

[变电站]

CBD 500 kV户内变电站采用GIL管道连接方式的抗震性能分析

文/陈 晓¹ 陈 晶² 董仕镇¹ 张慧婷¹

1. 特变电工股份有限公司; 2. 北京电力经济技术研究院有限公司

以北京地区CBD 500 kV户内变电站为例,介绍了因地块狭小导致的特殊布置形式。根据布置方式和设备选择需求,对设备抗震性能最薄弱的点,即对各电压等级气体绝缘开关设备(GIS)与500 kV主变压器相连的气体绝缘线路(GIL)管道进行了抗震性能分析。通过建立有限元分析模型进行振型分解反应谱法抗震能力分析,详细分析了500 kV、220 kV及66 kV GIL管道的抗震性能,并提出了提高抗震性能的建议方案。该结论为本站及其余类似变电站的设计提供了理论依据。

根据现代城市发展规划的需要,越来越多的变电站需要考虑与当地环境的融合。需要变电站设计时考虑以下内容:减少占地面积,提高土地利用率;减少噪声和电磁辐射等对周围居民的影响;减少架空出线,采用电缆出线方式;减少空气绝缘开关设备(Air Insulated Switchgear, AIS),采用紧凑型GIS设备;减少户外站,采用全户内或地下变电站等。目前为止,电压等级在500 kV及以下的变电站均有众多户内、地下站的先例。变电站户内化带来的好处是对周边环境更加友好,但是也带来一些问题,比如和户外站相比增加了造价;由于空间的限制,很多连接导体无法使用裸导体,需采用特定绝缘方式包裹的导体;多楼层设计方式增加了抗震设计的难度等。

根据GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》,北京地区的抗震设防烈度为8度,设计基本地震加速度值为0.20 g。根据GB50260—2013《电力设施抗震设计规范》重要电力设施中的电气设施可按抗震设防烈度提高1度设防。因此重要电力设施应按照9度设防,计算时采用设计基本地震加速度值为0.40 g。这给变电站设计,尤其是户内变电站设计

带来了一定的困难。

户内变电站往往根据地块的要求,采用多楼层式的布置形式,各种设备需在高度方向上在不同楼层进行叠放;且设备之间的连接导体多采用GIL管道、绝缘母线及封闭母线桥等形式。一般情况下,设备本体的抗震性能较高,基本能够满足抗震需求。薄弱点就出现在设备与设备的连接导体上。比如高电压等级的GIS与主变压器采用GIL管道进行连接时,在主变压器套管和GIL管道连接处,以及垂直方向布置的GIL管道的抗震性能就是未知数,如设计不当将会产生严重的事故,必须进行细致的研究。

本文针对上述薄弱点,展开了一系列的研究工作。以北京CBD 500 kV变电站中500 kV主变压器与垂直布置的500 kV、200 kV和66 kV GIL管道形成的结构体系为研究对象,通过建立有限元分析模型进行振型分解反应谱法抗震能力分析,研究室内变电站中GIL管道体系的抗震性能,并提出了提高抗震性能的方案。该结论为本站及其余类似变电站的设计提供了理论依据。

CBD 500 kV变电站布置方案

1. 工程概况

拟建设的CBD 500 kV变电站位于北京市朝阳区CBD核心区北部，西侧相邻中央电视台，东侧为针织路，南侧为光华路，北侧为朝阳路。此处地块稀缺，规划建设一座500 kV、220 kV一体化的全户内变电站。变电站用地呈梯形，东西长约150 m，南北最宽处约106 m，南北最窄处约51 m，变电站占地面积11 288 m²。

2. 布置方案

本站为全户内变电站。所有电气设备布置在一栋主厂房内，主厂房分为地上四层，局部五层，地下一层。地上一层布置500 kV主变压器及中性点小电抗、500 kV并联电抗器、500 kV GIS、220 kV主变压器、66 kV并联电抗器、66 kV并联电容器、66 kV站用变压器及35 kV并联电抗器。地上二层大部分为一层设备间上空，其余空间布置二次设备室和蓄电池室。地上三层为电缆及管道夹层，用于敷设110 kV、35 kV电缆、110 kV GIL管道及35 kV绝缘母线。地上四层为管道层、35 kV电容器室、10 kV保安电源及380 V低压柜室、35 kV开关柜室和110 kV GIS室。管道侧布置在500 kV设备间上方，用于敷设500 kV、220 kV和66 kV GIL管道。地上局部五层在南侧管道层上方，布置有220 kV、66 kV GIS室。

从布置可以看出，本站占地面积小，布置紧凑，多电压等级设备之间的连接导体较多。为了减少地下夹层中各电压等级电缆的交叉，500 kV主变压器与500 kV、220 kV和66 kV GIS之间均采用油/

SF₆套管与GIL管道直连方式。

GIL管道抗震性能分析

1. 计算场地输入条件

北京CBD位于北京市朝阳区，根据GB50011—2010《建筑抗震设计规范》，该地区的抗震设防烈度为8度，设计基本地震加速度值为0.20 g。根据GB50260—2013《电力设施抗震设计规范》，重要电力设施中的电气设施可按抗震设防烈度提高1度设防。即按9度设防，计算时采用设计基本地震加速度值为0.40 g。场地特征周期取 $T_g=0.9$ s的较严格情况进行计算。

2. 设备参数与有限元模型

计算中考虑主变压器箱体对输入地震动的放大系数为2。GIL管道在主变压器箱体上位置示意图为图1所示。

主变压器箱体上的升高座材质为钢材，升高座顶部与油气套管中部的法兰连接。油气套管连接法兰材质为铝合金，按变截面梁单元建模。油气套管与导体连接，导体材质为铝合金。有限元模型如图2所示。

GIL管道与油气套管的法兰连接，GIL管道底部含连接筒和伸缩节，有限元模型中按等效梁单元建模，GIL管道底部的构造和有限元模型如图3所示。

有限元模型的边界条件为：GIL管道底部固接，变压器箱体按动力放大系数2考虑；GIL管道顶部按固接和无约束端两种工况分别建模计算。GIL管道顶部固接和无约束的情况，如图4所示。

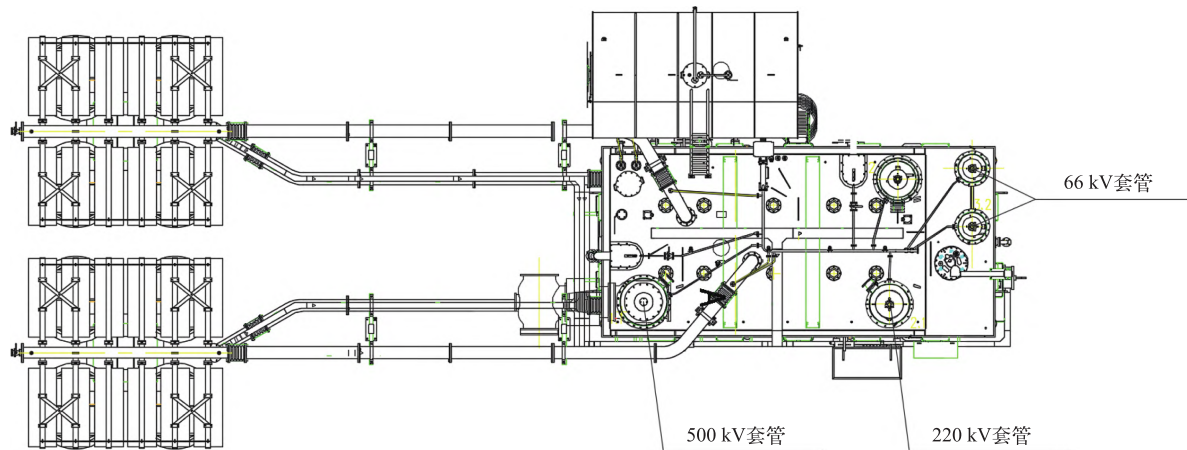


图1 主变压器外形图

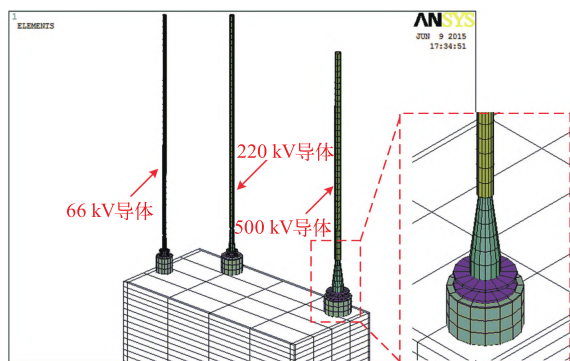


图2 油气套管和导体有限元模型

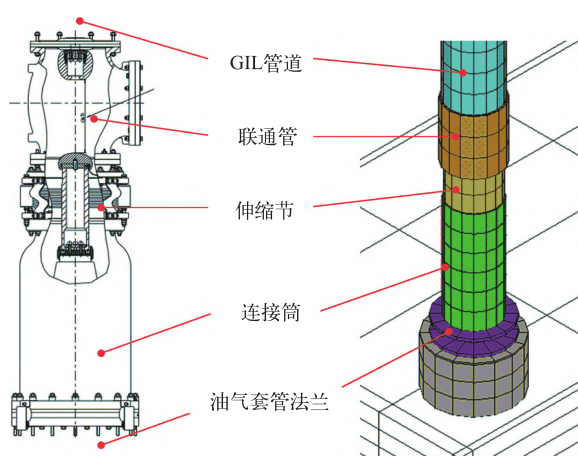


图3 GIL管道有限元模型

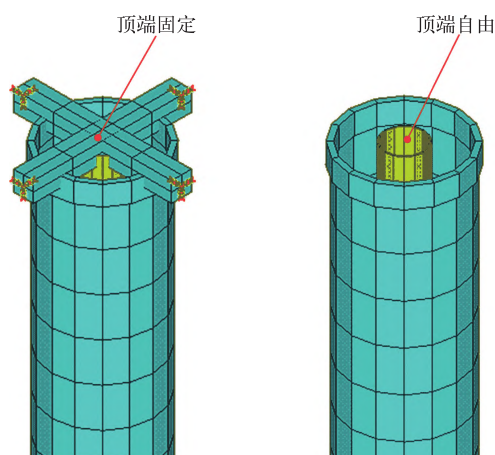


图4 顶端固接和顶端无约束工况

3. 模态分析

(1) 管道顶部固接工况

将建立的有限元模型进行特征值分析,得到模型的频率与振型,以分析结构的振动特征。顶部固接工况下模型的频率见表1。

表1 顶部固接工况的模型频率

阶次	频率/Hz	阶次	频率/Hz	阶次	频率/Hz
1	8.47	11	23.65	21	54.13
2	8.51	12	23.77	22	54.90
3	12.96	13	36.78	23	60.51
4	13.01	14	36.43	24	60.63
5	17.04	15	37.59	25	71.23
6	17.70	16	38.77	26	71.56
7	22.09	17	42.03	27	75.41
8	22.52	18	43.07	28	76.27
9	22.54	19	47.04	29	79.69
10	22.58	20	47.39	30	81.17

(2) 管道顶部无约束工况

顶部无约束工况下模型的频率见表2。

表2 顶部无约束工况频率

阶次	频率/Hz	阶次	频率/Hz	阶次	频率/Hz
1	2.56	11	17.20	21	37.77
2	2.56	12	17.20	22	37.77
3	3.11	13	21.62	23	42.76
4	3.11	14	21.62	24	42.76
5	5.84	15	23.11	25	49.18
6	5.84	16	23.11	26	49.18
7	9.00	17	24.75	27	54.29
8	9.00	18	24.75	28	54.29
9	13.71	19	36.36	29	61.50
10	13.71	20	36.36	30	61.50

4. 地震荷载效应分析

根据建立的ANSYS有限元模型,采用振型分解反应谱法,进行地震荷载响应分析。考虑主变压器箱体对地震响应的放大效应为2.0倍,并组合重力荷载,因此地震响应结果按如下方式组合: $1.0 \times$ 重力荷载效应 + $2.0 \times$ 地震荷载效应。

(1) 管道顶部固接工况

管道顶部固接工况下导体位移和应力仿真结果图如图5所示。

管道顶部固接工况下GIL管道位移和应力仿真结果图如图5所示。

从仿真结果中可以看出,导体和GIL管道最大应力和内力发生在顶部固接部位。500 kV导体计算应力为3.9 MPa, GIL套管应力为2.1 MPa; 220 kV导体计算应力为9.2 MPa, GIL套管应力为4.1 MPa; 66 kV导体计算应力为17.4 MPa, GIL套管应力为5.1 MPa。由于管道两端固接,伸缩节部位靠近管道反弯点,形成内力较小,500 kV管道伸缩节部位弯矩为0.88 kN·m, 220 kV管道伸缩节部位

弯矩为0.48 kN·m, 66 kV管道伸缩节部位弯矩为0.51 kN·m。导体位移较小, 最大位移发生在66 kV导体中部, 仅为11 mm; GIL管道位移较小, 最大位移发生在66 kV GIL管道中部, 仅为2 mm。

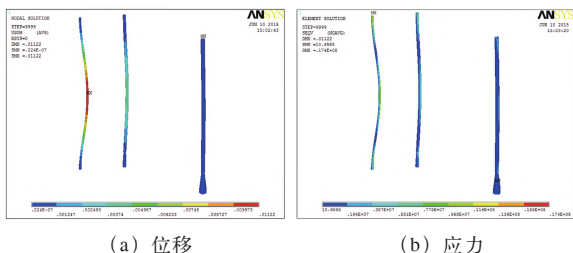


图5 管道顶部固接工况下导体位移和应力仿真结果图

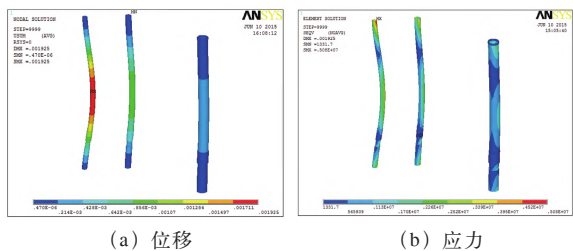


图6 管道顶部固接工况下GIL管道位移和应力仿真结果图

(2) 管道顶部无约束工况

管道顶部无约束工况下导体位移和应力仿真结果如图7所示。

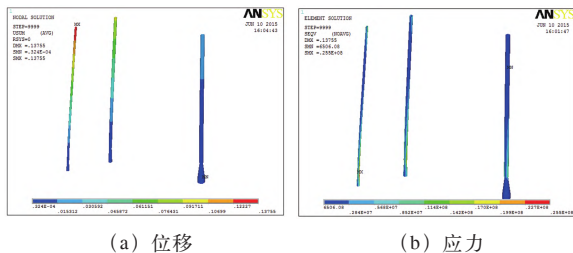


图7 管道顶部无约束工况下导体位移和应力仿真结果图

管道顶部无约束工况下GIL管道位移和应力仿真结果图如图8所示。

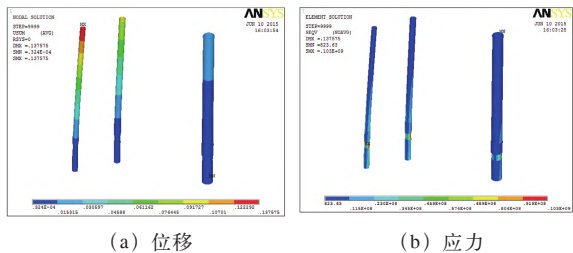


图8 管道顶部无约束工况下GIL管道位移和应力仿真结果图

从仿真结果中可以看出, 500 kV导体计算应力为12 MPa, GIL套管应力为15.8 MPa; 220 kV导体计算应力为19 MPa, GIL套管应力为30.9 MPa; 66 kV导体计算应力为23.1 MPa, GIL套管应力为37 MPa。计算结果中, 导体和GIL管道最大应力和内力发生在底部连接部位。伸缩节部位形成较大内力, 500 kV管道伸缩节部位弯矩为23.5 kN·m, 220 kV管道伸缩节部位弯矩为17.4 kN·m, 66 kV管道伸缩节部位弯矩为20.2 kN·m。导体和GIL管道位移较大, 最大位移发生在66 kV导体和GIL管道顶部, 位移可达137 mm。

5. 仿真结果分析总结

以上通过简化方法, 建立了主变压器与竖直GIL管道连接体的有限元模型, 并针对管道顶部固接和顶部无约束的情况进行了地震荷载效应计算。

在顶部固接时, GIL管道连接体系基频为8.47 Hz, 地震荷载下, 导体最大应力为17.4 MPa, GIL管道最大应力为5.8 MPa, 根据铝合金的材料强度大于80 MPa分析, 有较高的安全系数, 且最大内力位置发生在顶部固接端。伸缩节部位靠近管道反弯点, 形成内力较小, 设置位置合理。结果表明, 在各部分连接和支撑性能理想的情况下, GIL管道体系因其总体质量较轻, 地震荷载效应较小。

在顶部无约束的情况下, GIL管道体系呈悬臂体系, 基频为2.56 Hz, 地震荷载下导体最大应力为23.10 MPa, GIL管道最大应力为37 MPa, 安全系数较顶部固接的情况明显降低。值得注意的是, 此时伸缩节位置承受较大内力, 66 kV管道的伸缩节部位承受弯矩为20.2 kN·m, 应力可达103 MPa。这是因为结构体系的支撑冗余度小的情况下, 截面惯性矩小的部位易出现较大应力。管道和导体地震荷载下的位移也较大, 最大位移可达137 mm, 由于导体的振动频率与GIL管道不一致, 此位移幅值下将发生导体碰撞GIL管道壁的情况, 此种情况将给设备运行带来危害。

结束语

通过上述计算和分析, 得到结论和建议为:

1) GIL管道顶部无约束时, 管道最大应力可达103 MPa, 最大导体和管道位移可达137 mm, 抗震性能差, 给设备运行带来危害, 因此需采用管道顶

部有约束的方式。

2) 采用管道顶部有约束的方式时,应在常规管道支撑设置的基础上,在关键连接部位增加抗震能力较强的管道支撑结构,比如在GIL管道由水平转向垂直的部位,应在楼板处设置管道固定和支撑结构。在此处设置伸缩节,并且在垂直段GIL管道顶部设置有一定强度的绝缘盆子,以减小导体和管道的相对位移。

3) 在设备订货时,建议校核伸缩节装置、管道转角接头和管道连接接头的抗震承载能力。以达到在管道支撑部分失效的情况下,连接部位仍有较强的抗震能力,保证变电站的地震安全性。

综上所述,在连接和支撑性能理想的情况下,GIL管道体系因其总体质量较轻,地震荷载效应较小,能够达到较好的抗震性能。**EA**

(收稿日期: 2022-03-26)

参考文献

[1] 夏泉著. 城市户内变电站设计[M]. 北京: 中国

电力出版社, 2016.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 电力设施抗震设计规范: GB 50260—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.

[4] 崔鲁, 王慧, 卢小钟, 等. 城市中心地区全地下变电站消防系统设计研究[J]. 电气应用, 2021, 40(6): 95-98.

[5] 袁秋洁, 王勇, 江小兵, 等. 230 kV大容量车载移动变电站的设计及应用[J]. 电气应用, 2021, 40(4): 55-61.

[6] 陆朝阳, 吴俊辉. 智能变电站二次舱一体化设计研究[J]. 电气应用, 2021, 40(1): 49-54.

[7] 李旭阳, 李大鹏, 李勇杰, 等. 220 kV智能变电站模块化建设中HGIS与GIS技术经济对比分析[J]. 电气应用, 2020, 39(7): 67-73.

广告|AD

Hi

电气时代视频号

邀您关注!

ELECTRIC AGE 1981-2022 创刊41周年

持续关注能源电力及自动化



电气时代
机械工业信息研究院
北京

以电气&自动化领域的精英人物、创新企业、新技术和新产品为视点,全面反映电气&自动化产业链的新技术、新产品、主流应用和产业动向。

视频投稿: video@eage.com.cn

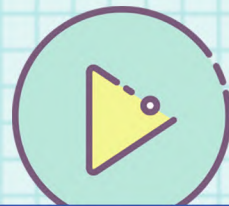
公众号: 电气时代

视频号: 电气时代

关注

私信

添加微信



扫码关注
获取行业最新资讯