

# 断路器复合套管抗弯性能计算方法研究

闫姿姿 张敬涛 薛雯 侯小默 孙立强  
天津平高智能电气有限公司 天津 300300  
DOI: 10.18686/dljsyj.v1i3.1139

**【摘要】**本文以 1100kV 切滤波断路器为研究对象,通过分析断路器的抗弯性能利用 Solidworks 软件建立数学模型,利用静力学分析软件 Workbench 分析得到复合套管的变形情况,最终得到影响套管受力的主要参数,有效指导了高电压断路器支柱套管的设计,根据力学仿真结果设计的复合套管不仅满足断路器的机械特性要求,而且提高了断路器的工作可靠性。最后根据仿真结果投制试验样机进行厂内摸底试验,验证了本文设计的可靠性,该建模与分析方法为今后 1100kV 切滤波断路器的结构设计与功能优化提供了有益帮助。

**【关键词】**1100KV 切滤波用断路器 支柱复合套管 抗弯性能 可靠性

## 引言

1100KV 切滤波器用柱式断路器是三相交流 50Hz 的户外高压开关设备,适用于 128KV 输变电系统的控制和保护;也可用于联络断路及开合电容器组的场合<sup>[1]</sup>。

该断路器采用自能式灭弧原理,开断性能优良,燃弧时间短,电寿命长,操作噪音小。采用绝缘及灭弧性能优异的 SF6 气体作为绝缘灭弧介质,无燃烧、爆炸危险。断路器配有弹簧操动机构,结构简单紧凑,安全可靠。该断路器在出厂前需经过多项型式试验,其中结合特定的工程现场运行工况,需要进行端子静负载试验。端子静负载试验是为了验证在冰、风及连接导体同时作用下断路器能正确地操作。为了证明断路器能够耐受端子静负载,需要对其主要的柱体结构即支柱复合套管的抗弯性能进行计算,以保证产品运行中性能的稳定性和安全性。

本文主要以为国家电网临沂站生产的 1100kV 进行计算,针对 1100kV 柱式断路器的支柱复合套管提出一套完整的抗弯性能计算方法,同时对其特定工程现场的运行工况进行抗弯性能的仿真分析,以验证计算的准确性,从而指导制造厂的断路器静负载计算。柱式断路器尺寸以及现场工况数据为例

## 1 模型结构及具体参数

本文计算采用 1100kV 全复合套管柱式断路器为计算模型,自上而下由 Y 型灭弧组件(灭弧室、电阻、电容)、4 节支柱套管和支架组成。出厂前装配完成的断路器实物如图 1 所示。



图 1 装配完成的 1100kV 柱式断路器

Fig. 1 1100kV Column Circuit Breaker Assembled and Completed

其中,灭弧室套管、电阻套管、电容套管、4 节支柱套管全是由内部采用玻璃钢纤维,外部采用硅橡胶制作成的复合材料加工而成,弹性模量  $0.18 \times 10^5$  MPa,额定机械负荷应力 120MPa;支架为普通钢材,弹性模量  $2.06 \times 10^5$  MPa,屈服应力 235MPa。具体尺寸参数见表 1。

表 1 1100kV 柱式断路器基本尺寸参数

Tab. 1 Basic Dimension Parameters of 1100kV Column Circuit Breaker

分类	整体	Y 型灭弧组件	支柱	支架
重量/t	4	1.7	1.0	0.8
高度/m	18.5	3.5	10	5

4 节支柱套管自上而下分别命名为第一、二、三、四节支柱复合套管,其具体尺寸参数如表 2 所示:

表 2 4 节支柱复合套管尺寸参数  
Tab.2 Size parameters of 4-section  
strut composite casing

支柱复合套管	长度 /mm	下法兰高度/mm	外径/mm	迎风面积/m <sup>2</sup>
第一、二节	2856	150	400	1.14
第三、四节	2200	200	400	0.88

而灭弧室接线板距离 4 节支柱复合套管最下端法兰高度为 12m,灭弧室组件整体迎风面积为 2.5m<sup>2</sup>。有了以上提供的基本参数,便可开展针对支柱复合套管的抗弯性能计算。

## 2 抗弯性能计算

通过断路器的三维结构设计图以及表 1 和表 2 的尺寸参数,可以相应的建立其抗弯性能计算的数学模型。由于四节复合套管支柱之间采用螺栓连接在一起,而四节复合套管是整体均布迎风,风压载荷平均作用在每一节套管上,因此可以将四节复合套管看作一个整体。

由分析可知,第一、二节支柱下法兰胶装距离和绝缘筒内外径是一致的,所以第一、二节支柱的弯曲负荷也是一致的;同理,第三、四节支柱下法兰胶装距离和绝缘筒内外径是一致的,所以第三、四节支柱的弯曲复合是一致的。因此,只需分别计算第二节支柱和第四节支柱的弯曲负荷,由此覆盖第一节支柱和第三节支柱的弯曲负荷。

### 2.1 第一、二节支柱扭矩计算

常风风压按大风风压的 0.25 倍确定。风速  $V = 34\text{m/s}$  的风压载荷,则基本风压为

$$w_0 = V^2 / 1600 = 0.7225\text{kN/m}^2 \quad (2.1)$$

根据《GB5009-2011 建筑结构荷载规范》,垂直于建筑物表面的风荷载标准值,其计算公式为:

$$W_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (2.2)$$

其中:

$W_k$ —风荷载标准值(kN/m<sup>2</sup>)

$\beta_z$ —高度  $z$  处的风振系数

$\mu_s$ —风荷载体型系数

$\mu_z$ —风压高度变化系数

$w_0$ —基本风压(kN/m<sup>2</sup>)

根据标准查表得出, $\beta_z$ 取 1.05, $\mu_s$ 取 0.7, $\mu_z$ 取 1.0。将其代入式 2.2 即得:

$$W_k = 0.735w_0 \quad (2.3)$$

则第二节支柱复合套管大风载荷为:

$$W_k \times (1.14 \times 2 + 2.5) = 2.538\text{kN} \quad (2.4)$$

已知风荷载中心作用高度为 2.856m,则风荷载作用在第二节支柱上的扭矩为:

$$W_{\text{风}} = W_k \times 2.586 = 7.249\text{kNm} \quad (2.5)$$

上式结果可圆整为 7.25kNm。

已知端子静拉力中心在距离第二节支柱复合套管下法兰为 7m,则端子静拉力作用在第二节支柱上的扭矩为:

$$W_{\text{端}} = 5 \times 7 = 35\text{kNm} \quad (2.6)$$

因此,第二节支柱上的总扭矩为:

$$W_1 = W_{\text{风}} + W_{\text{端}} = 42.25\text{kNm} \quad (2.7)$$

### 2.2 第三、四节支柱扭矩计算

与第一、二节支柱扭矩计算方法相同,第四节支柱复合套管大风载荷为:

$$W_k \times [(0.88 + 1.14) \times 2 + 2.5] = 3.47\text{kN} \quad (2.8)$$

已知风荷载中心作用高度为 5m,则风荷载作用在第四节支柱上的扭矩为:

$$W_{\text{风}} = W_k \times 5 = 17.3649\text{kNm} \quad (2.9)$$

上式结果可圆整为 17.4kNm。

已知端子静拉力中心在距离第四节支柱复合套管下法兰为 11m,则端子静拉力作用在第四节支柱上的扭矩为:

$$W_{\text{端}} = 5 \times 11 = 55\text{kNm} \quad (2.10)$$

因此,第四节支柱上的总扭矩为:

$$W_1 = W_{\text{风}} + W_{\text{端}} = 72.4\text{kNm} \quad (2.11)$$

## 3 复合套管支柱总体迎风强度校核

如图 1 所示,由于四节复合套管支柱之间采用螺栓连接在一起,而四节复合套管是整体均布迎风,风压载荷平均作用在每一节套管上,因此可以将四节复合套管看作一个整体,迎风受力简图如图 2 所示,对其承受的风压应力进行计算,实现总体强度校核。

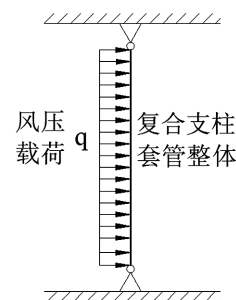


图 2 复合套管支柱整体迎风受力简图  
Fig.4 Brief drawing of overall upwind force on composite casing pillar

由图 2 可知,四节复合套管的总体长度为 2.2m。可以相应作出由于风力作用的内力图,如图 3 所示,

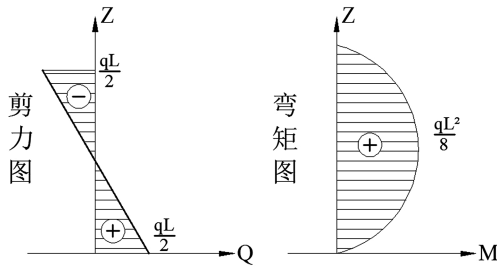


图3 复合套管支柱整体迎风受力内力图

Fig. 3 Internal force diagram of composite casing pillar under integral upwind force

由上述扭矩计算可以计算得到平均作用在复合套管整体的风压载荷为:

$$q = W_k \times \frac{(0.88 + 1.14) \times 2}{(2.856 + 2.2) \times 2} = 0.21(2.12)$$

其受到的剪切力和弯矩可以表示为:  $W_k \times [(0.88 + 1.14) \times 2 + 2.5] = 3.47kN$  (2.13)

$$W_k \times 5 = 17.364kNm \quad (2.14)$$

## 4 仿真分析

通过以上对支柱复合套管受力理论分析,本文选取了符合要求的初始力值对 1100kV 断路器进行了模型分析,利用 Solidworks 进行三维模型的建立,并以 Parasolid 图形文件将模型导入 Workbench 中对复合套管进行静力学分析。仿真结果表明该复合套管变形合理,满足设计要求,有利于提高断路器分合闸动作的稳定性及可靠性。

### 4.1 模型的建立及网格划分

为简化计算,将四节支柱进行合并,通过 Solidworks 三维软件建构模型。模型导入 Workbench 软件后,在 Mesh 界面对其进行网格划分,由于网格的划分质量对分析结果的精确性有直接影响,因此本文采用 medium 方式进行网格划分,网格划分后的模型如图 4 所示。

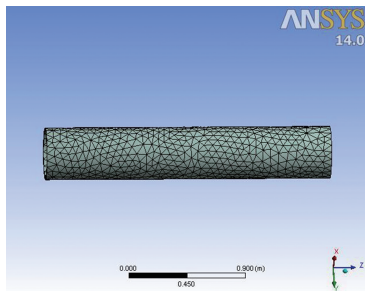


图4 网格划分后的模型

Fig. 4 Model of mesh generation

## 【参考文献】

- [1] 邱宁,程永峰,钟珉等. 1000kV 特高压交流电气设备抗震研究进展与展望[J]. 高电压技术,2015,5(41):1732-1739.
- [2] Girodet A. Seismic behavior of "CANDLE" type SF6 outdoor circuit breakers and associated SF6 insulated current transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1989,4(4):2100-2108.

## 4.2 施加约束和载荷

根据本文第 2、3 节的分析,确定支柱套管的受力情况。由简化分析可知,支柱套管受主要受迎风分布的均布载荷 F 和平均作用在复合套管整体上的弯矩组成。因此,本文将此模型进行简化,利用 Workbench 进行静力学分析求解处理。

## 4.3 计算结果

根据前述分析,本文所求解的支柱套管受力最大值位于支柱顶端位置,求得的变形结果如图 5 所示。

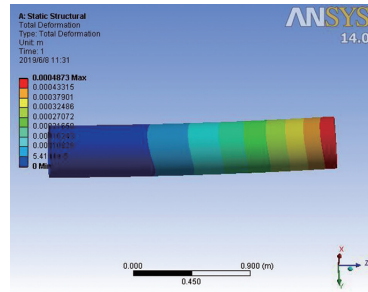


图5 模型变形求解结果

Fig. 5 Result of model deformation

由变形结果可知,套管受力最大值位于支柱顶端处,此处变形最大,此时的整体变形为  $4.843e-4m$ ,符合 34m/s 风压载荷下的变形要求,与理论计算吻合。

## 5 结论

本文通过对 1100kV 切滤波用断路器进行受力分析,针对产品工程现场运行情况,对其支柱复合套管的抗弯性能进行计算,得到影响支柱套管弯曲性能的均布载荷 F 和作用其上的弯矩值。之后通过 Solidworks 软件对断路器进行三维模型建立,为简化计算过程,将四根套管看作一个整体,之后将模型导入 Workbench 软件进行静力学计算。经实验验证,本断路器支柱套管变形量符合正常变形区间,本断路器最终被应用于临沂站。该设计方法原理简单,有效指导了支柱复合套管的抗弯性能设计,为今后高电压切滤波断路器的设计与优化提供了有益帮助。