

[超高压输电]

超高压输电线路用绝缘子应用研究

文/中能建江苏能源科技有限公司 周振华

超高压输电线路是一种新型的大容量输电线路设备，结构紧凑，但输电容量大、绝缘性能好，在城市等人口密集区域应用广泛。超高压输电线路设备中导体电压很高，内部支撑导体的绝缘子是非常关键的重要绝缘部件。以研制超高压输电线路为依托，重点对支撑的绝缘子进行结构强度分析、电场仿真分析，最后通过试验验证。利用计算机技术，提高绝缘子研制效率，减少绝缘子研制成本。

超高压输电线路（以下简称GIL），是一种圆形导体和圆形外壳同轴布置的超高压输电设备，导体和外壳一般都采用不同性能牌号的铝材制成，用于长距离输送大容量电能。由于导体的电压很高，需要采用绝缘性能优良的压缩气体作为绝缘介质将导体包裹住。

AZZ、Alstom和Siemens等国外企业早已具备成熟的GIL生产制造技术，在世界范围内得到广泛应用。据了解，我国国内很多电力工程项目依然信赖国外技术，采用国外品牌。掌握GIL研制的关键技术非常重要，国产化势在必行。

GIL通常设计长度为11~18 m，GIL长度比较长，导体长度也较长，导体重量较重，仅依靠两端盆式绝缘子支撑强度不够，导体中间部分需要使用关键的部件支撑绝缘子。显然支撑带有超高电压的金属导体的环氧树脂浇注的绝缘子在GIL运行过程中需要承受着极高的电场强度和机械应力，因此其绝缘性能和机械强度的可靠性直接决定了GIL设备的技术水平和长期运行的可靠性，是GIL设备中极为关键的部件之一。

从节约研制成本的角度出发，对于核心部件支撑绝缘子，本文首先采用计算机进行结构强度仿真分析、电场仿真分析，不断优化结构设计，当优化后的结构能够满足设计要求时进行试制，然后再通

过试验验证其性能是否满足使用性能。

简介

支撑绝缘子如图1所示，每组导体需要有三个支撑绝缘子构成，这样才能保证绝缘子所支撑的金属导体与金属外壳保持同轴布置，并且使得通电后的导体在内部形成近似均匀电场，均匀电场是静态的，不具备冲击力，有利于提升绝缘性能，更有利于GIL设备的长期稳定运行。

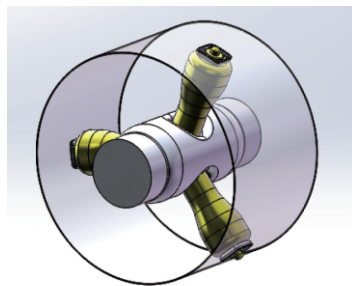


图1 支撑绝缘子

本文考查的GIL设备是采用SF₆压缩气体作为绝缘介质，设备长度为常规的长度11 m。

机械性能分析

本文考查的绝缘子添加了氧化铝等微量元素的环氧树脂浇注而成，性能参数设置见表1。

表1 性能参数

外观	白色
收缩率 (%)	0.387
密度/g.cm ⁻³	2.37
玻璃化转变温度/℃	140~146
拉伸强度/MPa	69~100
弯曲强度/MPa	120~136
冲击强度/kJ.m ⁻²	/
线热膨胀系数 (TMA) /℃	2.9×10 ⁻⁵
体积电阻率/Ω·cm	2.7×10 ¹⁶
介电常数	5.93
介质损耗系数 (%)	0.19
击穿场强/kV.mm ⁻¹	/
耐电弧性/s	210

机械强度是衡量材料抵抗外力破坏能力的量度，表征了材料的受力极限，在实际应用中具有重要意义。不同形式的破坏力对应于不同意义的强度指标，根据GIL中环氧树脂浇注绝缘件的实际工况，选择拉伸强度、弯曲强度和冲击强度作为衡量浇注试样机械强度的三个指标。

1) 拉伸强度测试按GB/T2568—1995《树脂浇铸体拉伸性能试验方法》标准执行，测试结果以5个试样的算术平均值表示。

2) 弯曲强度测试按GB/T2570—1995《树脂浇铸体弯曲性能试验方法》标准执行，测试结果以5个试样的算术平均值表示。

3) 冲击强度测试按GB/T2571—1995《树脂浇铸体冲击试验方法》标准执行，测试结果以5个试样的算术平均值表示。

根据《SF₆高压电器设计》《环氧树脂电绝缘材料》等资料综合确定本次仿真环氧胶铸件性能参数，见表2。

表2 性能参数

性能	指标	单位
弹性模量	5 000	N/mm ² (MPa)
中泊松比	0.33	
中抗剪模量		N/mm ² (MPa)
质量密度	2 370	kg/m ³
张力强度	69	N/mm ² (MPa)
压缩强度	104	N/mm ² (MPa)
弯曲强度	120	N/mm ² (MPa)
屈服强度		脆性材料 无
热膨胀系数	2.9e×10 ⁻⁵	℃
热导率	0.188	W/(m·K)
玻璃化转变温度	140	℃
冲击强度	12	kJ·m ⁻²

1. 水平工况分析

当GIL处于水平工作状态进行力学分析时，设置以下三个假定条件。

1) 假设为标准段长度11 m。导体两端没有盆式绝缘子支撑，导体处于自重状态，由两组支撑绝缘子支撑，考虑最苛刻条件下的受力情况，本分析增加短路电力。

2) 假设导体直径140 mm，壁厚20 mm，长11 m，计算重力G=2195 N。因导体由两组支撑绝缘子支撑，根据力学分析，分配到单个绝缘子轴向方向的力F₁=548.75 N。

3) 假定运行中存在短路电力。经过计算得到单位长度导体所受最大短路电力F=923.32 N/m，11 m导体有F=10 156.52 N，因导体由两组支撑绝缘子支撑，根据力学分析，分配到单个绝缘子轴向方向的力F₂=5 078.26 N。

支撑绝缘子受力情况如图2所示。

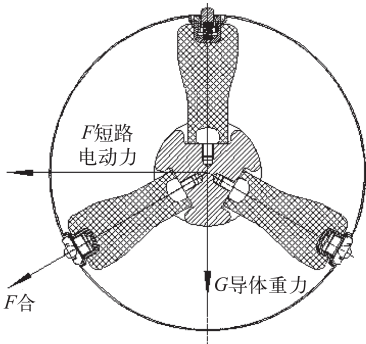


图2 支撑绝缘子受力图

根据图2可得

$$F_{合} = \sqrt{F_{短}^2 + G_{重}^2} = \sqrt{5\,078.26^2 + 548.75^2} = 5\,107.82\text{ N}$$

经计算机进行力学仿真分析，支撑绝缘子受力仿真图如图3所示。

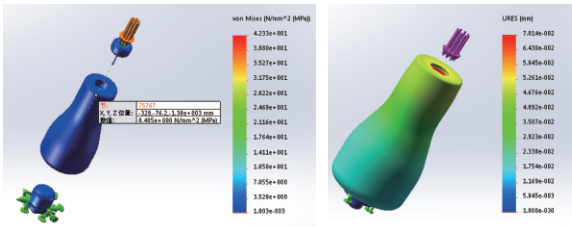


图3 支撑绝缘子受力仿真图

模型中环氧树脂浇铸件的最大等效应力为42.33 MPa，而环氧树脂浇铸件极限应力为69 MPa，

零件的安全系数约为1.63。安全系数的选取必须体现既安全又经济的设计思想，通常由国家有关部门制定，公布在有关的规范中供设计时参考，一般在静载下，对塑性材料可取1.5~2.0，脆性材料取2.0~5.0。安全系数1.63满足设计要求。

2. 垂直工况分析

当GIL处于垂直工作状态进行力学分析时，设置以下两个假定条件。

1) 假设为标准段长度11 m。中间导体两端不是盆式绝缘子与导体插接连接，即假定导体处于自重状态；本次分析不考虑短路电力。

2) 假设导体直径140 mm，壁厚20 mm，长11 m，计算重力 $G=2\ 195\text{ N}$ 。因导体由每组3个支撑绝缘子支撑，根据力学分析，分配到单个绝缘子轴向方向的力 $G_1/3=732\text{ N}$ 。

支撑绝缘子受力情况如图4所示。

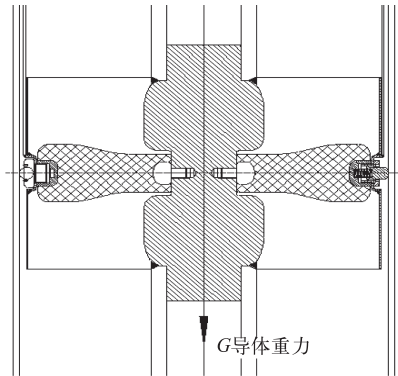


图4 支撑绝缘子受力图

经计算机进行力学仿真分析，支撑绝缘子受力仿真图如图5所示。

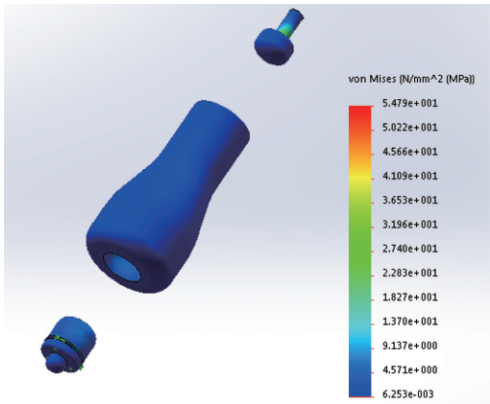


图5 支撑绝缘子受力仿真图

模型中环氧树脂浇铸件的最大等效应力为

8.26 MPa，而环氧树脂浇铸件极限应力为69 MPa，零件的安全系数约为8.35。一般在静载下，对塑性材料可取1.5~2.0，脆性材料取2.0~5.0。安全系数8.35满足设计要求。

综上，环氧树脂浇铸件本体性能基本满足使用要求，但浇环氧树脂浇铸件的极限应力最低要求要不小于85 MPa为宜。

电气性能分析

本文利用计算软件对支撑绝缘子的绝缘性能进行仿真模拟分析。GIL设备结构参数见表3。

表3 GIL结构参数

序号	项目参数	设计值
1	额定电压/kV	550
2	额定电流/A	5 000
3	额定短时工频耐受电压/kV	740
4	额定雷电冲击耐受电压/kV	1 675
5	操作冲击耐受电压/kV	1 300
7	SF6气体最低工作压力（20℃表压）/MPa	0.42
8	导体尺寸/mm×mm	140×20
9	外壳尺寸/mm×mm	508×8
10	绝缘气体相对介电常数	取近似值1
11	环氧树脂相对介电常数	取近似值4

GIL设备技术参数见表4。

表4 GIL技术参数

名称	电场强度允许值/(kV/mm)	备注
绝缘子屏蔽件允许击穿场强	26	在雷电冲击试验电压（峰值）工况下确定
绝缘子表面允许电场强度	13	
支撑绝缘子所用壳体表面允许电场强度	16	
绝缘子内部允许电场强度	3	在额定相电压（有效值）工况下确定

1. 电场仿真分析

绝缘子仿真模型如图6所示。

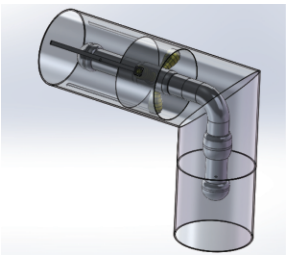


图6 绝缘子仿真模型

用于计算机仿真的电磁仿真软件ElecNet，其软件中设置的参数见表5。

表5 ElecNet软件参数设定

序号	参数	数值	备注
1	绝缘气体相对介电常数	1	取近似值
2	环氧树脂相对介电常数	4	取近似值
3	工作频率/Hz	50	
4	SF ₆ 导热系数/[W/(m·K)]	0.014 1	
5	SF ₆ 比热容/[J/(kg·C)]	665.18	

支撑绝缘子电场及内部仿真的结果如图7、图8所示。

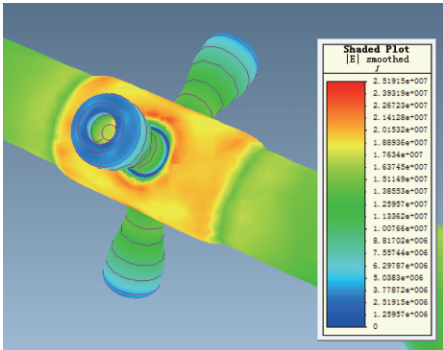


图7 支撑绝缘子仿真结果

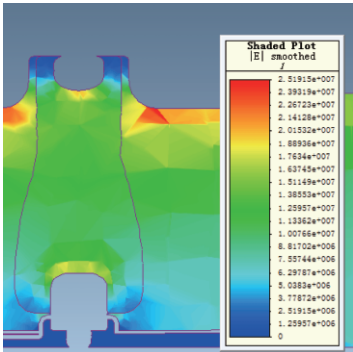


图8 支撑绝缘子内部仿真结果

根据仿真结果，支撑绝缘子表面最大电场值为25.19 kV/mm，小于设计允许值26 kV/mm，满足设计要求。

试验验证

在利用计算机技术对设计的绝缘子进行机械性能分析和电气性能分析后可知，绝缘子的机械强度满足使用要求，电气性能也能满足设计要求，具备样品试制的基础。为验证设计和分析的准确性，通过试验进行验证，GIL样机装配如图9所示。



图9 GIL样机装配图

根据GB/T 22383—2008《额定电压72.5 kV及以上刚性气体绝缘输电线路》标准要求，对该样机进行了绝缘性能测试。检测结果见表6。

表6 检测结果

序号	项目	参数	依据标准	结果
1	工频耐压试验	相对地 740 kV	GB/T 22383—2008 条款6.2.5	符合
2	雷电冲击耐压试验	相对地 1 675 kV	GB/T 22383—2008 条款6.2.4	符合
3	操作冲击耐压试验	相对地 1 300 kV	GB/T 22383—2008 条款6.2.4	符合
4	局部放电 (381 kV)		$P_c \leq 3$	符合

通过电气试验检测，支撑绝缘子绝缘性能满足使用要求。

结束语

本文对GIL中关键部件支撑绝缘子进行了机械性能仿真分析和电气性能仿真分析，在分析结果满足设计条件的前提下，将设计研制的支撑绝缘子进行电气试验验证，绝缘试验检测结果满足要求。机械性能的实际验证有待进一步试验验证。EA

(收稿日期：2021-11-22)

参考文献

[1] 王湘汉，汪泓，邱毓昌．气体绝缘传输线的近期发展动向[J]．高压电器，2008(1)：69-72．
[2] Dirk Kunze，Volker Knierim，王学刚．用于发电中心大规模电力输送的气体绝缘输电线路[J]．中国电力，2007(9)：87-90．
[3] 黎斌．SF₆高压电器设计手册[M]．北京：机械工业出版社，2010．
[4] 阮全荣，谢小平．气体绝缘金属封闭母线输电线路工程设计与实践[M]．北京：中国水利水电出版社，2011．
[5] 李红明，谭其勇，陈战，等．基于激光光声光谱技术的变压器绝缘油故障气体在线监测系统研究[J]．电气应用，2020，39(4)：67-70，96．