[高压电器]

高落差竖井GIL机械强度分析及验证

文/西安西电开关电气有限公司　刘朋飞　南振乐　李振军

气体绝缘金属封闭输电线路在大型水电站中应用逐渐增多。对高落差竖井GIL布置技术进行了分析研究，并针对顶部一点固定布置方式的竖井GIL进行了相关的机械强度分析计算。同时通过高落差竖井试验平台模拟GIL实际安装，对上述理论计算进行了验证。

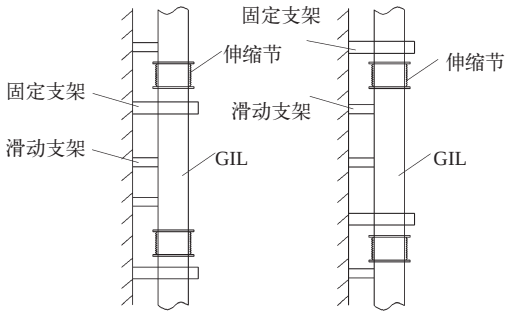
我国已建成了三峡水电站、溪洛渡水电站、锦屏水电站和拉西瓦水电站等巨型水电站，在建的有乌东德水电站和白鹤滩水电站。这些水电站从地下厂房到电站进出线的设备均选择使用气体绝缘金属封闭输电线路（简称GIL）。

大型水电站建设时由于地形条件的限制，GIL布置通道均采用高落差竖井形式。区别于常规水平布置GIL，高落差竖井GIL设计时需考虑GIL的固定方式及补偿结构设计、GIL机械强度、GIL安装及后期检修等因素。本文研究并确定了一种高落差竖井GIL布置方式，在此基础上开展了GIL机械强度的相关理论分析研究，并通过建成高落差竖井GIL试验平台对相关分析计算进行验证。

高落差竖井GIL布置技术研究

目前，高落差竖井GIL在垂直竖井中布置安装方式主要有：多点固定方式和一点固定方式。

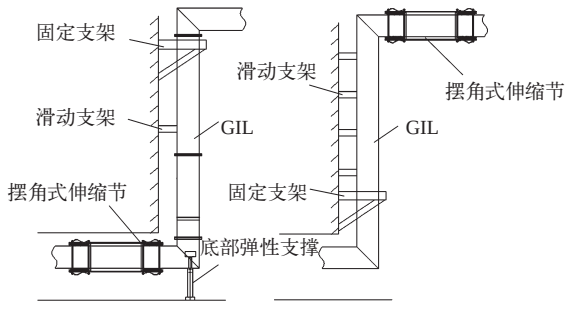
多点固定方式是根据GIL的热胀冷缩变形量，设置伸缩节，分多段固定。每一个固定段两端为固定支架、中间按需要可设多个滑动支架和一个伸缩节，伸缩节补偿量按固定段内的热胀冷缩量考虑。伸缩节布置在固定段的上端或下端，如图1所示。



（a）伸缩节设置在底部　　（b）伸缩节设置在顶部

图1　多点固定方式示意图

图2所示的一点固定方式又分为顶部固定方式和底部固定方式，其伸缩节设置在水平段。由于GIL竖直段一般较长，GIL外壳的热胀冷缩变形量较大，一点固定方式一般采用补偿量较大的摆角式补偿型伸缩节。



（a）顶部悬挂固定方式　　（b）底部支撑固定方式

图2　一点固定方式示意图

从伸缩节设置、安装方式、后期检修、土建结构设计及GIL设备投资等因素综合考虑，对比竖井多点固定和一点固定两种方案。

1）GIL采用一点固定时，只需在水平方向设置摆角式补偿型伸缩节，通过摆动角度进行补偿。而GIL采用多点固定时，需设置多个具有补偿热胀冷缩量的伸缩节，不仅设备成本高，且安装调整比较复杂。

2）GIL垂直段的安装方式与其外壳连接方式有关，本文采用外壳法兰连接结构。GIL采用顶部一点固定时，GIL从竖井底部向上安装，在底部设置同步液压顶升装置作为GIL安装过程和最终调整的支撑工具。而GIL采用多点固定时，因每个固定段的伸缩节都要进行调整，其安装过程相对比较复杂。

3）GIL检修一般是采用备用标准段对故障段进行更换。对于顶部一点固定方式，检修时使用同步液压顶升装置和一部起吊设备即可实现。而底部一点固定方式，检修时需使用两部起吊设备才能实现。对于多点固定方式，需使用起吊设备配合垂直伸缩装置才能实现。从检修的简便性来看，顶部一点固定方式较好。

4）GIL采用顶部一点固定方式时，所有的受力集中在竖井顶部的固定支架和基础上，土建设计较复杂。GIL采用底部一点固定方式时，支撑构架基础设置在竖井底部，基础和构架设计相对简单，但是需考虑安装所需的多个临时固定支架。而GIL采用多点固定方式时，由于受力多点分布，基础和支架设计相对简单。

综合设备成本、安装和检修的方便性，本文中高落差竖井GIL技术研究采用顶部一点固定的布置方案。

高落差竖井GIL机械强度分析计算

采用顶部一点悬挂固定布置的GIL，在设计时需考虑GIL机械强度，包括GIL壳体受力情况、法兰连接处螺栓强度情况等因素。本文重点介绍了GIL壳体抗拉强度计算公式和法兰连接螺栓强度校核公式。

1．GIL壳体抗拉强度计算

竖井GIL采用顶部一点悬挂固定布置，其顶部上端壳体在内部气体压力作用的同时还要承受因GIL自重而叠加的轴向拉力。若此合力超出壳体材料所能承受的范围，则壳体会发生变形甚至断裂。因此对GIL壳体所承受的作用力进行应力分析，并与GIL外壳材料许用应力进行比对，确定GIL壳体的机械强度。

竖井GIL壳体所承受的轴向拉力F_g由式（1）计算

$$F_g = mg + P\frac{\pi D_m^2}{4} \tag{1}$$

式中，m是竖井GIL自重，kg；g是重力加速度，m/s^2；P是竖井GIL设计压力，MPa；D_m是法兰用密封圈的平均直径，mm^2。

竖井GIL壳体所承受应力σ计算式为

$$\sigma = \frac{F_g}{S} \tag{2}$$

$$S = \frac{\pi(d_o^2 - d_i^2)}{4} \tag{3}$$

式中，σ是竖井GIL壳体应力，MPa；S是GIL壳体受力截面积，mm^2；d_o是GIL壳体外径，mm；d_i是GIL壳体内径，mm。

2．GIL法兰连接螺栓强度校核计算

竖井GIL采用法兰连接结构，法兰连接处由n个螺栓进行紧固。当GIL垂直竖井布置时，法兰连接处的紧固螺栓所承受的载荷力，包括GIL的自重及内部气体压力共同作用下的载荷力和螺栓的预紧力。因此，为了保证竖井GIL法兰连接的可靠性，应该对法兰连接处的紧固螺栓进行强度校核。计算出法兰连接处的单个螺栓所承受的应力，并与螺栓自身的抗拉强度进行对比校核。例如，8.8级高强度M16螺栓，其屈服强度为640 MPa。

单个螺栓的轴向预紧力F_y'由式（4）计算

$$F_y' = \frac{T}{Kd} \tag{4}$$

式中，T是螺栓的预紧力矩值，N·M；K是螺栓扭转系数；d是螺栓公称直径，mm。

法兰连接处总的螺栓预紧力F_y由式（5）计算

$$F_y = nF_y' \tag{5}$$

式中，n是法兰连接处螺栓的数量。

法兰连接处螺栓承受总的应力$F_{总}$由式（6）计算

$$F_{总} = F_g\frac{C_b}{C_b + C_m} + F_y \tag{6}$$

式中，C_b是螺栓的刚度；C_m是被联接件的刚度；$\frac{C_b}{C_b + C_m}$是螺栓的相对刚度，使用金属垫片时一般取值为0.2～0.3。

每个螺栓的应力σ由式（7）计算

$$\sigma = \frac{F_{总}}{nS_{螺}} \tag{7}$$

式中，$S_{螺}$是螺栓的截面积，mm^2。

高落差竖井GIL机械强度试验验证

建成一座高度为30 m的高落差竖井试验平台，在该试验平台上按照竖井GIL顶部一点悬挂固定方案安装一段完整形态的GIL，通过在GIL下部增加配重的方式来模拟不同高度落差的竖井GIL布置，通过该试验平台对上述理论计算公式进行验证。

1．竖井GIL试验形态设计

在该试验平台上按照竖井GIL顶部一点固定方案，安装一段长度约30 m的550 kV GIL，试验形态模拟一个完整竖井GIL形态的工况。根据不同落差竖井GIL的自重折算成配重块的重量，根据加载配重块的重量实现模拟竖井GIL不同高度落差。本次竖井GIL试验形态加载10.4 t配重，模拟落差200 m的竖井GIL。竖井GIL试验形态图如图3所示。

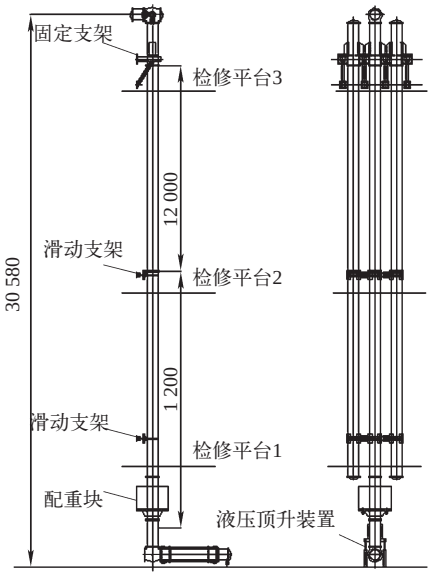


图3　竖井GIL试验形态图

2．理论计算结果验证

（1）0GIL壳体应力测试

GIL加载配重的过程中，GIL壳体会受拉力而产生应变，在GIL壳体表面设置电阻应变片，可以监测配重块加载过程中GIL壳体的应变。应变监测采用电阻应变片及应变仪，如图4所示。

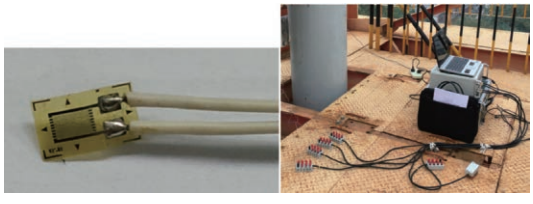


图4　电阻应变仪测试

在GIL受拉力时主要的承力点位置设置监测点，监测记录配重块加载完成后壳体各个监测点的应变，如图5和下表所示。

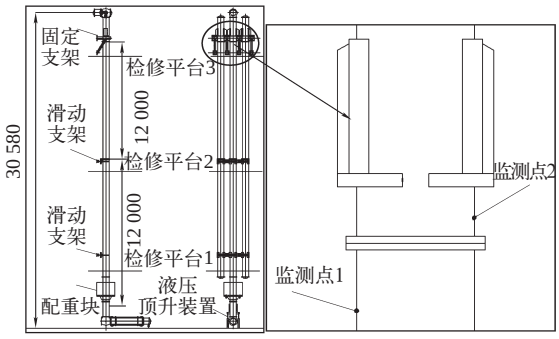


图5　应变片监测点

表　GIL各监测点应变监测值

监测点	应变值 μ_ε	材料弹性模量 E/GPa	换算应力值 σ/MPa	理论计算值 σ/MPa
1	248	70	17.36	19.69
2	115	70	8.05	8.58

由上表可见，GIL各个监测点的换算应力值与理论计算值接近，且均小于材料许用应力149.3 MPa。

2．GIL法兰连接螺栓强度验证

竖井GIL采用法兰连接结构时，若法兰连接处螺栓强度不够或预紧力不足，则会造成法兰连接处漏气。本次验证试验在竖井GIL试验形态安装完成后，充SF_6气体至额定压力。静置24 h后，检查法兰连接处螺栓紧固情况良好，同时对各法兰连接处进行包扎检漏，检漏测量结果合格。因此，验证了GIL法兰连接螺栓强度设计符合使用要求。

结束语

本文通过分析竖井GIL的几种典型布置形式，提出了一种最优的顶部一点悬挂固定竖井GIL布置结构。在此结构的基础上进行了竖井GIL的外壳抗拉强度分析计算、法兰连接处螺栓连接强度校核分析计算。建成了一座高落差竖井GIL试验平台，在该竖井GIL试验平台上模拟了约200 m落差的竖井GIL的实际安装，并通过对GIL壳体采用电阻应变仪进行应变监测及竖井GIL长期带载试验，验证了上述GIL机械强度理论分析计算的正确性。EA

（收稿日期：2020.05.09）