[组合电器]

110 kV组合电器用大容量长距离母线的开发应用

文/朱振华[1] 戴振[1,2] 胡小艳[1]
1. 无锡恒驰中兴开关有限公司；2. 江苏南瑞恒驰电气装备有限公司

随着近年来我国电力行业的不断发展，组合电器在我国现代化的变电所建设过程中得到极为广泛的应用。组合电器变电设备在应用过程中的合理性有助于提高变电站的运行效率，使系统的稳定性和安全性得到提升。以某新建变电站设计为基础，结合该站母线容量大、距离长的实际情况，改进既往变电站设计方案，提出新的变电站设计思路和方案，并仿真验证该变电站主母线的设计方案，该工程已顺利通过业主验收。借助计算机仿真技术，同时结合工程实际应用情况，解决了工程实际问题，同时为后续的工程设计提供了指导。

气体绝缘金属封闭组合电器（Gas Insulated Switchgear，GIS）母线结构紧凑，能安全、稳定地传输电能，被广泛应用于组合电器开关设备中[1-2]。

某变电站新建工程由无锡恒驰中兴开关有限公司承接，并为该变电站设计组合电器设备。

其建设规模如下：该站采用双母线接线形式，13回出线、4回进线；其间隔间距最长达7.5 m，且主母线额定电流较大（4 000 A）。如何提高母线通流能力及结构稳定性成为该新建变电站设计中亟待解决的问题。

为确保变电站的稳定运行，本文结合该变电站的实际情况，在既往成熟设计方案的基础上开发一种性能可靠的大容量长距离母线，并于2022年6月投运，运行良好。

大容量母线设计

1. 导体的布置及主要参数

大容量母线导体沿用既往三相共相、三相导体呈三角形布置的结构。由于母线中电阻与电抗的存在，电流流过导体时产生的热量使导体及壳体的温度升高；而大电流会明显提高导体的发热量，影响母线的温升值[3-5]。为使母线具备通流4 000 A的能力，根据不同的选型尺寸热平衡计算及比较的结果[6-7]，大容量母线导体采用外径110 mm、内径80 mm的铝制圆管结构。

2. 电场仿真计算

在仿真软件中对大容量母线模拟雷电冲击电压650 kV进行电场校核，计算出壳体内部及导体表面的场强值，电场强度均在判据[8-10]范围内且有一定的裕度，如图1、图2所示。设备内部场强最高为

基金项目：江苏南瑞恒驰电气装备有限公司科技项目“提高可靠性126 kV GIS深入研究研制”（524647220002）

23.2 kV/mm，导体表面场强最高为21.2 kV/mm，大容量母线的绝缘强度满足要求。

3. 导体挠度计算

导体材料相关参数见表1。

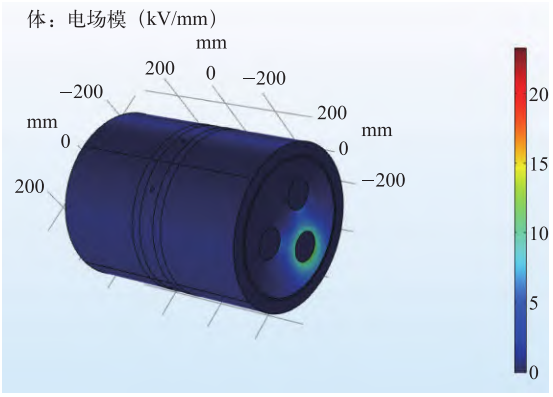

图1　三相共相母线内部电场仿真分析结果

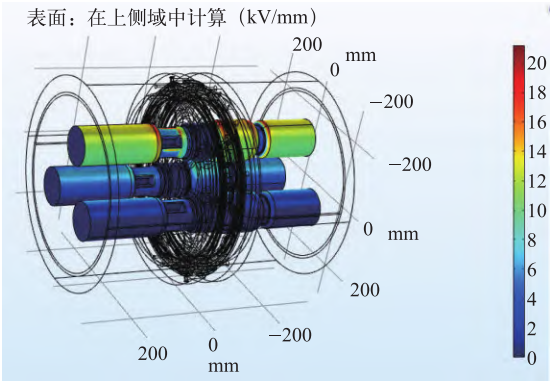

图2　三相共相母线导体表面电场仿真分析结果

表 1　导体材料相关参数

导体属性	参数值
长度/mm	3 215
外径/mm	110
内径/mm	80
电动力载荷/（kgf/mm）	0.33
弹性模型/（kgf/mm^2）	7 000
转动惯量/mm^4	5.167 × 10
抗拉强度/（kgf/mm^2）	21
导体剖面模数σ_{yt1}	94 000
绝缘盆子弯曲强度σ_{yt2}/（kgf·mm）	816 327

（1）超静定结构固定-支撑

触头可在导杯内滑动，导体端部与导杯内部保持摩擦接触，约束导体铸头和导杯螺栓孔位置。按照超静定梁等效挠度计算模型及判据[11-12]，计算如下，可见导体扰度均在安全范围内且裕度较大。

1）导体最大挠度为

$$y_{max}=\frac{ql^4}{185EI}=\frac{0.33\times3215^4}{185\times7000\times5.167\times10^6}=5.3\ mm>5\ mm \tag{1}$$

基于ansys软件，固定-支撑形式下导体承受均布载荷，其挠度仿真结果如图3所示。

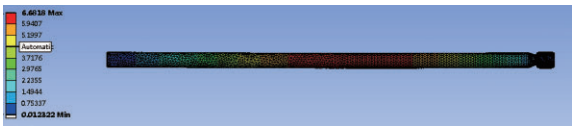

图3　固定−支撑扰度仿真结果

2）导体本体强度安全系数

$$\sigma=\frac{\sigma_{yt1}}{\sigma_{max}}=\frac{21}{\frac{0.33\times3215^2}{8}/94000}=4.59>2 \tag{2}$$

3）绝缘盆子强度安全系数

$$\sigma=\frac{\sigma_{yt2}}{\sigma_{max}}=\frac{816327}{0.33\times3215^2/8}=1.89<2 \tag{3}$$

4）M10螺栓强度安全系数

$$\sigma=\frac{\sigma_{yt3}}{\sigma_{max}}=\frac{95}{\frac{\frac{0.33\times3215^2}{8}}{90.52}/55.1}=1.89<2 \tag{4}$$

（2）计及运输条件的受力情况分析

运输条件下导体属性见表2。结合仿真与理论[11, 13-14]，计算导体本体、导体铸头、绝缘盆子和螺栓在运输要求5 g加速度下的受力情况，可见满足安全系数要求且仍有较大裕度。

表2　导体属性

导体属性	参数值
长度/mm	3 215
外径/mm	110
内径/mm	80
重力载荷/（kgf/mm）	0.072
弹性模型/（kgf/mm^2）	7 000
转动惯量/mm^4	2.58 × 10
抗拉强度/（kgf/mm^2）	21
导体剖面模数σ_{yt1}	57 000
绝缘盆子弯曲强度σ_{yt2}/（kgf·mm）	816 327
M10螺栓抗拉强度σ_{yt3}/（kgf/mm^2）	9 521

（1）导体本体最大挠度为

$$\begin{aligned}y_{max}&=\frac{ql^4}{185EI}\\&=\frac{0.072\times3\ 215^4}{185\times7\ 000\times5.167\times10^6}\\&=1.2\ mm<5\ mm\end{aligned} \tag{5}$$

2）导体本体强度安全系数为

$$\sigma=\frac{\sigma_{yt1}}{\sigma_{max}}=\frac{21}{\frac{0.072\times3\ 215^2}{8}/94\ 000}=21.1>2 \tag{6}$$

3）绝缘盆子强度安全系数为

$$\sigma=\frac{\sigma_{yt2}}{\sigma_{max}}=\frac{816\ 327}{\frac{0.072\times3\ 215^2}{8}}=8.72>2 \tag{7}$$

导体铸头采用4×M10螺栓进行锁附，其有效半径为R=8.4 mm，有效面积为A=55.1 mm^2。

4）M10螺栓强度安全系数为

$$\sigma=\frac{\sigma_{yt3}}{\sigma_{max}}=\frac{95}{\frac{\frac{0.072\times3\ 215^2}{8}}{90.52}/55.1}=5.06>2 \tag{8}$$

平衡长距离母线盲板力设计

在设备运行时主母线内部充填0.5 MPa的SF_6绝缘气体。由于主母线端末为封闭状态，气体作用在端末的封闭盖板上时会有力的产生，该力为水平方向[15-16]。因此，当盲板力存在时，如果水平方向没有其他力去平衡盲板力，盲板力就会对母线支架形成一弯矩，进而导致母线支架发生形变；而对于长距离母线，可能造成的形变则更应重视。

长母线间隔间需采用拉杆进行连接以有效地平衡盲板力。当盲板力与拉杆的拉力达到平衡的时候，母线的固定支架所受的力最小，产生的形变也就最轻微[17]。

1. 盲板力计算参数

三工位盖板的有效受力面直径为494 mm，面积为191 568.26 mm^2，根据力学计算公式，可计算出0.5 MPa的气压作用在面积为191 665.426 mm^{2}的面上时，所产生的的力为95 832.71 N。

该新建变电站环境温差变化为－15～30 ℃，当环境温度为－15 ℃时，壳体内部气压为0.5 MPa，当环境温度升高到30 ℃时，壳体内部温度可达到50 ℃，根据查理方程$\frac{P_1}{P_2}=\frac{T_1}{T_2}$[16]可计算出，当壳体内部温度达到50 ℃时，气体压力约为0.63 MPa。根据力学计算公式，可计算出0.63 MPa的气压作用在面积为191 568.26 mm^{2}的面上时，所产生的的力为120 749.2 N。在仿真计算中盲板力F值设定为120 749.2 N。

固定方式：将拉杆端末固定（默认为拉杆被旁边的间隔拉住不动），拉杆选用对边25 mm的六角钢。

2. 仿真计算结果

最大应力为145.4 MPa，位置在拉杆上。最大应力145.4 MPa小于材料本身的屈服强度235 MPa，如图4所示。

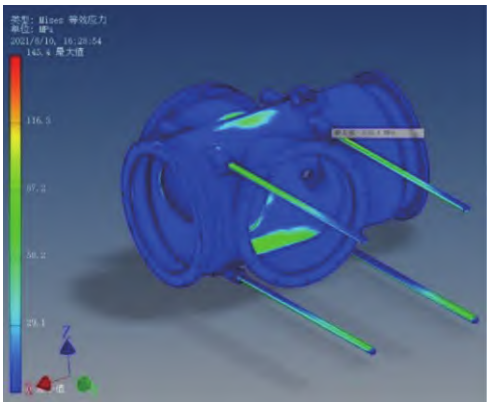

图4　应力计算结果

三工位壳体上最大应力位置在支筒的焊接位置，应力约为124.2 MPa。壳体的材料为铝合金5052—H112，最大拉伸强度为170～240 MPa，屈服强度195 MPa。可见壳体所受最大应力小于材料本身的抗拉强度，如图5所示。

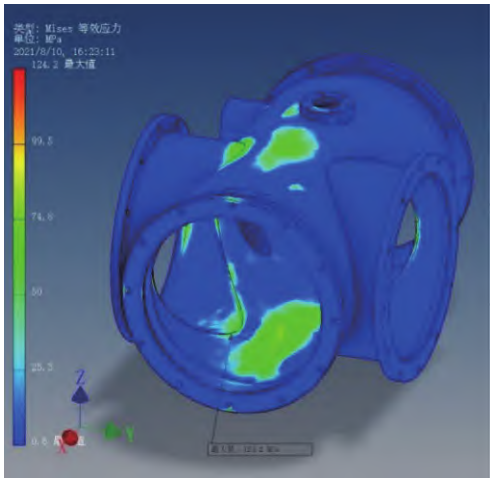

图5　三工位壳体应力计算结果

检测试验与投运

2022年1月，该变电站主母线在无锡恒驰中兴开关有限公司完成了组装工作，出厂试验按GB/T

7674、GB/T 11022进行，试验结果符合设计预期、满足标准要求。

2022年6月变电站完成投运，主母线如图6所示。投运时顺利通过交流耐压试验230 kV，耐压时长1 min的交接试验；三工位壳体在受盲板力和拉杆拉力的情况下，发生的最大形变2.963 mm，安全裕度较大。投运后巡检人员进行了多次系统性排查，各类数据表明运行情况良好。

图6　运行中的大容量长距离母线

结束语

本文针对某新建变电站的工程需要，提出了一款大容量长距离母线的设计方法，并对该母线的通流能力、盲板力的平衡方式进行了研究，其结果表明：①通过对比相关研究结果，得出应选用直径ϕ110/80直线导体的结论，并经电场计算及扰度计算验证了方案的可行性；②提出了长母线盲板力的平衡方式，避免了支撑不受侧向不平衡力，造成支撑倾斜、变形等问题。同时，该变电站新建项目的成功投运及稳定运行也进一步印证了本文研究的可靠性。

本文不仅解决了工程实际问题，为保证设备的安全运行提供了理论支持，同时为后续工程设计中如何提高设备利用率、降低能耗和减少占地面积指明了方向。EA

（收稿日期：2023-11-07）

参考文献

[1] 南方，王全海，闫练．GIS母线工程设计及应用[J]．电气时代，2015(6)：66-69+72.

[2] 李付永，孙龙勇，姚灿江，等．新型126 kV复合式组合电器的研究与开发[J]．高压电器，2020，56(10)：220-227.

[3] 王振芹，丁兆帅，王娜．基于磁场-流场-温度场耦合的GIS母线热分析[J]．浙江电力，2021，40(1)：44-49.

[4] 黄孟丹，肖纯，杨芷宁，等．GIS设备发热研究进展[J]．高压电器，2020，56(12)：24-33.

[5] 曾亮，郭建炎，袁传镇，等．基于有限元分析的三相共箱GIS母线温度场分布[J]．水电能源科学，2015，33(9)：196-199.

[6] 黄孟丹．GIS设备发热机理与检测方法研究[D]．武汉：武汉理工大学，2019.

[7] 高远．双层导体5000 A共箱封闭母线多物理场耦合分析[D]．沈阳：沈阳工业大学，2014.

[8] 徐建源，汪枫，何荣涛，等．110 kV三相共箱式GIS内隔离开关部位电场及击穿特性的分析与研究[J]．中国电机工程学报，1999(9)：32-36.

[9] 张亮，何聪，李军浩，等．振荡雷电冲击电压下气体绝缘组合电器中极不均匀场击穿特性研究[J]．电工技术学报，2020，35(12)：2672-2680.

[10] 吴其，刘晓明，杨田，等．基于复杂网络理论的气体绝缘金属封闭开关设备电场网络特征分析[J]．电工技术学报，2020，35(20)：4317-4324.

[11] 张本帅，王芬芳，王博，等．145 kV SF_6电流互感器的ANSYS有限元软件仿真分析[J]．通信电源技术，2020，37(5)：87-89.

[12] 毛建江，王佳．超静定单跨混凝土梁的挠度计算[J]．浙江建筑，2001(6)：13-14.

[13] 仲留寄．气体绝缘金属封闭输电线路的仿真与试验研究[D]．苏州：苏州大学，2016.

[14] 南方，王全海，闫练．GIS母线工程设计及应用[J]．电气时代，2015(6)：66-69.

[15] 贾耿锋，郭煜敬，蒋晓旭，等．GIS母线筒体设计与波纹管配置研究[J]．电气时代，2015(11)：64-68.

[16] 李跃刚．某电厂660 MW超超临界机组凝汽器单侧顶起原因分析及处理[J]．电力设备管理，2020(10)：104-105.

[17] 王子佳．查理定律常量表达式的探讨[J]．硅谷，2009(22)：2.