见材料的线胀系数如表1所示。

表1 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

温差计算需要考虑包括设备运行周围空气温度、安装时周围空气温度、设备运行温升和太阳辐射引起的温升,计算方法如下。

$$\Delta T = T_1 - T_2 + T_t + T_s$$

式中, T_1 为设备运行环境温度(常用值 $-30 \sim 40^\circ\text{C}$); T_2 为设备安装环境温度(常用值 $-5 \sim 30^\circ\text{C}$); T_t 为设备温升(母线通过运行电流时壳体的温升,标准要求不得高于 30K); T_s 为太阳辐射引起的设备温升(10K)。

极限正温差为

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_1 (\text{最高运行环温}) - T_2 (\text{最低安装温度}) \\ &\quad + T_t (\text{最高温升}) + T_s \\ &= 40^\circ\text{C} - (-5^\circ\text{C}) + 30\text{K} + 10\text{K} = 85\text{K} \end{aligned}$$

极限负温差为

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_1 (\text{最低运行环温}) - T_2 (\text{最高安装温度}) \\ &\quad + T_t (\text{最低温升}) \\ &= -30^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C} + 0\text{K} = -60\text{K} \end{aligned}$$

工程设计时取最高极限温差,通常为极限正温差。

工程中母线需要用伸缩节补偿的热胀冷缩极限伸缩量按如下公式计算。

$$\Delta L (\text{补偿伸缩量}) = \Delta L_m (\text{母线伸缩量}) - \Delta L_c (\text{基础伸缩量})$$

$$\Delta L_m (\text{母线伸缩量}) = \Delta T (\text{极限温差}) \alpha (\text{外壳膨胀系数}) L (\text{母线长度})$$

$$\Delta L_c (\text{基础伸缩量}) = \Delta L_c (\text{基础极限温差}) \alpha_c (\text{基础膨胀系数}) L (\text{基础长度})$$

$$\Delta T_c (\text{基础极限温差}) = T_1 (\text{极限环温}) - T_2 (\text{极限安装温度})$$

温度补偿伸缩节数量计算如下。

$$\text{伸缩节数量} = K (\text{安全系数}) \Delta L (\text{补偿伸缩量}) / \Delta L_b (\text{伸缩节运行变形量})$$

根据上面的计算结果得到的是理论需要的伸缩节数量,工程中还要根据GIS母线的整体结构和土建基础沉降等影响因素最终确定伸缩节的实际用量和布置位置。

母线支撑的设置

GIS母线支撑的设计需要考虑承受母线运行时所有可能的工作荷载,包括设备的荷载、地震作用力、风荷载和短路电流作用力等。其中设备荷载包括自重、内压作用和温差作用产生的应力,属于持续荷载;地震、风和短路电流荷载属于偶然荷载,考虑到偶然荷载与持续荷载重叠时大于极限持续荷载的可能性极小,因此在工程设计中对支撑强度的校核计算一般只考虑极限持续荷载。

母线支撑的设计与伸缩节的设置需要综合考虑,为使伸缩节发挥热胀冷缩的补偿作用,需要同时使用滑动和固定两种母线支撑,典型的支撑布置形式如图11所示。

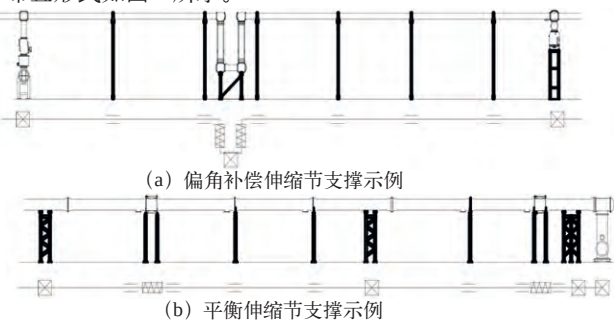


图11 典型母线支撑布置

■ ——主固定支架 ———— 滑动支架 ■ ——温补伸缩节

工程设计中应遵循以下原则。

- 1) 每个温度补偿伸缩节两侧补偿范围内必须有且只有一组母线固定支架,用于限制母线段的热

(下转第72页)

4) 安装试验以及预防性试验时,按照部颁标准进行直流耐压试验可能对电缆局部造成损伤。

直流耐压试验对发现纸绝缘电缆缺陷十分有效,但对交联聚乙烯绝缘电缆则未必有效,而且还可能产生负作用,主要表现在以下几个方面。

1) 在直流电压作用下,其绝缘层中的电场强度是按绝缘强度正比例分布,但交联聚乙烯电缆绝缘层有一定的杂质,如甲烷、乙醇等,将导致电缆绝缘层中的电场分布不均匀,不能有效检测出绝缘的薄弱点。

2) 交联聚乙烯绝缘电缆的一个致命弱点是绝缘内容易产生水树枝,一旦产生水树枝,在直流电压下,会迅速转变为电树枝,并形成放电,加速了绝缘劣化,以至于在运行工频电压作用下形成击穿。

3) 现场进行直流高压试验时,发生闪络或击穿可能会对其他正常的电缆和接头的绝缘造成危害。

4) 直流高压试验有累积效应,将加速绝缘老化。交联聚乙烯绝缘电缆在直流电压下会积累单极性电荷,一旦有了由于直流耐压试验引起的单极性空间电荷,需要很长时间才能将这种电荷释放,电缆如果在直流残余电荷未完全释放之前投运,直流电压便会叠加在工频电压峰值上,使得电缆上的电压值远远超过其额定电压,它将加速绝缘老化缩短使用寿命,严重的会发生绝缘击

穿,而我公司对这些中压交联电缆每年都进行预防性试验,这也是电缆故障原因之一。

图2是对运行5年以上电缆检查时发现的現象,综合事故现场的情况,可以确定,造成两次电缆事故的直接原因就是电缆头制作存在问题,间接原因就是直流耐压试验。



图2 电缆检查实物图

结束语

通过对两次事故分析,消弧线圈其实并不能完全补偿单相弧光接地电流,不可避免地会发生电缆起火事故;特别值得注意的是电缆头的制作一定要规范,提高施工质量;同时建议对交联绝缘电缆预防性试验直流耐压试验周期适当延长。EA

(收稿日期:2015.04.07)

(编辑:刘群立)

(上接第69页)

胀冷缩在伸缩节补偿范围内。

2) 固定支撑强度要满足温度补偿伸缩节变形需要。必须能够提供在极限条件下母线壳体热胀冷缩使温度补偿伸缩节变形时所需的支撑反力。

3) 母线端部固定支撑需要提高强度。这是由于盲板力的作用,母线端部固定支撑需要承受更大的载荷。

4) 滑动支撑的允许滑动距离需要与温度补偿伸缩节变形量相匹配。压力平衡型伸缩节与偏角补偿型伸缩节的补偿变形量由较大的差异,设计时需注意。

结束语

GIS产品工程设计中母线的设计一般都是内容

最多、工作量最大的部分,母线工程设计质量的优劣决定了整个GIS产品的设计质量。GIS母线工程设计中需要充分考虑工程的整体布局和环境条件,结合母线设备中外壳、内导、伸缩节和支撑等零部件的结构特点,确定包含GIS母线整体布局、波纹管设置数量和位置、支架的布置等内容的工程设计方案。方案的制订需要综合考虑设备的电气和机械可靠性,而机械可靠性是保证电气可靠性的基础。

随着GIS产品技术的日臻完善,需要在工程设计中认真总结、深入研究,不断提升工程设计质量。EA

(收稿日期:2014.11.06)

(编辑:刘群立)