

有限元分析在特高压换流阀抗震设计中的应用

朱新华¹, 黎小林², 肖晋¹, 黄莹², 张建¹, 吕金壮²

(1. 许继柔性输电系统公司, 河南 许昌 461000; 2. 南方电网技术研究中心, 广州 510623)

摘要: 建立换流阀有限元模型建立, 运用有限元分析方法对云广工程换流阀进行模态分析, 结果表明: 采用悬吊结构设计的换流阀在地面水平加速度峰值 0.25g, 地面垂直加速度峰值 0.15g 的地震波作用下是安全可靠的, 云广工程换流阀设计满足抗地震要求。

关键词: 换流阀; 有限元分析; 抗震设计

Application of FEA in Seismic Design of UHV Thyristor Valves

ZHU Xinhua¹, LI Xiaolin², XIAO Jin¹, HUANG Ying², ZHANG Jian¹, LÜ Jinzhuang²

(1. XJ Flexible Transmission System Corporation, Xuchang, Henan 461000, China;

2. CSG Technology Research Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: Based on the model established in this paper for the thyristor valve, the mode analysis on the thyristor valve of Yunnan-Guangzhou UHVDC project is carried out with Finite Element Analysis method, and the results show that the valve with suspending structures is on the safe side under the action of earthquake wave with 0.25g of maximum horizontal acceleration and 0.15g of maximum vertical acceleration, and thus the design of the thyristor valve of Yunnan-Guangzhou UHVDC project meets antiseismic requirement.

Key words: thyristor valves; Finite Element Analysis; antiseismic design

我国电网的骨干网架以 500 kV 交流和 ± 500 kV 直流系统为主^[1]。由于直流输电在输电稳定性方面有着显著的优越性, 大容量输电技术的重心逐渐从交流转移到直流上来^[2]。随着高压直流晶闸管阀和高压直流输电技术的发展, 越来越多的输电线路采用高压直流进行电力传输。直流输电在我国电网构成中、特别是“西电东送”和“北电南送”中发挥巨大作用^[3]。

换流阀是高压、特高压直流输电 (HVDC) 系统的关键设备, 由许多单个器件模块化单元串联而成, 即由一系列串联起来的晶闸管组成的三相整流桥。由于换流阀是高压、特高压直流输电中的关键设备, 而且价格非常昂贵, 为了保证换流阀在一定地震条件下不损坏, 目前国际上先进的换流阀技术在结构上都是采用柔性悬吊结构设计。

1 换流阀有限元模型建立

换流阀悬吊部分的作用是将阀组件、底部屏蔽罩通过绝缘子机械的串接在一起, 组成一个水平方

向可任意摆动的柔性结构, 以满足抗震要求。由于阀内各层电位不同, 为了保证层间的空气绝缘距离和爬电距离, 采用具有足够长度和特殊外形的层间悬吊绝缘子。它们具有足够的机械强度和良好的电气绝缘性能。阀内上下两个组件由绝缘铰链联接, 这样当阀体摆动时, 组件之间总是相互平行的, 并始终平行于水平面。这样就可以将换流阀的阀塔简化为一个钟摆的模型, 如图 1 所示。但是考虑到组件层间连接也是通过连接节点的柔性连接, 其实际简化模型如图 2 所示。

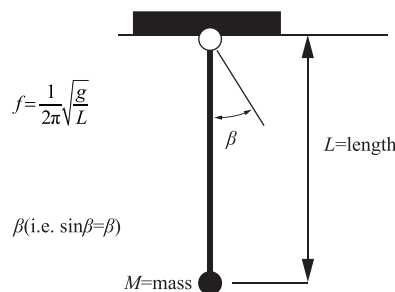


图 1 钟摆模型

Fig. 1 Pendulum Model

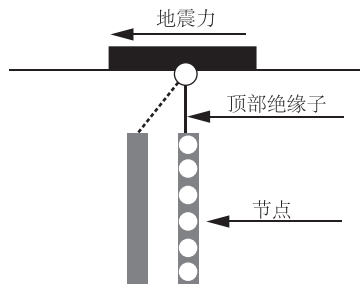


图2 换流阀实际简化模型

Fig. 2 Simplified Model of Thyristor Valve

云广工程的换流阀采用四层单列的形式，换流阀的顶部和底部分别装有屏蔽罩，如图3所示。换流阀单层设计质量为1.5 t，顶部通过U形螺栓及固定件与阀厅顶部的悬吊钢梁连接在一起，阀组件层与层之间通过6根直径为22 mm悬吊绝缘子及固定连接件连接在一起，绝缘子与上层阀组件的连接形式和顶部的连接形式一致，其与下层阀组件通过圆柱销连接，选用铰链单元来模拟实际情况，选取阀塔水平面长轴方向为笛卡尔坐标系Z轴，水平面短轴方向为X轴，高度方向为Y轴，建立了换流阀的有限元模型，如图4所示。



图3 云广工程换流阀

Fig. 3 Thyristor Valve of Yunnan-Guangzhou HVDC Project

2 换流阀抗震分析

2.1 换流阀模态分析

模态分析是研究结构动力特性一种近代方法，是系统辨别方法在工程振动领域中的应用。模态是机械结构的固有振动特性，每一个模态具有特定的

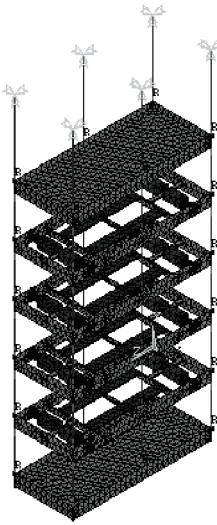


图4 换流阀有限元模型

Fig. 4 FEA Model of Thyristor Valve

固有频率、阻尼比和模态振型。通过模态分析方法搞清楚了结构物在某一易受影响的频率范围内各阶主要模态的特性，就可能预言结构在此频段内在外部或内部各种振源作用下实际振动响应。

本文分析4层单列结构换流阀，共有4个阀层组件，而每个阀层组件在空中有3个自由度，在考虑到横向运动、纵向运动和空间扭转运动，共取20阶振型，见图5—图8。从计算结果可以看出：换流阀悬吊结构前12阶振型均为阀层组件的运动，相对应的结构频率较低，且基本相同，其中第3阶、8阶、11和12阶振型是阀层组件的空间扭转运动，其余各阶振型为阀层组件的横向运动和纵向运动。从第16阶振型开始，阀层组件基本不发生运动，只有悬吊绝缘子在空间不同方位上的摆动，相对应的结构频率较高。

2.2 地震波数据

虽然换流阀结构对称，但是纵向和横向的长度并不一致，同时考虑到实际地震波传播方向的不确定性，应对上述两个方向分别进行动力学特性分析，从而比较全面地获取换流阀地震响应特性。整个时程内，换流阀悬吊结构上作用自重，本文仅对垂直方向、水平纵向上施加0~19 s的地震波。

换流阀安全运行时假定的地震条件为：地面水平加速度峰值0.25 g，地面垂直加速度峰值0.15 g。参照GB50011—2001由表1可知，换流阀水平方向抗震设防烈度为8度，垂直方向抗震设防烈度为7度。

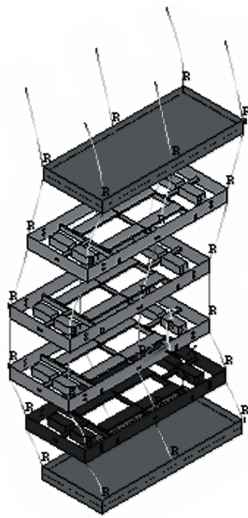


图 5 阀层横向运动

Fig. 5 Transverse Motion of Valve Layer

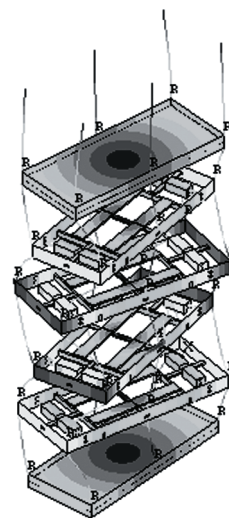


图 7 阀层空间扭转

Fig. 7 Torsion of Valve Layer

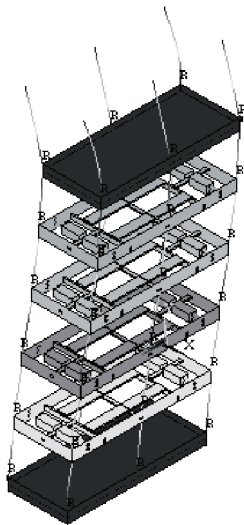


图 6 阀层纵向运动

Fig. 6 Vertical Motion of Valve Layer

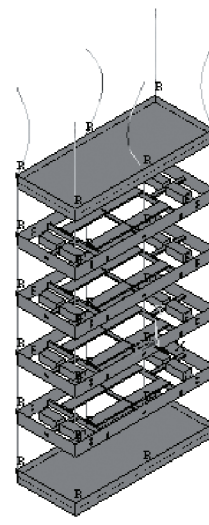


图 8 顶部绝缘子高频振动

Fig. 8 High Frequency Vibration of Top Insulators

表 1 抗震设防烈度与地震加速度

Tab.1 Seismic Fortification Intensity and Seismic Acceleration

地震加速度	抗震设防烈度
0.05g	6
0.10g, 0.15g	7
0.20g, 0.30g	8
0.40g	9

本文对天津地震波以 0.1 s 的时间间隔离散后，按照假定地震条件对其进行适当的处理，获取分析

所需的地震数据，其波形如图 9、图 10 所示。

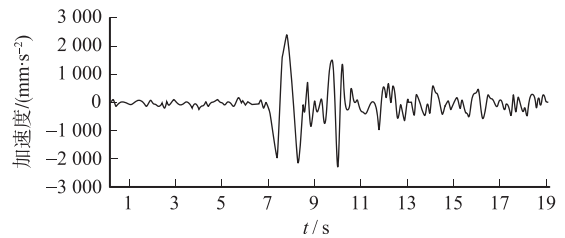


图 9 水平方向地震波

Fig. 9 Horizontal Seismic Wave

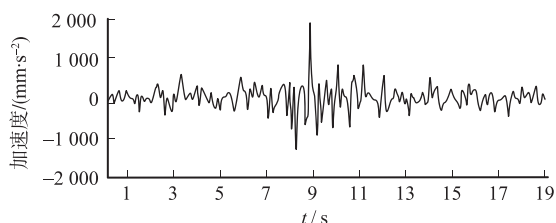


图 10 垂直方向地震波

Fig. 10 Vertical Seismic Wave

2.3 换流阀在地震作用下响应

对换流阀有限元模型施加地震波, 系统阻尼取 2%, 进行瞬态动力学分析, 得到换流阀悬吊绝缘子的位移峰值, 如表 2 所示。

表 2 换流阀悬吊绝缘子位移峰值

Tab.2 Displacement Peak Value of Insulators

位移方向	各层位移/mm					
	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层	第六层
X方向最大值	0.20	0.12	0.14	0.17	0.20	0.21
X方向最小值	0.18	0.10	0.10	0.11	0.17	0.17
X方向幅值	0.02	0.02	0.04	0.06	0.03	0.04
Y方向最大值	-4.37	-11.56	-16.90	-19.82	-23.07	-25.06
Y方向最小值	-5.56	-14.26	-20.20	-23.83	-28.87	-31.56
Y方向幅值	1.19	2.70	3.30	4.00	5.80	6.50
Z方向最大值	44.86	105.54	134.59	132.03	140.05	130.64
Z方向最小值	-50.25	-109.84	-116.72	-75.46	-70.49	-69.18
Z方向幅值	95.11	215.38	251.31	207.49	210.54	199.82

从表 2 可以看出, 悬吊绝缘子在垂直方向位移逐渐增加, 最大变形量为 6.5 mm, 水平短轴方向由于没有地震波作用, 故变形量很小, 水平长轴方向由于地震波作用, 最大位移发生在第三层上, 变形量为 251.31 mm。在地震载荷作用下三个主要方位上的位移时程响应曲线峰值来临时刻略滞后于输入地震波的峰值时刻, 各自走势基本趋于一致, 峰值大小和峰值来临时刻有所差异, 主要是换流阀采用悬吊结构设计的缘故。

2.4 顶部悬吊绝缘子受力分析

从换流阀结构中可以看出, 顶部的悬吊绝缘子承受着最大的载荷, 在地震中属于最危险的零件, 故对其进行受力分析, 验证悬吊绝缘子在地震作用下是否发生破坏。顶部悬吊绝缘子的实际模型如图 11 所示, 简化后并进行受力分析, 结果如下:

顶部悬吊绝缘子承受最大应力为 41.089 MPa,

远远小于 315.78 MPa 许用应力, 故可以得出悬吊绝缘子在地震条件下是安全的。

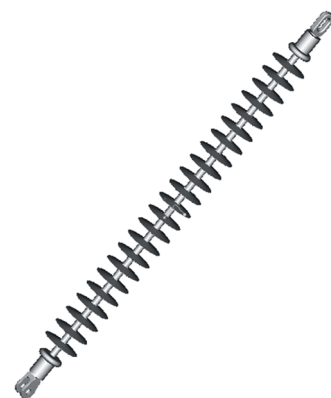


图 11 悬吊绝缘子实际模型

Fig.11 Actual Model of Insulator

3 结论

换流阀所采用的悬吊设计是一种减震结构形式, 在地震波的激励下, 由于悬吊绝缘子和阀体之间的铰链连接, 换流阀阀层发生空间摆动, 很大程度上吸收了地震波的能量, 降低了换流阀结构对地震的响应, 从而降低了悬吊绝缘子的瞬时应力的峰值, 增加了换流阀结构的抗震安全度。通过对云广工程换流阀进行抗震分析, 其结果表明: 采用悬吊结构设计的换流阀在地面水平加速度峰值 0.25g, 地面垂直加速度峰值 0.15g 的地震波作用下是安全可靠的, 换流阀设计满足抗震设计要求。

参考文献:

- [1] 谷定燮. 我国发展特高压输电的前景[J]. 高电压技术, 2002, 28(3): 28-31, 40.
GU Dingxie. The Prospect of Developing UHV Transmission System in China [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(3): 28-31, 40.
- [2] 王红梅. 特高压直流输电技术及其应用研究[D]. 华北电力大学, 2006.
- [3] 张广洲. 高压直流输电工程电磁环境研究[D]. 华中科技大学, 2006.

收稿日期: 2009-07-16

作者简介:

朱新华(1976), 男, 河南周口人, 学士, 从事特高压换流阀结构设计工作 (e-mail) xinhuazh@xjgc.com;

黎小林(1963), 男, 湖南邵阳人, 高级工程师, 硕士, 从事直流输电和 FACTS 方面的研究;

肖晋(1981), 男, 汉, 山西大同人, 硕士, 从事特高压换流阀结构设计工作。