

# 地震波作用下高压隔离开关的动力响应分析\*

徐国胜<sup>1</sup>, 朱宾勤<sup>2</sup>, 朱全军<sup>3</sup>, 肖伟民<sup>4</sup>, 邬玉斌<sup>4</sup>

(1. 云南电网公司, 云南 昆明 650011; 2. 云南省电力设计院, 云南 昆明 650051; 3. 国网智能电网研究院, 北京 100124;  
4. 北京市劳动保护科学研究所 国家环境保护城市噪声与振动控制工程技术中心, 北京 100054)

**摘要:** 利用试验和数值仿真的方法, 对高压隔离开关的模态动力学特征及其在水平与竖向地震波作用下的动力时程响应特征进行了研究。结果表明, 隔离开关的低阶共振频率与地震波较为接近, 容易受到地震激励力的影响。在IX度罕遇地震烈度条件下, 其瓷柱根部区域可能会因为最大弯矩超出设计要求而发生断裂失效, 从而导致隔离开关设备的整体失效。经计算分析, 采用安装隔振器的方法, 可以降低瓷柱根部区域的最大弯矩值, 从而保证结构的抗震需求。

**关键词:** 电力设备; 隔离开关; 模态分析; 地震波作用; 动力时程分析

**中图分类号:** TV352.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2014)03-0467-09

## 0 引言

变电站高压设备大多具有较低的固有频率, 部分低阶固有频率低于 10 Hz, 与地震波频率接近。因此, 在地震发生时, 高压设备通常会在地震波作用下发生共振, 从而引发设备的破坏和失效 (Jean-Bernard, 2007; 韩军科等, 2008; 卢智成等, 2009)。

近年来, 地震灾害已在国内外许多地区造成电力设备损坏事故, 并引发了大面积停电。1994 年美国 Northridge 地震中, 230 kV 与 550 kV 变电站的电气设备严重破坏 (ASCE - TCLEE, 1997)。1995 年日本阪神地震造成 48 座变电站设备损毁, 100 万户停电 (日本建筑学会等, 1998)。1999 年土耳其 Kocaeli 地震中, 多个变电站变压器、开关设备受到不同程度破坏 (AIJ *et al.*, 2001)。2000 年日本新泻西部地震造成 500 kV 日野变电站瓷柱断裂和 11 座变电站受损<sup>①</sup>。2008 年汶川地震造成 110 kV 及以上变电站停运 90 座, 线路停运 181 条, 电力损失负荷 685 万 kW, 高压设备损毁严重 (谢强, 2008)。

为了有效避免地震灾害对高压设备的不良影响, 需要对地震波作用下设备的动力特性进行深入研究。然而, 当前变电站高压设备模态与动力时程特性的研究工作仍然不够充分, 这使得高压

设备的抗震改进工作存在一定困难。鉴于此, 本文主要针对地震波作用下隔离开关的动力特性进行研究, 通过模态试验和数值模拟分析, 掌握此类设备的模态动力特性和地震激励下的动力时程响应特点, 从而为改进此类设备抗震性能和抗震措施提供有效依据和指导。

## 1 模态动力学特性分析

### 1.1 基于特征系统理论的模态分析方法

特征系统理论是一种基于多输入多输出的时域模态识别理论方法, 最早由美国航天局 Langley 研究中心提出 (张枢文等, 2007; Juang, Pappa, 1985)。根据这一理论和实际分析要求, 本次模态计算分析模型如下:

隔离开关结构的系统振动方程式:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{f}(\mathbf{q}, t) = \mathbf{B}_f \mathbf{u}(t). \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$  分别为系统的质量阵, 阻尼阵和刚度阵,  $\mathbf{B}_f$  为输入分配矩阵, 将式 (1) 写成状态方程的形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}. \end{cases} \quad (2)$$

\* 收稿日期: 2014-01-04.

① 佐藤浩章, 佐藤清隆, 当麻纯一. 2001. 2000 年鸟取西部地震变压器被害要因的究明. 日本电力中央研究所报告 NO. U01023.

其中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为系统矩阵、控制矩阵和测量矩阵, 其表达式如下:

$$x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}B_f \end{bmatrix}. \quad (3)$$

若结构没有发生变化, 则系统矩阵和控制矩阵为常数矩阵, 由此可得一组一阶常微分方程组, 根据初始条件积分可得:

$$x(t) = e^{A(t-t_0)} + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)} Bu(\tau) d\tau, \quad t \geq t_0. \quad (4)$$

如果使用等间隔采样, 再加之零阶保持在一个采样间隔内采样值不变的特性, 可得:

$$x[(k+1)T] = e^{AT}x(kT) + \int_0^T e^{A_s} ds Bu(kT). \quad (5)$$

这样就可以得到系统离散时刻的脉冲响应矩阵式:

$$h(0) = CB, h(T) = CAB, \dots, h(k) = CA^k B. \quad (6)$$

系统的 Hankel 矩阵为

$$H(k) = \begin{bmatrix} h(k) & h(k+1) & \dots & h(k+s) \\ h(k+1) & h(k+2) & \dots & h(k+s+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h(k+r) & h(k+r+1) & \dots & h(k+r+s) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

将  $H(0)$  做奇异值分解, 选取前  $r$  个最大奇异值对系统进行缩减, 最终可得系统的脉冲响应函数为

$$h(k) = I_p^T P_r D_r^{-1/2} [D_r^{-1/2} P_r^T H(1) Q_r D_r^{-1/2}]^k D_r^{-1/2} Q_r^T I_m. \quad (8)$$

其中,  $P_r$ 、 $Q_r$  为正交矩阵中对应前  $r$  个最大奇异值的 SVD 分解的列,  $D_r$  为  $r$  个最大奇异值组成的对角矩阵,  $I_p$  为  $p$  阶单位矩阵,  $p$  为输出向量的维数。

由此可得, 系统的最小实现可采用:

$$\begin{cases} A = D_r^{-1/2} P_r^T H(1) Q_r D_r^{-1/2}, \\ B = D_r^{-1/2} Q_r^T I_m, \\ C = I_p^T P_r D_r^{-1/2}. \end{cases} \quad (9)$$

通过上述模态分析方法进行系统实现, 就可以求解系统的模态参数, 从而直接对系统矩阵  $A$  进行特征分解, 得到动力学系统的固有频率和阻尼比。

## 1.2 模态试验分析

为了准确掌握隔离开关结构的模态动力特性, 本文采用力锤激励、多点输入输出的方法进行隔离开关结构模态试验。某隔离开关模态试验在实际设备现场进行, 其结构图纸和分析模型如图 1 所示。

对隔离开关结构进行模态试验进行数据分析, 得到前 6 阶模态的主要频率特征, 如表 1 所示, 其结构振型如图 2 所示。

表 1 隔离开关结构前 6 阶模态的主要频率特征

Tab. 1 The main natural frequency characteristic of the first six order experimental modal of the disconnector

阶次	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
固有频率/Hz	2.1	3.2	4.6	7.7	8.1	9.7

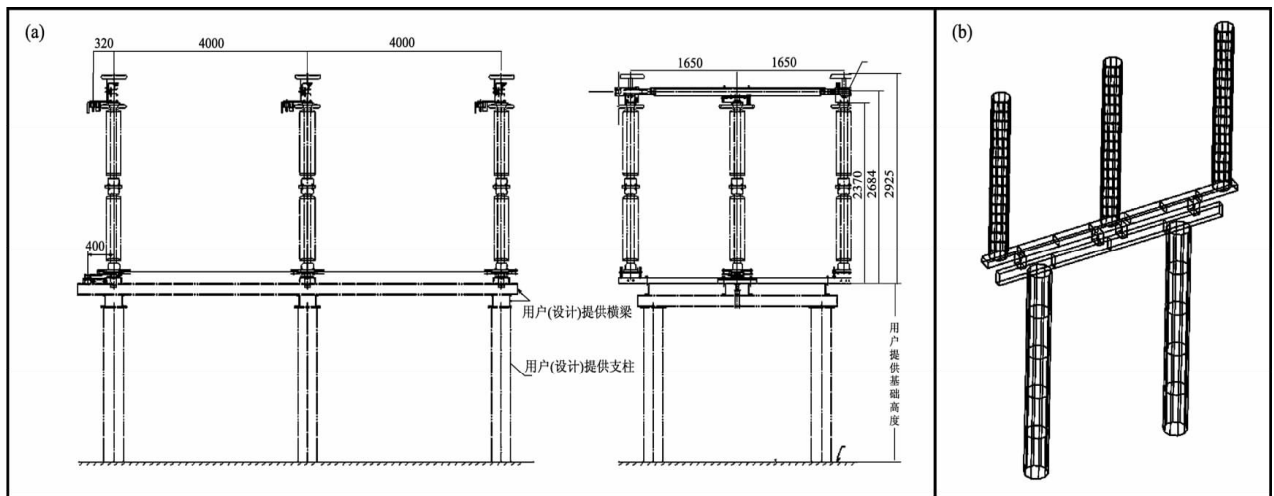


图 1 隔离开关的结构图纸 (a) 和分析模型 (b)

Fig. 1 Structure drawing (a) and analyzing model (b) of the disconnector

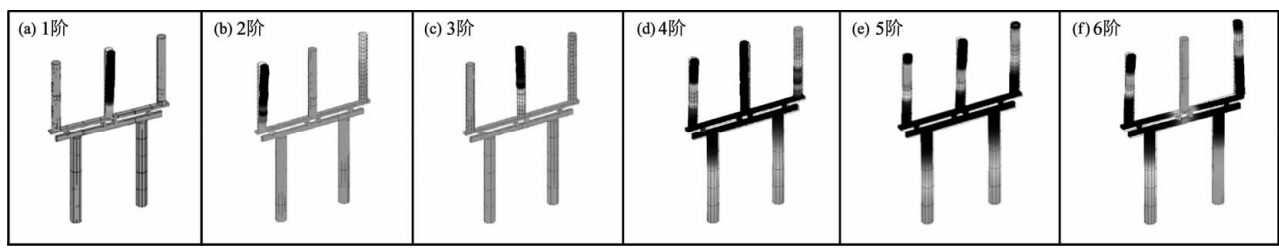


图 2 隔离开关模态试验分析的前 6 阶振型

Fig. 2 The first six order numerical modal shapes in the modal test anglysis of disconnector

1.3 结构模态计算与验证

利用有限元模型计算方法对隔离开关设备的模态特征进行分析，可以得到前 6 阶固有频率的计算结果，如表 2 和图 3 所示。

表 2 隔离开关模拟计算的固有频率  
Tab. 2 Natural frequency of the first six order  
experimental modal of the disconnector

阶次	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
固有频率/Hz	2.2	3.5	4.8	7.8	8.2	10.3

计算结果显示，模态试验与仿真结果具有较好的一致性，试验达到了预期效果。模态分析也揭示了隔离开关易受地震影响的重要原因：一方面，隔离开关的前 6 阶模态处于 10 Hz 以下的低频区域，当该设备处于地震 II 类区域或相近类别的场地时，

会因为场地传递的地震波频率与设备频率相近 (Jean-Bernard, 2007；建筑抗震设计规范, 2010)，而在地震时出现设备结构共振并引发失效。另一方面，隔离开关的低阶模态以弯扭变形为主，在地震时瓷柱根部区域和连接位置容易出现应力集中，当地震烈度较高时，这些位置会逐渐发生塑性或脆性变形，从而引发失效。

2 地震波作用下隔离开关的时程动力响应分析

从近年来地震现场户外高压设备的破坏情况来看，高压隔离开关的主要破坏区域集中在瓷柱根部区域 (谢强, 2008；AIJ *et al.*, 2001；日本建筑学会等, 1998；ASCE – TCLEE, 1997)<sup>①</sup>。因此，

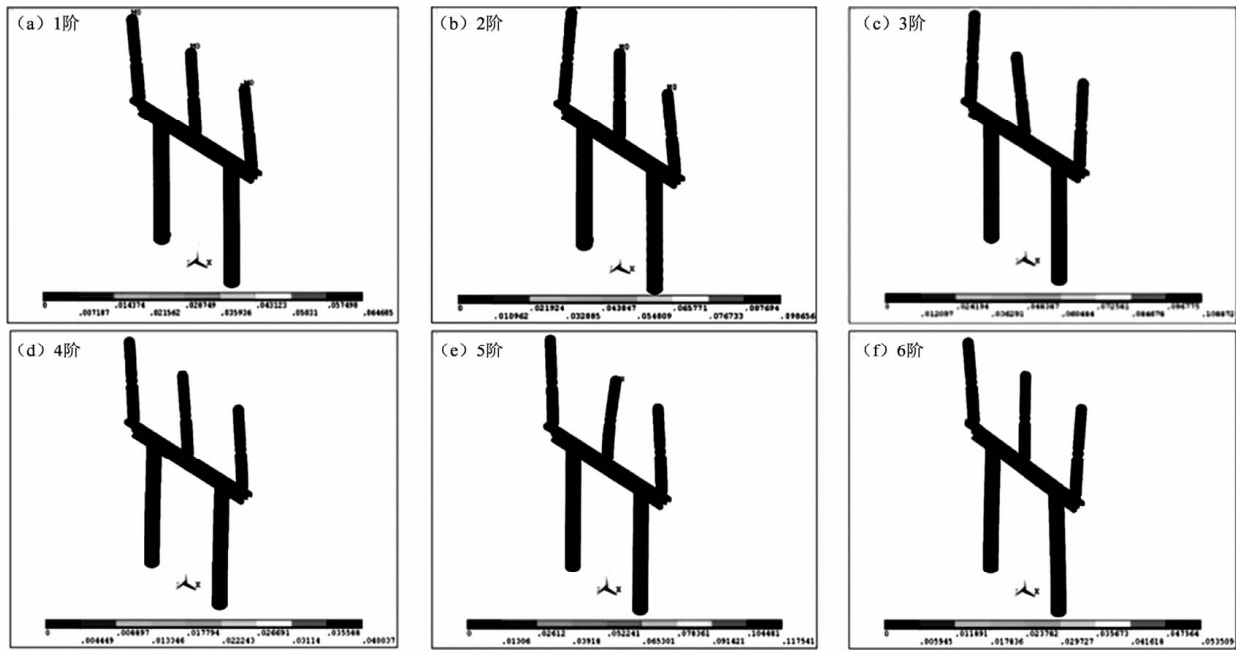


图 3 隔离开关的前 6 阶模态振型计算结果

Fig. 3 Calculation results of the first six order numerical modal shapes of the disconnector

① 佐藤浩章，佐藤清隆，当麻统一. 2001. 2000 年鸟取西部地震变压器被害要因的究明. 日本电力中央研究所报告 NO. U01023.

因此,在研究地震波作用对设备的影响时,需要重点关注瓷柱根部最大应力,即地震作用下瓷柱根部最大弯矩。

在地震作用下,高压隔离开关的瓷柱顶部会出现较大的位移,这可能引发瓷柱柱状结构的碰撞和断裂破坏,因而也需关注高压隔离开关结构顶部的最大位移。

为了有效计算隔离开关在地震波作用下的时程动力响应,本文在上述模态试验与模拟验证基础上,建立了地震时程计算的有限元模型(图4)。模型的本体、支座和支架利用实体单元构建,主刀和地刀利用质量单元构建,隔离开关之间的连接法兰根据《电力设施抗震设计规范》(2013)构建,其结构等效为弯曲刚度与胶装部位法兰弯曲刚度相同的圆形截面进行模拟,计算公式如下:

$$K_c = \frac{6.54d_c h_c^2}{t_e} \times 10^7. \quad (10)$$

其中,  $d_c$  为瓷柱胶装部位外径,  $h_c$  为瓷柱与法兰胶装高度,  $t_e$  为法兰与瓷柱之间的胶装厚度。在隔离开关有限元模型中,混凝土立柱底部采用全约束固定边界条件,即三方向位移 ( $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ ) 和转角 ( $ROT_x$ ,  $ROT_y$ ,  $ROT_z$ ) 为0。

为了准确掌握隔离开关在强地震中随时间变化的动力响应情况,笔者采用时程分析法进行地震响应分析,分别以阪神地震波和 El Centro 地震波作为数值模拟计算的输入载荷,如图5所示。隔离开关按抗震设防烈度Ⅷ度进行时程分析,地震波的计算输入参数如表3所示。

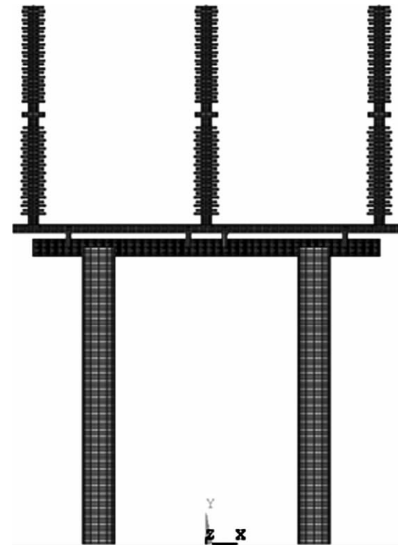


图4 隔离开关的动力时程计算有限元模型  
Fig.4 Finite element model of dynamic time history calculation of the disconnector

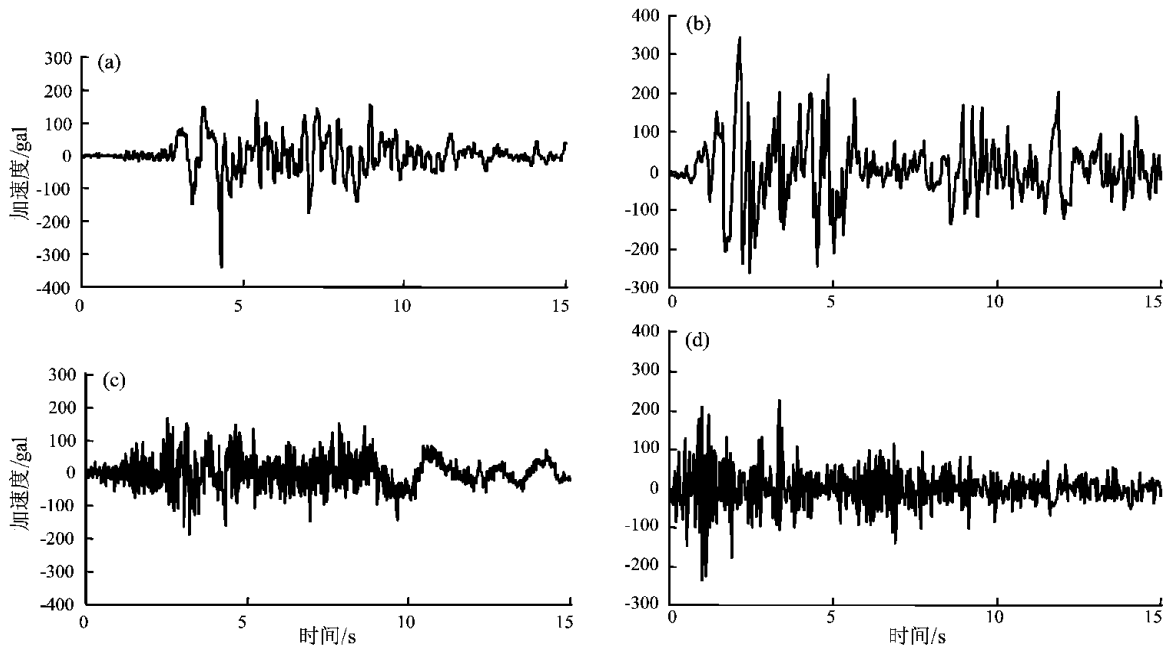


图5 输入地震波的水平向和竖向时程曲线

(a) 阪神地震波(水平向); (b) El Centro 地震波(水平向); (c) 阪神地震波(竖向); (d) El Centro 地震波(竖向)

Fig.5 Horizontal and vertical time history curves of the imported earthquake wave

(a) Kobe earthquake wave (horizontal); (b) El Centro earthquake wave (horizontal); (c) Kobe earthquake wave (vertical); (d) El Centro earthquake wave (vertical)

表 3 地震波的作用参数  
Tab. 3 Parameter of earthquake wave

地震作用等级	加速度时程最大值/gal	特征周期/s	场地类别
Ⅸ度多遇地震	140	0.35	Ⅱ
Ⅸ度罕遇地震	620	0.35	Ⅱ

根据上述隔离开关模态分析可知，隔离开关低阶模态的振型弯曲特征明显，瓷柱根部区域应力集中较其他区域更为严重，因而本文主要关注隔离开关瓷柱根部区域的地震响应情况。对结构输入水平与竖向地震波并计算，可以得到隔离开关在地震波作用下的时程响应特征。

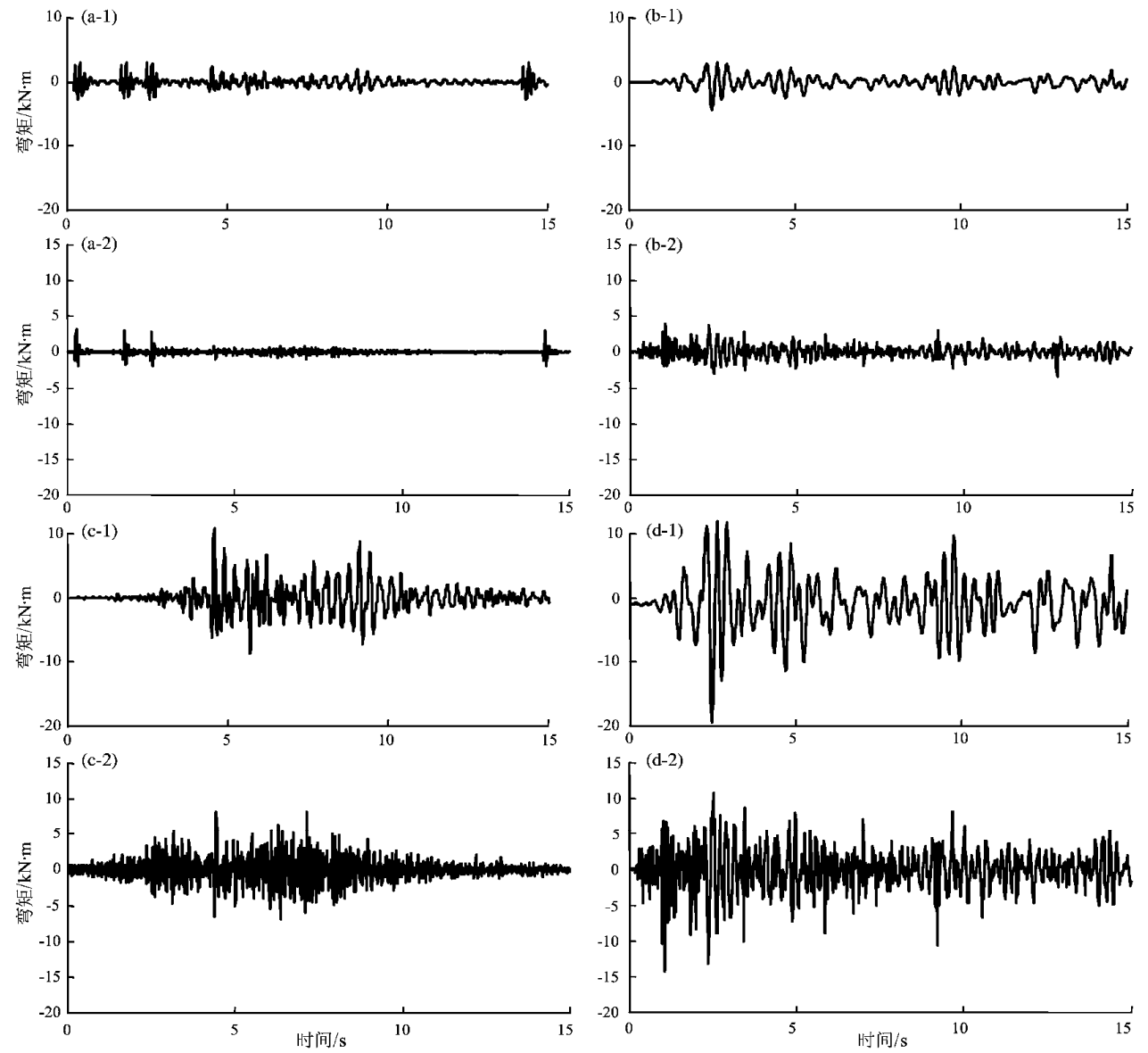


图 6 不同强度水平和竖向地震波作用下的瓷柱根部弯矩时程响应曲线  
(a-1) 阪神地震波 (140 gal) 水平作用; (b-1) El Centro 地震波 (140 gal) 水平作用; (a-2) 阪神地震波 (140 gal) 竖向作用; (b-2) El Centro 地震波 (140 gal) 竖向作用; (c-1) 阪神地震波 (620 gal) 水平作用; (d-1) El Centro 地震波 (620 gal) 水平作用; (c-2) 阪神地震波 (620 gal) 竖向作用; (d-2) El Centro 地震波 (620 gal) 竖向作用

Fig. 6 Time history curve of bending moment of porcelain column insulator under the different horizontal and vertical earthquake wave  
(a-1) under the horizontal Kobe earthquake (140 gal); (b-1) under the horizontal EI Centro earthquake (140 gal); (a-2) under the vertical Kobe earthquake (140 gal); (b-2) under the vertical EI Centro earthquake (140 gal); (c-1) under the horizontal Kobe earthquake (620 gal); (d-1) under the horizontal EI Centro earthquake (620 gal); (c-2) under the vertical Kobe earthquake (620 gal); (d-2) under the vertical EI Centro earthquake (620 gal)

如图 6 所示,从地震响应的计算结果可以看出,隔离开关在阪神地震波和 El Centro 地震波作用下表现出相应的时程响应特征。在 IX 度多遇地震条件下,隔离开关处于弹性变形阶段,其结构动力响应曲线的幅值较小;而在 IX 度罕遇地震作用下,其结构响应曲线的幅值明显增加。

表 4 显示了隔离开关的地震响应时程分析结果。根据本设备支柱绝缘子的设计要求,瓷柱的破坏弯矩为  $20 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

从时程分析结果来看,在 IX 度多遇地震(加速度峰值  $140 \text{ gal}$ )条件下,隔离开关各部分仍具有足够的刚度,可以保证设备的使用要求;但在 IX 度罕遇地震(加速度峰值  $620 \text{ gal}$ )条件下,根

表 4 隔离开关的地震响应时程分析结果

Tab. 4 Seismic response time history analysis of the disconnector

波形	地震波 加速度 峰值/gal	瓷柱顶部最大 位移/mm		瓷柱根部最大 弯矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$	
		水平向	竖向	水平向	竖向
阪神地震波	140	15.7	13.5	3.135	3.051
	620	42.9	39.6	10.958	8.239
El Centro 地震波	140	18.2	16.8	4.297	3.968
	620	76.8	67.3	18.602	14.326

据《电力设施抗震设计规范》(2013),瓷柱承受的最大弯矩不应大于  $20 \text{ kN} \cdot \text{m} / 1.67$ ,而隔离开关瓷柱的根部最大弯矩则已接近或超出相关设计要求,进入塑性或脆性变形的危险状态,随时可能发生破坏和失效。因此,在此种情况下应采取必要措施,阻止地震能量向瓷柱区域传递,保证设备的安全平稳运行。

为此,考虑在隔离开关横梁位置安装金属橡胶隔振器。如图 7a、b 所示,在隔离开关 4 个横梁位置,每个位置分别安装 2 个水平向隔振器和 2 个竖向隔振器,并采用 combin14 单元模拟阻尼器减震效果。隔离开关的混凝土立柱底部仍采用全约束固定边界条件,即三方向位移( $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ )和转角( $ROT_x$ ,  $ROT_y$ ,  $ROT_z$ )为 0。隔振器的滞回曲线如图 8 所示。

完成金属橡胶隔振器的建模安装后,在 IX 度罕遇地震条件下进行隔离开关的地震响应时程计算,得到隔离开关瓷柱根部的弯矩时程响应曲线,如图 9 所示。

表 5 显示了安装隔振器后的隔离开关地震响应时程分析结果。从时程分析结果来看,在 IX 度罕遇地震(加速度峰值  $620 \text{ gal}$ )条件下,隔离开关瓷柱最大弯矩比安装隔振器前明显下降,满足最

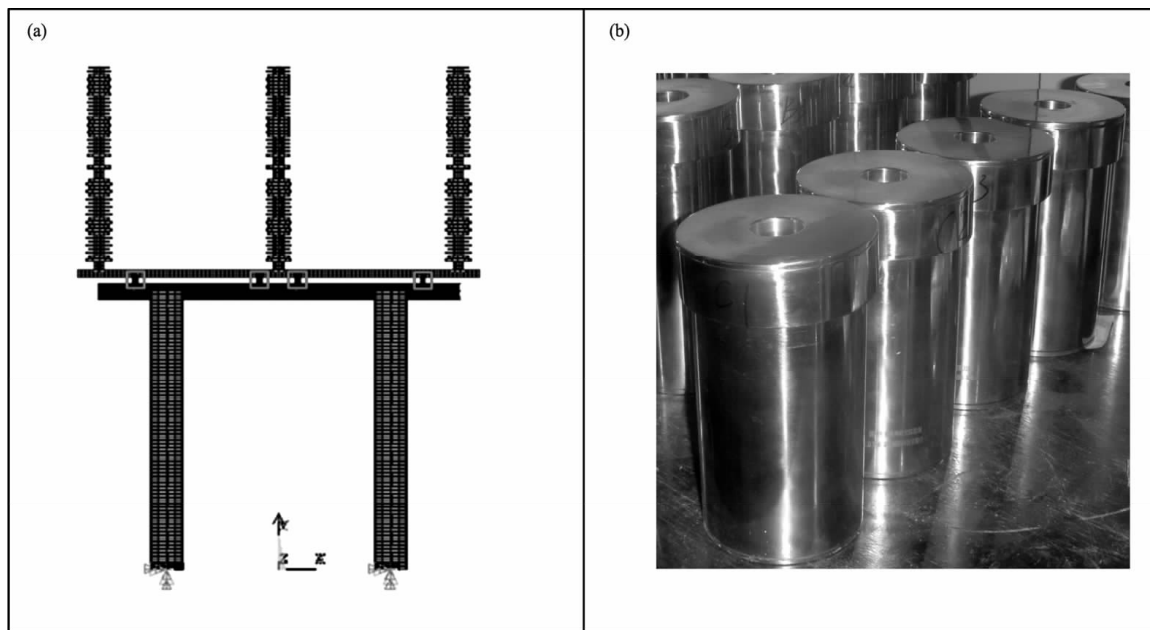


图 7 隔振器安装位置 (a) 与实物样品 (b)

Fig. 7 Installation position (a) and sample (b) of vibration isolators

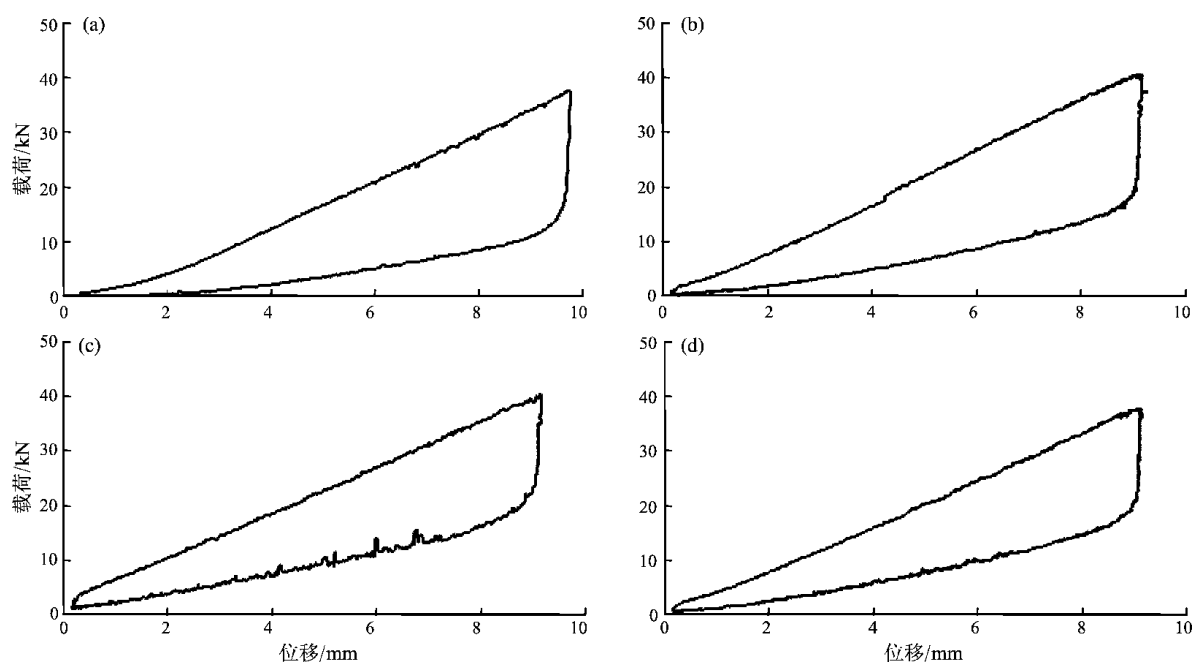


图8 隔振器滞回曲线

(a) 静态加载; (b) 1 Hz 加载; (c) 2 Hz 加载; (d) 3 Hz 加载

Fig. 8 Hysteresis curve of vibration isolator

(a) static loading; (b) 1 Hz loading; (c) 2 Hz loading; (d) 3 Hz loading

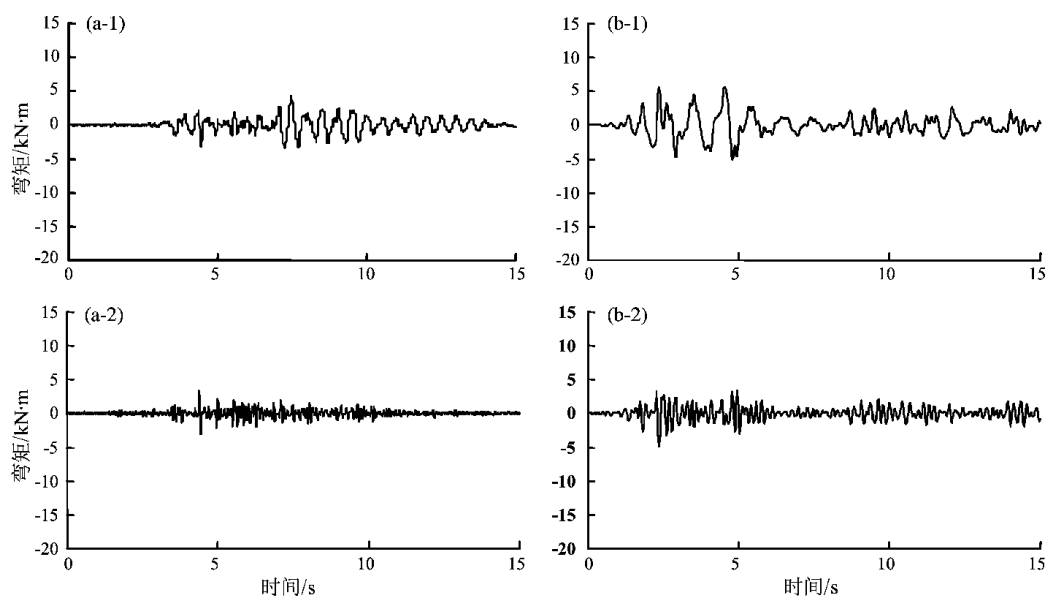


图9 在IX度罕遇地震下安装隔振器的隔离开关瓷柱根部弯矩时程响应曲线

(a-1) 阪神地震波水平向作用; (a-2) 阪神地震波竖向作用; (b-1) El Centro 地震波水平向作用; (b-2) El Centro 地震波竖向作用

Fig. 9 Bending moment-time curve of Porcelain column insulator under the IX degree earthquake after installing the vibration isolators

(a-1) under horizontal Kobe earthquake wave; (a-2) under vertical Kobe earthquake wave; (b-1) under horizontal El Centro earthquake wave; (b-2) under vertical El Centro earthquake wave

大弯矩不大于 20 kN · m /1.67 的取值设计要求。另外，瓷柱顶部的最大位移虽然有所增加，但与瓷柱间的距离相比仍然处于可接受范围内。因而，可以认为隔离开关在此条件下能够安全稳定的运行。

表 5 安装隔振器后的隔离开关地震响应时程分析结果  
Tab. 5 Seismic response time history analysis of the disconnecter after installing the vibration isolators

波形	地震波 加速度 峰值/gal	瓷柱顶部最大 位移/mm		瓷柱根部最大 弯矩/kN · m	
		水平向	竖向	水平向	竖向
阪神地震波	620	79.3	67.7	4.239	3.343
El Centro 地震波	620	112.6	96.3	5.638	4.913

3 结论

本文对高压隔离开关结构开展了模态试验分析、模态仿真分析以及Ⅸ度多遇/罕遇地震条件下的动力响应分析。结果表明，隔离开关的前六阶模态处于 10 Hz 以下的低频区域，当该设备在地震Ⅱ类及附近类别的场地运行时，会因为其频率与地震波频率相近，而引发结构共振和失效。同时，隔离开关的低阶模态以弯扭变形为主，当地震烈度较高时，这些位置会逐渐发生塑性或脆性变形，引发失效。在水平和竖向地震波作用下进行结构响应分析表明，隔离开关在Ⅸ度多遇地震条件下，具有足够的刚度来保证设备安全运行，但在Ⅸ度罕遇地震条件下，其瓷柱区域可能会首先处于塑

性或脆性变形状态，随时发生失效。为此，在Ⅸ度罕遇地震条件下，本文选用金属橡胶隔振器进行了隔离开关的隔震计算分析，取得了较好的隔震效果，将进一步开展高压隔离开关的抗震研究提供重要参考依据。

本文在撰写过程中得到康钟绪博士的帮助，在此表示衷心感谢！

参考文献：

韩军科,朱全军,杨风利. 2008. 基底隔震高压隔离开关抗震性能分析[J]. 电力建设, (6):39-42.

卢智成,程永锋,代泽兵. 2009. 基底隔震电气隔离开关的动力反应分析[J]. 武汉大学学报(工学版),10(S1):262-266.

日本建筑学会,日本土木工程学会,日本地盘工学会. 1998. 阪神淡路大震灾调查报告共通编 3:都市防灾报告[R]. 日本丸善株式会社.

谢强. 2008. “5 · 12”汶川大地震电力系统震害调查初步报告[R]. 上海:同济大学.

张枢文,嵇春艳,吴立人. 2007. ERA 法识别大型结构损伤与定位[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),21(3):5-9.

AIJ,JSCE,JGS. 2001. Report on the Damage Investigation of the Kocaeli Earthquake in Turkey[R]. Maruse Corp., Tokyo, Japan.

ASCE-TCLEE. 1997. Northridge Earthquake: Lifeline Performance and Post - earthquake Response[J]. American Society of Civil Engineering Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering.

Jean-Bernard Dastous. 2007. Guidelines for Seismic Design of Flexible Buswork between Substation Equipment [J]. Earthquake Eng. Struct. Dyn.,36:191-208.

Juang J.,Pappa R. 1985. An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction[J]. Journal of Guidance,8(5):620-627.

GB50011-2010,建筑抗震设计规范[S].

GB50260-2013,电力设施抗震设计规范[S].



## Dynamic Response Analysis of High-voltage Disconnecter under the Earthquake Wave

XU Guo-sheng<sup>1</sup>, ZHU Bin-qin<sup>2</sup>, ZHU Quan-jun<sup>3</sup>, XIAO Wei-min<sup>4</sup>, WU Yu-bin<sup>4</sup>

(1. *Yunnan Power Grid Corporation, Kunming 650011, Yunnan, China*)

(2. *Yunnan Electric Power Design Institute, Kunming 650051, Yunnan, China*)

(3. *Smart Grid Research Institute, Beijing 100192, China*)

(4. *State Environmental Protection Engineering Center for City Noise and Vibration Control,  
Beijing Municipal Institute of Labour Protection, Beijing 100054, China*)

### Abstract

The modal dynamic characteristic and dynamical time-history response of high-voltage disconnector under horizontal and vertical seismic waves are studied by experiment and numerical simulation method. The result shows that the low-order resonance frequency of the disconnector is similar with that of the seismic wave, so it is easily to be effect by the seismic excitation force. Under the strong earthquake in IX degree, the porcelain column insulator of the high-voltage disconnector breaks because of its maximum bending moment exceeds the design requirements. Through calculation and analysis, it could reduce the maximum bending moment of porcelain column insulator to ensure the seismic demand of the structure by installing the isolator.

**Key words:** electrical equipment; disconnector; modal analysis; under the earthquake; dynamic time history analysis