

「电气设备」

特高压直流穿墙套管导体支撑结构研究

文/西安西电开关电气有限公司 李振军 刘朋飞 南振乐

特高压直流穿墙套管是连接换流站直流场和阀厅的关键设备，目前，直流穿墙套管结构主要有胶浸纸电容式结构、环氧芯体 SF_6 气体复合绝缘结构、 SF_6 气体绝缘结构。在研究以上几种穿墙套管结构的基础上，提出一种 SF_6 气体绝缘结构穿墙套管的导体支撑结构。该支撑结构中导体不需要绝缘支撑，通过几个有效措施减小导体挠度影响，同时也避免了直流电压下绝缘件表面电荷累积效应引发的电场畸变对绝缘件使用寿命的影响，使直流穿墙套管的运行可靠性更好。

在特高压直流输电工程中，阀厅内的换流阀直流侧与户外的直流场设备连接需要通过穿墙套管实现，保证直流输电主回路对墙绝缘及承载直流电流。目前，国内的直流穿墙套管内部主绝缘结构主要有胶浸纸电容式结构、环氧芯体 SF_6 气体复合绝缘结构、 SF_6 气体绝缘结构。其相对应的内部导体支撑结构为胶浸纸卷制而成的电容芯体，或者是环氧树脂浇注而成的绝缘件。导体采用电容芯体支撑的结构时受导体包覆材料性能的限制套管的载流能力通常不大，而套管内部采用环氧浇注绝缘件支撑导体结构，在长期直流电压的作用下，空间电荷积聚到绝缘件表面，产生局部电场畸变，可能会影响产品的可靠运行。

文中提出了一种基于 SF_6 气体绝缘结构的新型导体支撑结构，采用该结构，套管的载流能力大幅提升，而且可以避免空间电荷对套管内部电场的畸变影响，提升产品整体的可靠性。

装法兰和电连接导体三部分组成，内部充入一定压力的 SF_6 气体进行绝缘。其导体为铝合金制成的铝管，贯穿在套管内部，采用两端支撑固定的方式，套管内部不设任何绝缘件进行导体支撑，其结构示意图见图1。

该穿墙套管导体的支撑方式可简化为两端支撑的模型，其因自重产生弯曲变形，导体中部的挠度最大。若挠度过大时会影响导体与套管之间形成的同轴电场分布。因此，如何将导体的挠度控制到一个合适的范围内，保证套管的内部电场满足绝缘设计要求，是我们解决的研究难点。

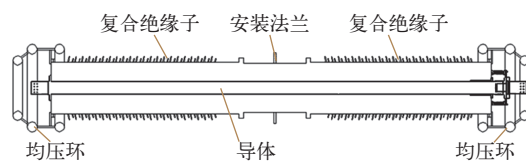


图1 套管结构图

穿墙套管导体支撑结构研究

本文研究的穿墙套管由两根复合绝缘子、安

基金项目：国家能源应用技术研究及工程示范项目（NY20140101）。

控制导体挠度的措施

1. 设计合理截面，增大惯性矩

在保证导体通流能力不降的前提下，选择合理的截面形状，增大截面惯性矩，是提高导体弯曲刚度的有效措施。因此，在相同材质的条件

下,导体在选型时应选择大直径薄壁的管材,不但有效散热面积大、趋肤效应小、刚度好等特点,还可以将导体挠度控制在可接受的范围内。

2. 设置导向装置,使简支梁的模式转变为近似的两端固定

在未设置导向装置前,导体模型可以近似简化为一端简支一端固定梁模型(见图2),而当设置了导向装置后,导体模型又可以近似简化为两端固定梁模型(见图3)。

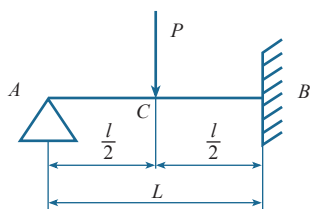


图2 一端简支一端固定梁示意图

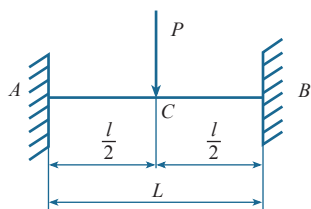


图3 两端固定梁示意图

两种简化梁模型的最大挠度量分别为 $f_{\max} = (7Pl^3)/(768EI)$ 和 $f_{\max} = (Pl^3)/(192EI)$,式中, P 为载荷值,kN; E 为弹性模量, N/mm^2 ; I 为截面惯性矩, mm^4 。

由此可以看出设置导向装置后导体的中部挠度会明显减小。

同时导向装置的使用也缩短了导体的两端支撑之间的距离,如图4中的 L 为原导体长度, $L1$ 为使用导向装置后的长度,根据挠曲线微分方程可知,当缩短梁两端支点距离时,其挠度也会明显减小。

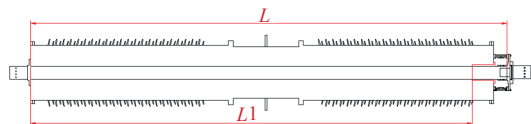


图4 导体支撑结构图

在穿墙套管的波纹管端设置导向装置,可以避免波纹管横向受力,保证波纹管在轴向进行拉伸或收缩。当导体伸缩变化时,波纹管端盖可以随导体进行轴向运动。

3. 对导体施加轴向拉力

波纹管安装在额定气体压力作用下的管系中,当产品充入额定气压时,波纹管端部法兰承受均布压力,该均布内压力沿轴向转化为波纹管法兰的内压推力,即盲板力。作用在波纹管伸缩节上的盲板力 F_p 由下式计算(见图5)

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

$$D_m = D_b + h + nt$$

式中, p 为 SF_6 气体额定压力,MPa; D_m 为波纹管平均直径,mm; D_b 为波纹管直管内径,mm; h 为波纹管波高,mm; t 为波纹管单层材料名义厚度,mm; n 为波纹管材料层数。

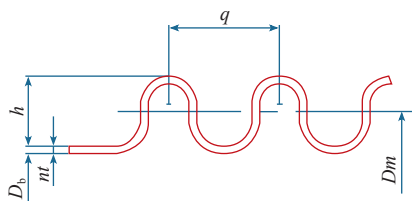


图5 波纹管图

弹性波纹管通过波纹管盖板与导体连接成一体,作用在波纹管端部的盲板力以拉伸的形式作用在导体上,对减小导体变形也有一些作用(见图6)。

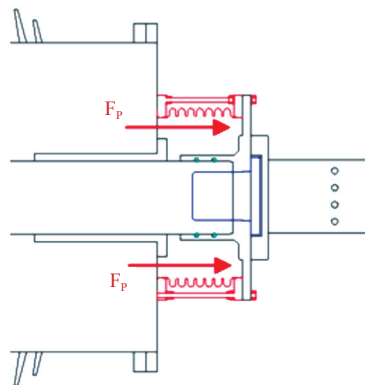


图6 气体盲板力图

计算验证

建立导体支撑模型,利用分析软件计算导体挠度,并与实际测量的导体挠度值进行比对,依此建立导体带挠度的模型进行电场仿真。

1. 导体挠度仿真

建立导体模型采用有限元软件进行仿真分析(如图7),计算结果为导体最大挠度41 mm。

套管装配完成后实际测量导体的最大挠度为

D: Copy of Static Structural
Figure
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
2015/8/14 17: 48
41.079 Max
36.515
31.95
27.386
22.922
18.257
13.693
9.128 7
4.564 3
0 Min

图7 导体挠度仿真

32.5 mm, 将仿真结果与实际测量结果进行比对, 二者比较接近, 取二者较大值建立导体带挠度的电场分析模型。

2. 电场计算验证

穿墙套管固定支点在中部法兰, 两支复合绝缘子为悬臂结构, 复合绝缘子端部会产生一定的变形。同时导体为两端固定方式, 其在套管中部位置有一定的挠度变形。综合以上两种变形因素建立电场分析模型, 对套管内部电场进行分析计算。

计算结果显示套管内部电场及复合绝缘子外表面场强均满足设计要求(如图8、图9所示)。

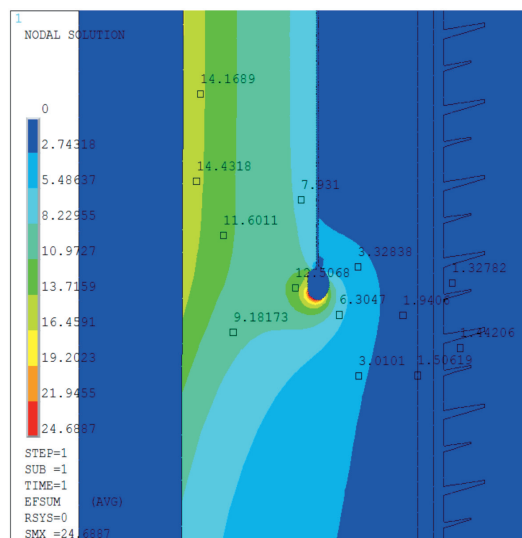


图8 内部电场图

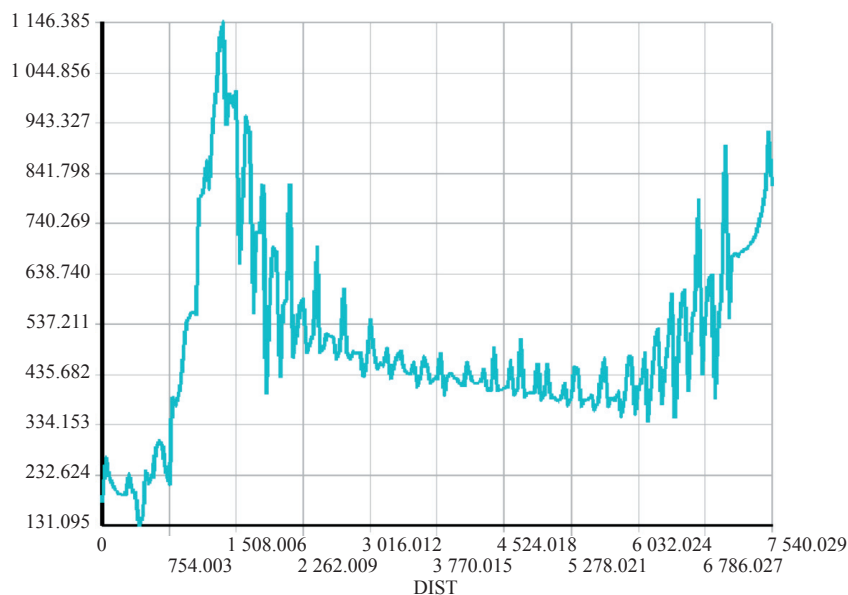


图9 绝缘子表面电场图

结束语

本文通过采用以下3种措施: 1) 设计合理截面、增大惯性矩。2) 设置导向装置、改变端部支撑方式及缩短两端支点距离。3) 对导体施加轴向拉力; 有效地控制中心导体挠度在合理范围内, 实现了特高压直流穿墙套管内部导体无绝缘支

撑, 且其电场分布满足设计要求。

本文提出的基于SF₆气体绝缘结构的新型导体支撑结构, 在一定程度上可以提高特高压直流穿墙套管的运行可靠性。EA

(收稿日期: 2017.06.18)

(编辑: 白文亭)