

# 气体绝缘输电线路的结构特点及安装方式的探讨

陈琳<sup>1</sup>, 雷鸣<sup>2</sup>, 汤鑫<sup>2</sup>

(1. 宝鸡供电局, 宝鸡 723004; 2. 上海华东电器集团电气有限公司, 上海 201506)

**摘要:** 气体绝缘输电线路由于很长,设计时一般分为多个充气单元,每个直线充气单元有多个制造单元组成并且一般均应有伸缩节。单个直线充气单元的安装方式应该是只有一点固定,其他点活动,以保证其在正常运行期间只能沿轴向移动而不因受力而发生径向位移,以及如何正确设计固定支点的位置和计算支架的强度。

**关键词:** GIL; 结构特点; 设计的基本原则; 安装设计要求及支架强度

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2013)05-0120-04

## Discussion on the Structural Features and Installation Method of the Gas-insulated Transmission Lines

CHEN Lin<sup>1</sup>, LEI Ming<sup>2</sup>, TANG Xin<sup>2</sup>

(1. Baoji Power Supply Bureau, Baoji 723004, China;

2. Shanghai Huadong Electrical Group Electric Co.,Ltd., Shanghai 201506, China)

**Abstract:** Because the gas-insulated transmission line(GIL) is very long so the design is generally divided into a plurality of inflatable units. Each line inflatable unit is composed of a plurality of manufacturing units and generally contains an telescopic joint. In order to ensure the line inflatable unit only to move along the axial direction and not move radially during the normal operation, the installation modes of each line inflatable unit should be one point fixed and other points can move freely. And how to properly design the position of fixed fulcrum and to calculate the intensity of support bracket is also discussed in this paper.

**Key words:** GIL; structural feature; basic design principle; installation requirement and intensity of support bracket

### 0 引言

根据近几年来,在开发设计 550 kV 干净空气绝缘和 SF<sub>6</sub> 气体绝缘输电线路过程中发现的一些问题和体会,以及了解到目前中国在 GIL 工程设计中安装支架的设计所出现的一些问题,谈谈个人的一些看法,供同行们、工程设计者及用户参考和探讨。

### 1 气体绝缘输电线路(GIL)的结构特点及设计原则

气体绝缘输电线路最主要的一个特点就是很长,一般都有几百米,甚至几千米或更长。因此在结构上有下列特点。

#### 1.1 基本组成部分

为了制造运输和安装方便,GIL 一般都做成基本制造单元,现场组装或焊接成充气单元、还有可拆单元(包括伸缩节)、套管单元、连接单元(与 GIS、电缆、变压器连接)及弯头等,直线充气单元的长度一般在 50~120 m(一般按波纹管可伸缩的长度来确定)。

#### 1.2 制造单元的连接

直线充气单元由于较长,一般由若干个制造单元组成,为了现场装配连接方便,导电杆一般采用插接方式(可用梅花触头、弹簧触头、表带式触头或自力型触头等),壳体一般采用焊接或法兰连接方式,为了保证密封、减少漏气点,就必须尽量减少密封面,故在水平安装时多采用现场焊接的方式;垂直安装时多采用法兰连接的方式。

#### 1.3 标准制造单元的长度

根据壳体和导电铝管原材料的供应,一般最长

在 10 m 左右, 太长将会增加成本, 同时也会给两端法兰加工和运输增加难度。国际标准集装箱最长为 12 m, 因此标准直线段长度一般不应超过 12 m, 美国 AZZ 公司<sup>[1]</sup>最长生产到 18 m。

#### 1.4 导电杆的安装和固定

标准直线段导电杆与壳体之间的支撑连接, 一般采用两角或三角支撑绝缘子 (也可采用盆式绝缘子)。由于标准直线段长 10 m 左右, 根据温升标准, 内部导电杆的最高温升为 65 K, 壳体的最高温升为 30 K, 因此, 壳体与内部导电杆的温差一般不会超过 40 K (温升试验实测值也说明了这一点, 一般只有 30 K; 若在冬季户外可能会大一些), 因此, 壳体与导电杆的相对长度, 将会因通电发热和户外温度变化而发生变化, 其变化量  $\Delta L$  为

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T \quad (1)$$

式(1)中:  $\alpha$  为镁铝合金的线胀系数,  $\alpha = 0.235 \times 10^{-4} \sim 0.238 \times 10^{-4}$  m/K;  $L$  为标准直线段长度, 一般  $L = 10$  m;  $\Delta T$  为壳体与内部导体的最大温差 40 K。

由此可知壳体与内部导体之间相对长度的变化量为

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T = 0.235 \times 10^{-4} \times 10 \times 40 = 0.0094 \text{ m} = 9.4 \text{ mm}$$

因此, 在导电杆插头之间必须留出不小于 10 mm 的间隙。

由上述可知, 在设计导电杆与壳体之间的结构设计时必须保证有一点相对固定, 其余支点为滑动, 这是 GIL 产品设计中的一个重要原则。由于现场安装后一个直线充气单元由多个制造单元组成, 若每个制造单元的导电杆与壳体之间没有固定点, 而相对移动就可能发生导电杆插头脱节或接触不良 (在产品开发设计和试验中, 曾发生过此问题)。

至于导电杆与壳体的固定方式, 根据结构设计可以多种多样。可以通过中间支撑绝缘子固定, 也可以在其中一端固定或用盆式绝缘子固定, 其余支撑应该是活动的。对于活动支点的设计, 可以是绝缘支撑与导电杆之间固定而相对壳体活动, 也可以是绝缘支撑与壳体固定而相对导电杆活动, 这可根据不同的结构设计而定。

#### 1.5 导电杆插接头与壳体同轴度的设计

由于标准制造单元导电杆现场安装时, 一般采用插接方式, 这就要求导电杆插接头与壳体具有较高的同轴度要求, 盆式绝缘子的安装一般采用法兰连接, 中心导电杆与法兰的同轴度靠模具保证, 比较容易达到。而三角支撑绝缘子与壳体在安装时, 由于壳体内径与三角支撑都有制造误差, 所以要完全靠制造精度来保证插头与壳体的同轴度要求是

比较困难的。因此, 三角支撑和壳体的连接处应设计成可调的, 在装配时通过专用工装调节三角支撑与壳体之间的相对位置, 来保证插接头与壳体之间的同轴度。

#### 1.6 伸缩节的设计

由于 GIL 的直线充气单元一般都在 50~120 m, 壳体在夏季太阳直射下, 满负荷运行时, 标准规定壳体的最高温度允许达到 70 °C, 而在冬季寒冷地区停运时, 壳体温度会降至 -40~-30 °C, 因此壳体相对于环温 20 °C 的温差可达到  $\pm(40 \sim 50)$  K, 所以每个充气单元的壳体 (50~120 m) 相对于环温 (20 °C) 的变化量可能达到  $\pm(60 \sim 140)$  mm, 因此, 直线充气单元的长度应根据伸缩节 (波纹管) 设计制造时所能达到的伸缩长度来决定。

#### 1.7 可拆卸节的设计

由于 GIL 在安装时导电杆一般采用插接的方式连接, 一旦安装完成再想从中间拆开是比较困难的, 所以为了检修方便, 在充气单元间一般应设计可拆卸节, 在运行中不论哪一个充气单元出现问题均可停电拆开检修, 这就大大方便了用户。

## 2 GIL 的安装设计

### 2.1 GIL 与支撑架的固定

GIL 的直线充气单元比较长, 冬夏壳体长度相对环温的变化量在  $\pm(60 \sim 140)$  mm, 所以每个直线充气单元只能有一点与支撑架固定, 其余均应为活动支点。由于直线充气单元是由标准制造单元组成, 可能为法兰连接 (也可能为焊接), 但至少直线充气单元之间为法兰连接。且内部有通数千安培的导电杆, 并有多处活动连接; 还有支撑的绝缘件。因此, GIL 的安装设计, 应保证其只能轴向移动不得径向位移, 以免内部绝缘件损坏, 导电接触不良, 法兰连接处因受力不均而漏气。这应该作为 GIL 与支架连接设计中的一个重要原则! GIL 的热胀冷缩主要靠每个直线充气单元的伸缩节来吸收。不能像一般的热力管道和输气管道靠外壳的柔性变形来吸收<sup>[2]</sup>。根据这个原则, GIL 在弯角处应设计为固定支点 (不能把弯角垂直母线筒作为末端的固定支点, 而必须另设固定支点), 以保证在两个方向的直线单元都沿轴向滑动而不能径向移动。否则, 由于盲板推力<sup>[3]</sup> (即在压力管道中由于内压在管道横截面上所产生的作用力, 即法兰面上所受内压的作用力) 以及热胀冷缩的存在而造成 GIL 径向移动, 进而使法兰连接处因受力不均而变形, 导致漏气, 甚至内部零件损坏或导电接触不良。

曾经看到有关变电站 750 kV GIS 母线筒漏气原因分析的报道,见图 1<sup>[4]</sup>,固定支架和母线弯角处垂直段(相当于固定支架)发生倾斜而造成法兰处漏气。笔者认为,其主要原因有两个,第 1 是固定支点设计的位置不正确,在弯角处没有设计固定点,将垂直母线作为固定支撑点是不妥当的,因为盲板推力经计算将达到 20 多 t (这是造成垂直母线倾斜的主要原因),一直作用在垂直段母线的顶端(暂不考虑热胀冷缩等其他受力情况),弯角处又没有设计固定支点,一旦水平段伸缩节保险螺栓松开,必将会造成垂直母线倾斜,即产生径向位移,使法兰处受力不均而漏气。因此,弯角处应设计固定支点。第 2 是固定支架设计的抗弯强度不够,至少应满足盲板推力的作用(20 多 t),所以仅靠垂直支架是不够的,固定支架应设计成抗弯强度较大的三角支架。

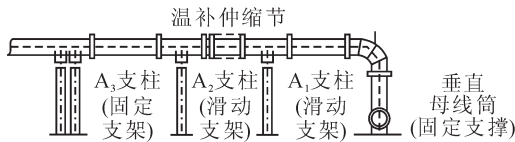


图 1 母线筒布置方案图

Fig. 1 Busbar tube layout scheme figure

### 2.2 固定支架(或固定点)强度的设计

由于 GIL 很长,每一个直线充气单元的外壳只能设计一个固定支架,其余为活动支架。考虑到将来运行时,某一充气单元可能会因为检修等原因而放出气体,但相邻充气单元气压仍在,这样一旦一边失去压力,相邻充气单元的固定支架将受到轴向盲板推力的作用(因为每个充气单元有一个波纹管伸缩节)。而在弯角处,即在正常运行的情况下都要受到两个不同轴向的盲板推力。因为,在水平安装时,一般弯角两侧均有波纹管伸缩节(特殊情况可能一侧有),在伸缩节保险螺栓未松开前,作用在弯角上的盲板推力由壳体和保险螺栓来承受,一旦保险螺栓松开,盲板推力将会使弯角管沿轴向发生位移。因此,弯角处要设计固定支架,并能承受两个轴向的盲板推力。同时,还应考虑地震所产生的力、电动力、风力、热胀冷缩和其他外来力的作用,因此,固定支架的受力为

$$F = 1.02kP_s \cdot S \times 10^{-4} \quad (2)$$

式(2)中: $F$ 为盲板推力,t; $k$ 为安全系数,同时,考虑到地震加速度所产生的力、电动力、风力、热胀冷缩和其他外来力的作用等, $k$ 可取 1.2; $P_s$ 为设计压力(表压),MPa; $S$ 为法兰密封圈中径内的面积, $\text{mm}^2$ 。

$\text{SF}_6$  GIL 额定压力(表压)为 0.5 MPa 时,设计温度最高为 80  $^{\circ}\text{C}$ 时,则设计压力  $P_s=0.6$  MPa。

例 1:750 kV 的 GIL 或 GIS 母线筒的内径一般

为  $\phi 614\sim\phi 668$  mm,AZZ 公司为  $\phi 636$  mm<sup>[1]</sup>,而密封圈的中径  $d_2 \approx 660$  mm,则

$$S = \pi d_2^2 / 4 = 314.946 \text{ mm}^2$$

盲板推力为  $F = 1.02 P_s \cdot S \times 10^{-4} \approx 21 \text{ t}$

考虑其他力的作用为  $F = 1.02 k P_s \cdot S \times 10^{-4} \approx 25.2 \text{ t}$

例 2:550 kV  $\text{SF}_6$  GIL 或 GIS 母线筒内径为  $\phi 492$  mm,密封圈的中径约为  $\phi 540$  mm,则

$$S = \pi d_2^2 / 4 = 228.906 \text{ mm}^2$$

盲板推力: $F = 1.02 P_s \cdot S \times 10^{-4} \approx 14 \text{ t}$

考虑其他力的作用为  $F = 1.02 k P_s \cdot S \times 10^{-4} \approx 16.8 \text{ t}$

例 3:550 kV 净化空气绝缘 GIL 的设计压力为 1.6 MPa,此时

盲板推力: $F = 1.02 P_s \cdot S \times 10^{-4} \approx 37.4 \text{ t}$

考虑其他力的作用: $F = 1.02 k P_s \cdot S \times 10^{-4} \approx 44.9 \text{ t}$

### 3 目前工程设计中有关问题的讨论

笔者从有关资料了解到 GIL 在竖井的安装方式中,有些在底部的弯角处采用弹性支撑(见图 2)以满足垂直段热胀冷缩的要求<sup>[5]</sup>,此种安装方式,从 GIL 产品设计的角度来说有些不妥之处,需要认真讨论和斟酌。这种安装方式,由于垂直段的热胀冷缩,将造成水平段径向较大的位移。就按中国西部 800 kV 水电站竖井出线高度 207 m 计,因热胀冷缩引起的水平段的径向位移将达到 200 mm,从 GIL 产品设计的角度来讲这是不允许的。因为水平段径向 200 mm 的位移将会引发下列问题:①造成壳体法兰连接处的受力不均,出现漏气现象;②即使在弯角处水平段安装有波纹管伸缩节,对波纹管的设计来说,一般也允许轴向伸缩(伸缩量由原设计确定,也是有一定限度的),径向仅允许少许位移,不允许过度的位移;③内部导电杆的插接,尤其在伸缩节部位也只允许轴向移动,不允许径向的过度位移,这会造成导电杆活动连接处受力不均而导致接触不良,甚至损毁。同时也会造成导电杆与盆式绝缘子连接处,因产生较大径向应力而破坏。因此这种安装设计方式需要认真的讨论和斟酌。

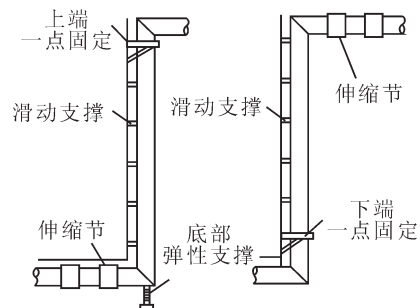


图 2 弹性支撑

Fig. 2 Elastic support

GIL在竖井安装方式上, 同样应遵循基本的安装原则, 即应在上下弯角处设置固定点, 以保证 GIL 的每一段都只能轴向移动而不得径向移动。垂直段过长时(如几百米)应设计多个充气单元, 每个充气单元的外壳也只能有一个固定点, 多个活动支点和一个伸缩节, 以保证热胀冷缩和安全运行。

#### 4 结论

根据 GIL 很长的特点, 在 GIL 产品的结构设计和安装设计上应遵循下列几个原则:

1)GIL 应设计为多个充气单元, 每个充气单元应有一个伸缩节和可拆卸节, 每个充气单元的外壳只能有一个固定支点和多个活动支点;

2)GIL 的热胀冷缩只能靠伸缩节来吸收, 不能像一般的热力管道和输气管道靠外壳的柔性变形来吸收;

3)固定支点和活动支点的设计, 应保证 GIL 在热胀冷缩或受到外力作用(如地震、风力、电动力等)时, 只能轴向移动不得径向移动, 因此在弯角处应设置固定支点;

4)固定支点强度的设计应按盲板推力来计算, 同时还应考虑到地震时的作用力、热胀冷缩、风力、电动力的作用, 垂直安装时还应考虑其本身自重等;

5)每个充气单元由多个制造单元组成, 导电杆的连接一般应采用插接, 并留有间隙; 每个制造单元的导电杆与壳体应保证一点固定, 其余活动;

6)导电杆两端的插头与壳体法兰的同心度最好设计为可调结构。

#### 参考文献:

- [1] 美国 AZZ 公司. CGIT 设备与应用(气体绝缘金属封闭输电线路 GIL)[Z]. 美国: 美国 AZZ 公司, 2002.  
America AZZ Company. Equipment and application of CGIT (Installation instructions of gas insulated metal enclosed transmission line) [Z]. America: America AZZ Company, 2002.
- [2] 宋岢岢. 压力管道设计及工程实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.  
SONG Ke-ke. Pressure pipeline design and engineering examples[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [3] 岳进才. 压力管道技术(第二版)[M]. 北京: 中国石化出版社, 2005.  
YUE Jin-cai. Pressure pipeline technology (The second edition)[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2005.
- [4] 李海波, 万荣光, 方勇. 兰州东变电站 750 kV GIS 母线筒缺陷原因分析[J]. 高压电器, 2010, (46)11: 12-15.  
LI Hai-bo, WAN Rong-guang, FANG Yong. Defect analysis of the 750 kV GIS busbar tube of the Lanzhoudong substation[J]. High Voltage Apparatus, 2010, (46)11: 12-15.
- [5] 阮全荣, 谢小平. 气体绝缘金属封闭输电线路工程设计研究与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.  
RUAN Quan-rong, XIE Xiao-ping. Research and practice in the design of gas insulated metal enclosed transmission line engineering[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2011.

陈琳(1984—), 女, 助理工程师, 主要从事电力系统自动化及线路设计等。

雷鸣(1941—), 男, 高级工程师, 主要从事高压开关产品研发、标准化工作及技术管理工作。

#### 简讯

### 能源发展“十二五”之电网: 不断升级完善

《能源“十二五”规划》(以下简称《规划》)对我国电网建设作出了完善、升级的部署。

《规划》延续“十一五”时期投资额不断加大、建设速度和规模稳步推进的态势, 持续推进新一轮农村电网改造升级, 特高压和智能电网继续占据重要位置。在“十二五”愿景中, 一张具有高度信息化、自动化、互动化水平的电网正在我国版图上徐徐铺开。

《规划》提出, 到 2015 年, 建成 330 kV 及以上输电线路 20 万 km, 跨省区输电容量达 2 亿 kW。

“加快电力发展, 归根到底是要保障国家能源安全, 满足经济发展和人民不断增长的电力需求, 这是电网建设发展的出发点和落脚点。”国家发改委能源研究所能源经济与发展研究中心主任高世宪指出, 我国能源基础设施建设仍较滞后, 区域经济和能源发展不平衡、不协调, 能源供需逆向分布矛盾突出, 协调发展任重道远。

“要加快推广应用智能电网技术和设备, 提升电网信息化、自动化、互动化水平, 提高可再生能源、分布式能源并网输送能力。”高世宪认为, 加强智能电网规划, 需通过关键技术研发、设备研制和示范项目建设, 确定技术路线和发展模式, 制定智能电网技术标准。