

尤红兵, 赵凤新, 2010. 瓷柱式 SF6 高压断路器抗震性能分析. 震灾防御技术, 5 (4): 418—427.

# 瓷柱式 SF6 高压断路器抗震性能分析<sup>1</sup>

尤红兵 赵凤新

(中国地震灾害防御中心, 北京, 100029)

**摘要** 开展断路器的抗震性能分析, 研究铝合金减震器的减震效果, 对提高电气设备的抗震能力有重要意义。利用 ANSYS, 建立了 LW36-252 /T3150-40 型瓷柱式 SF6 断路器的有限元模型。并以 IEEE Standard 693 推荐时程和汶川地震典型时程作为地震输入, 分别计算了支架底部未安装与安装铝合金减震器时断路器的地震反应。分析了减震器的减震效果, 对断路器的抗震性能作了评定。铝合金减震器有良好的减震效果, 能有效提高设备的抗震能力, 此断路器可达到 IEEE Std 693-2005 中等水准抗震水平。

**关键词:** 断路器 铝合金减震器 IEEE std 693 减震效果 抗震性能

## 引言

汶川地震中, 断路器、隔离开关等含瓷套管的电气设备破坏严重, 损失巨大(于永清等, 2008; 尤红兵等, 2008)。其主要原因是这些设备的瓷件为脆性材料, 塑性变形能力差, 地震时易断裂; 同时瓷套管具有相当的长度与重量, 头重脚轻易使设备损坏或倾倒。而利用减震器可有效降低设备的地震反应, 提高设备的抗震能力。因此, 开展断路器的抗震性能分析, 研究减震器的减震效果, 具有重要的理论意义和工程应用价值。

美国、日本等国家十分重视电气设备减震隔震技术的应用, 开展了大量的研究工作, 许多研究成果已被写入相应的抗震规范(Saadeghvaziri 等, 2001; Selahattin Ersoy 等, 2001; IEEE Standard 693, 2005; JEAG 5003, 1998)。近年来, 姚德康(2000)在国电华北电力设计院工程有限公司的资助下, 开发研制了铝合金减震器。李亚琦等(2002; 2005)进行了 LW11-252/Q 瓷柱型六氟化硫断路器振动台试验及有限元分析, 研究了铝合金减震器的动力特性及适用范围。在其研究中, 铝合金减震器安装在支持瓷柱与支架的连接处。相比较而言, 减震器安装在支架底部无需改变设备的原有设计, 更方便设计和施工。同时, 汶川地震的发生也进一步推动了电气设备的抗震分析及减震、隔震技术的研究(文波等, 2009; 谢强等, 2009; 李旭等, 2009)。但我国在电气设备的减震、隔震方面的研究目前仍处在起步阶段, 对减震、隔震装置的力学性能、消能减震理论的研究还有待进一步提高。

本文利用 ANSYS, 建立了 LW36-252 /T3150-40 型瓷柱式 SF6 断路器的有限元模型。并以

<sup>1</sup> 基金项目 地震行业科研专项(工业电气设备地震安全研究, 编号: 200708034)资助

[收稿日期] 2010-05-16

[作者简介] 尤红兵, 男, 生于 1970 年。副研究员。主要研究领域: 地震工程。E-mail: hbyou@126.com

IEEE Standard 693 推荐时程和汶川地震典型时程作为地震输入, 计算了支架底部未安装与安装铅合金减震器时断路器的地震反应。分析了减震器的减震效果, 对断路器的抗震性能作了评定。

## 1 有限元模型

### 1.1 断路器及有限元模型

LW36-252/T 3150-40 型瓷柱式 SF6 断路器由北京北开电气股份有限公司生产, 适用于开断重要负荷的场所。可作为发电厂、变电所等输配电系统的控制和保护开关, 亦可作为电力系统的控制和保护之用的联络断路器。

断路器总高为 7.165m, 实体图片及利用 ANSYS 建立的 LW36-252 型瓷柱式 SF6 断路器的有限元模型如图 1 所示。底座支架采用梁单元, 钢板采用壳单元, 瓷柱和法兰采用体单元模拟。单元总数为 1918 个, 节点数为 3520。其中梁单元 272 个, 壳单元 277 个, 体单元 1360 个。断路器的组成材料主要为钢和瓷, 钢的弹性模量取  $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、密度取  $7800 \text{ kg/m}^3$ 、泊松比取 0.3; 瓷套的弹性模量取  $1.2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、密度取  $4700 \text{ kg/m}^3$ 、泊松比取 0.3。未安装减震器时, 阻尼比取 0.039; 安装减震器时, 阻尼比取 0.045。

### 1.2 铅合金减震器

铅合金减震器利用铅合金的塑性变形来吸收地震能量, 能有效提高电气设备的抗震能力, 具有耐老化、耗能性能稳定、造价低等优点。根据 LW36-252 /T3150-40 型瓷柱式 SF6 断路器的特点, 定制了相应的铅合金减震器, 并通过试验测定了减震器的力学性能, 拉压滞回曲线及由滞回环顶点的连线确定的骨架曲线如图 2 所示。铅合金减震器安装在断路器底座 4 个柱脚处, 只允许柱脚作竖向震动。减震器采用 COMBIN39 弹簧单元模拟, 本构关系采用图 2 所示的力-位移骨架曲线。

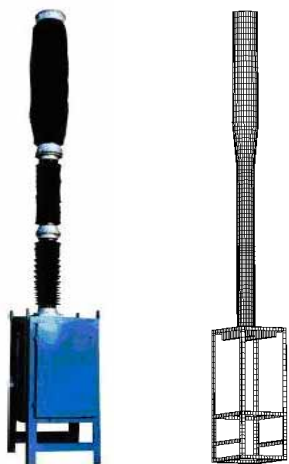


图 1 断路器及有限元模型

Fig. 1 Circuit-breaker and its finite element model

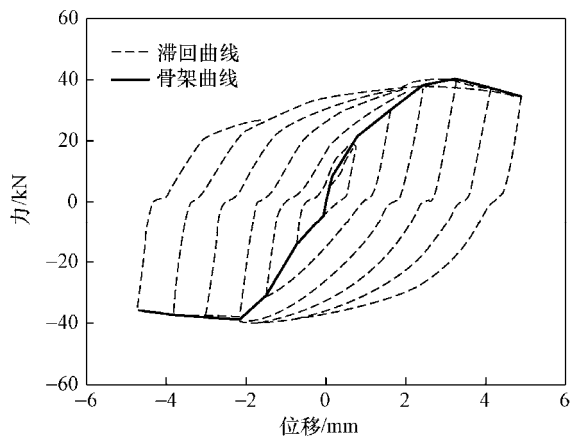


图 2 铅合金减震器滞回曲线及骨架曲线

Fig. 2 Hysteretic and skeleton curves of the lead alloy absorber

## 2 输入时程

### 2.1 IEEE Std 693 推荐时程

IEEE Std 693-2005 《变电站抗震设计推荐规程》(IEEE Std 693, 2005; 尤红兵等, 2009)

是美国现行变电所电气设备抗震设计与性能测试的主要参考文件,对我国相关规范的制定和修改具有重要参考价值。

IEEE Std 693-2005 定义了高、中、低 3 个基本抗震考核水平,加速度峰值分别为 0.5g、0.25g、0.1g。并规定凡电气设备通过与相应水准要求反应谱 (RRS) 相符的地震动时程,其抗震性才满足相应水准抗震水平。为满足客户的更高要求,还定义了高、中 2 个抗震性能水平 (Performance Level, 简称 PL), 反应谱值为相应 RRS 的 2 倍, 加速度峰值分别为 1.0g、0.5g。竖向加速度峰值为水平向加速度峰值的 80%。

现在许多出口到美国的电气设备,均需按 IEEE Std 693 相关规定进行抗震性能评定。为此,本文选择 IEEE Std 693-2005 推荐的时程进行分析计算,加速度时程及反应谱 (阻尼比 5%) 如图 3、图 4 所示。该时程频带比较宽,反应谱包络相应水准的规范标准谱 (图 4); 持

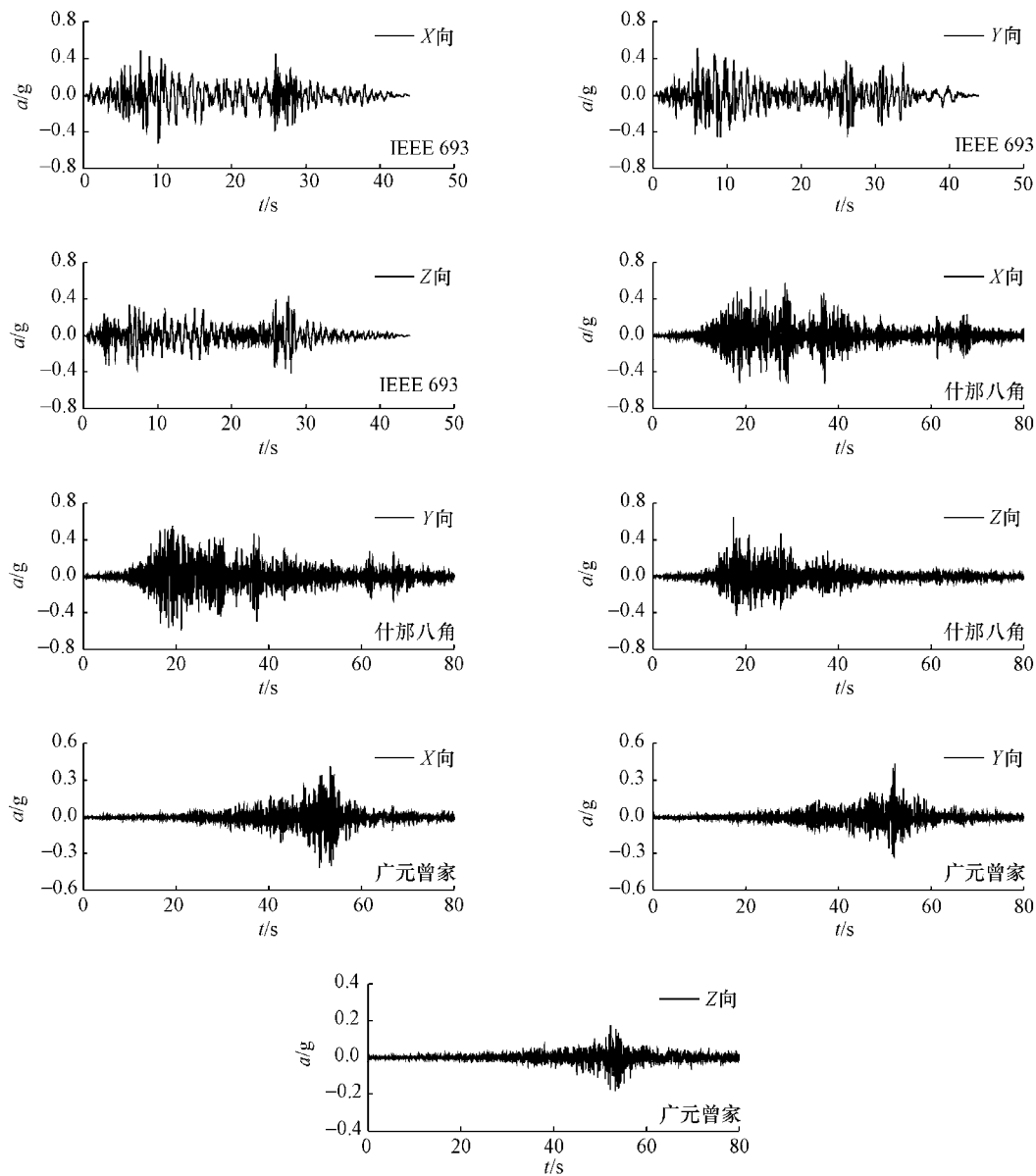


图 3 输入时程

Fig. 3 The input time history

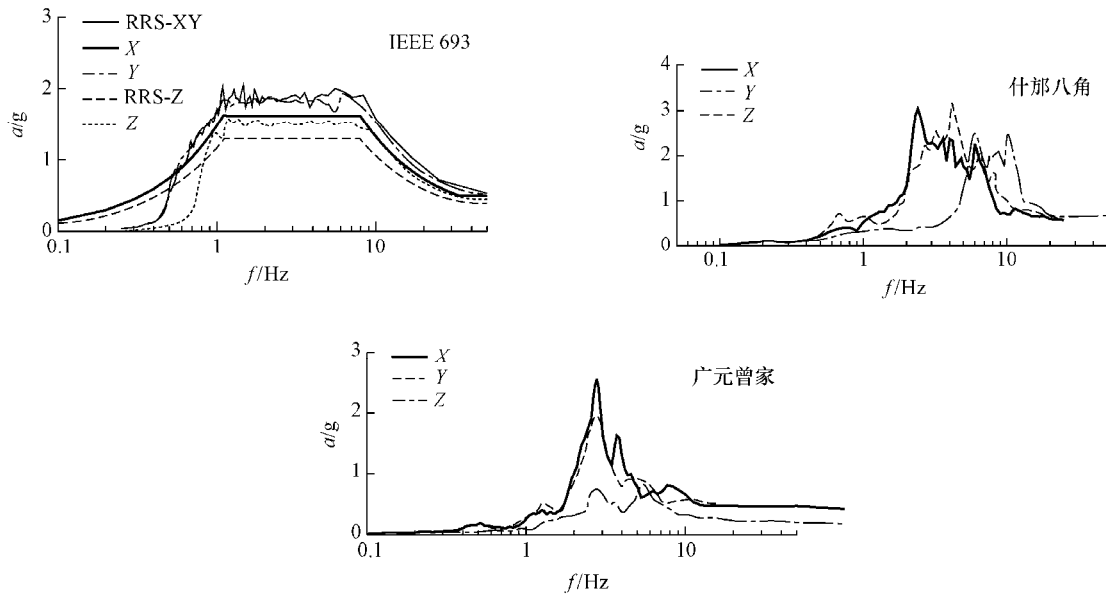


图 4 输入时程加速度反应谱

Fig. 4 The acceleration response spectra of the input time history

时大于 20s；强度比达到 60%；单自由度体系高振幅循环数分布较好，满足 IEEE Std 693-2005 的所有要求（Shakhzod 等，2005）。

## 2.2 汶川地震波

什那八角台站记录了汶川地震主震的加速度，其 3 个方向的最大加速度分别为  $556.2 \text{ cm/s}^2$ 、 $581.6 \text{ cm/s}^2$ 、 $633.1 \text{ cm/s}^2$ 。广元曾家台站记录的最大加速度幅值分别为： $410.5 \text{ cm/s}^2$ 、 $424.5 \text{ cm/s}^2$ 、 $183.3 \text{ cm/s}^2$ 。加速度时程及反应谱（阻尼比 5%）如图 3、图 4 所示。

选择上述 2 个台站的记录作为计算输入，一方面是考虑到加速度峰值较大，广元曾家台站的 2 个水平分量超过了  $0.4g$ ，而什那八角台站的记录接近  $0.6g$ ，并且什那八角台站的竖向记录最大为  $633.1 \text{ cm/s}^2$ ，超过了 2 个水平分量；另一方面，所选加速度的主频接近断路器自振频率。什那八角台站记录的反应谱平台段较宽（图 4），2 个水平分量在  $2.0\text{—}6.0\text{Hz}$  之间幅值较大，主频约为  $3.4\text{Hz}$ ；而广元曾家台站的 2 个水平记录的主频约为  $2.7\text{Hz}$ 。

## 3 结果分析

### 3.1 自振特性

利用模态分析，得到了未安装减震器和安装减震器后断路器的前 6 阶自振频率，如表 1 所示。从表 1 可以看出，安装减震器能降低断路器的自振频率，并通过改变结构的自振周期而降低设备的地震反应。同时，利用铅合金的塑性变形来吸收地震能量，达到了减震的目的。

表 1 断路器自振频率

Table 1 Natural frequency of the circuit-breaker

模 态	1	2	3	4	5	6
频率 Hz（未减震）	1.93	2.44	8.06	8.27	17.8	38.5
频率 Hz（减震）	1.84	2.19	6.68	7.24	16.4	36.5

的。为说明断路器的振型特性,图 5 给出了安装减震器后断路器的前 6 阶模态振型。其中前 4 阶振型以 X、Y 方向的弯曲振动为主,第 5 阶振型以扭转振动为主。



图 5 断路器前 6 阶模态振型

Fig. 5 The Circuit-breaker vibration models of the first six orders

断路器的前 4 阶自振频率在 1.8—8.3Hz 之间,而 IEEE Std 693-2005 标准谱平台段为 1.1—8.0Hz,什邡八角台站记录的反应谱平台段为 2.0—6.0Hz。由于大多地震动的卓越频率均在 1—10Hz 之间,与断路器自振频率接近。因此,在地震波作用下,断路器容易产生共振,发生破坏。断路器的竖向一阶频率分别为 56.514Hz (未减震)、43.157Hz (减震),频率较高。一般情况下,竖向地震对断路器的破坏较小。

### 3.2 减震效果分析

为研究减震器的减震效果,分别进行了 5 种工况的计算:IEEE 693 推荐时程,加速度幅值分别为 0.25g、0.5g、1.0g;什邡八角波及广元曾家波,加速度幅值均不调整。断路器顶部的加速度反应如图 6、图 7、图 8 所示。断路器顶部最大加速度和瓷套最大应力统计如表 2、表 3 所示。减震效果定义为未减震值与减震值的差除以未减震值。

表 2 断路器顶部最大加速度

Table 2 Peak acceleration at the top of the circuit-breaker

加速度	项 目	X 向		Y 向		Z 向	
		未减震	减震	未减震	减震	未减震	减震
0.25g	顶部 g	1.06	0.69	0.93	0.72	0.21	0.17
	减震效果	34.9%		22.6%		15.3%	
0.5g	顶部 g	2.11	1.29	1.85	1.28	0.41	0.34
	减震效果	38.9%		30.8%		17.1%	
1.0g	顶部 g	4.21	1.99	3.69	1.91	0.81	0.68
	减震效果	52.7%		48.2%		16.1%	
八角波	顶部 g	2.09	1.59	3.31	1.43	0.67	0.60
	减震效果	23.9%		56.8%		10.4%	
曾家波	顶部 g	1.97	0.95	2.10	1.13	0.20	0.19
	减震效果	51.8%		46.2%		5%	

表 3 断路器瓷套最大应力

Table 3 The maximum stress of the porcelain bushing

加速度	项目	顶部瓷套		中部瓷套		底部瓷套	
		未减震	减震	未减震	减震	未减震	减震
0.25g	应力 MPa	4.60	3.54	10.9	8.19	16.2	13.4
	减震效果	23.1%		24.9%		17.3%	
0.5g	应力 MPa	9.21	5.83	21.8	13.5	32.5	25.2
	减震效果	36.6%		38.1%		22.5%	
1.0g	应力 MPa	18.4	8.71	43.5	20.1	64.9	39.9
	减震效果	52.7%		53.8%		38.5%	
八角波	应力 MPa	15.1	7.3	35.2	16.9	53.7	32.5
	减震效果	51.6%		51.9%		39.5%	
曾家波	应力 MPa	9.23	4.93	21.7	11.5	32.9	19.8
	减震效果	46.6%		47.0%		42.6%	

从图 6—图 8 及表 2 中可以看出，安装铅合金减震器能有效降低断路器顶部的水平向加速度幅值，具有良好的减震效果。输入加速度峰值越大，减震效果也相对越好。当输入 IEEE693 推荐时程、加速度幅值为 0.25g 时，X、Y 向的减震效果分别为 34.9%、22.6%；当加速度幅

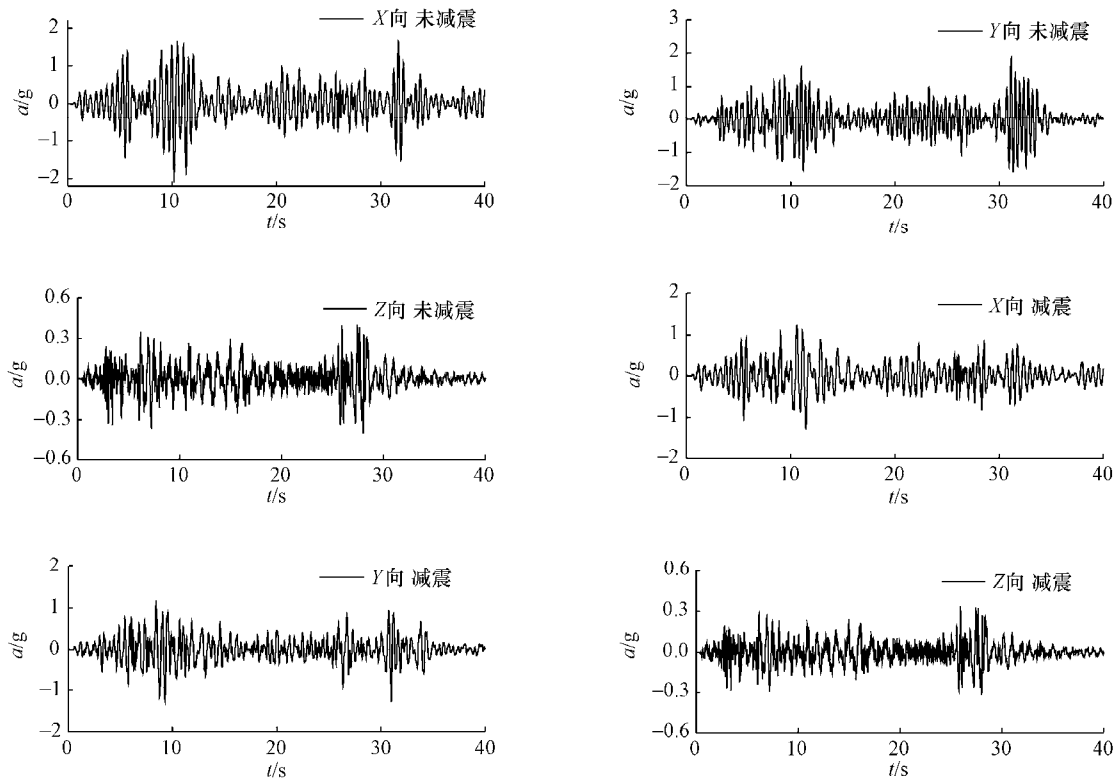


图 6 顶部加速度时程 (IEEE 693 0.5g)

Fig. 6 The top acceleration time history (IEEE 693 0.5g)

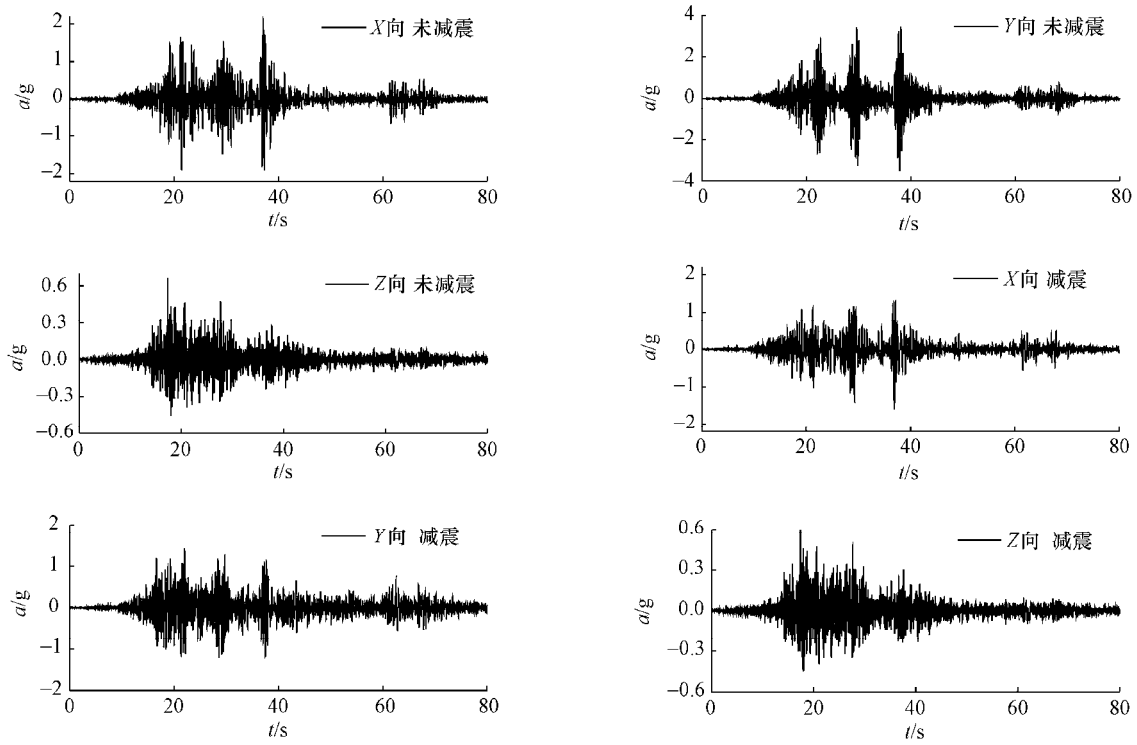


图7 顶部加速度时程(什邡八角波)

Fig. 7 The top acceleration time history (Shifang-Bajiao records)

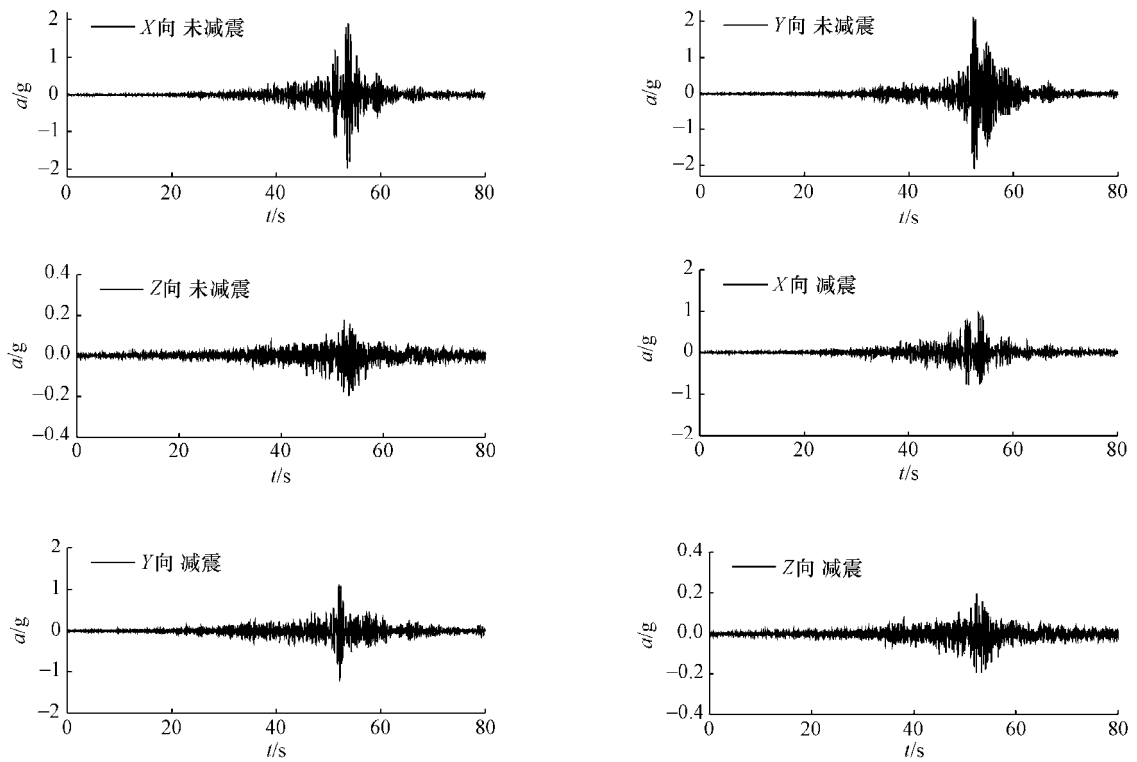


图8 顶部加速度时程(广元曾家波)

Fig. 8 The top acceleration time history (Guangyuan-Zengjia records)

值增大到 1.0g 时, X、Y 向的减震效果分别达到了 52.7%、48.2%, 均显著增大。输入加速度的峰值影响铝合金减震器的塑性变形, 进而影响减震效果。输入加速度幅值越大, 铝合金减震器的塑性变形越大, 吸收地震能量越多, 减震效果也越好。综合上述 5 种计算工况, 断路器顶部水平向加速度的平均减震效果为 40.7%。即安装减震器后, 顶部水平向加速度峰值平均降低了 40.7%, 最小为 22.6%, 最大达 56.8%。但铝合金减震器对竖向加速度的减震效果不明显, 一般低于 20%, 还有待进一步改进。

断路器瓷套的允许应力为 45MPa, 底部瓷套在地震中受力最大, 更容易破坏。下面以底部瓷套为例, 说明减震器的减震效果。从表 3 中可以看出, 安装铝合金减震器能有效降低断路器瓷套的最大应力, 具有良好的减震效果。当输入 IEEE693 推荐时程时, 底部瓷套最大应力的减震效果分别为 17.3% (0.25g)、22.5% (0.5g)、38.5% (1.0g), 输入加速度幅值越大, 减震效果也相对越好。当未安装减震器时, 在 IEEE693 (1.0g) 和什邡八角波输入下, 瓷套应力超过了允许应力, 瓷套可能断裂。安装减震器后, 瓷套应力均未超过允许应力, 保证了断路器的安全。

图 9 给出了不同地震波输入下, 减震器的内力-变形滞回曲线。从图 9 可知, 滞回曲线较饱满, 具有较好的耗能性能, 从而有效降低了瓷套的应力。另外, 减震器产生的位移仅 4—6mm, 对断路器顶部的位移影响不大。

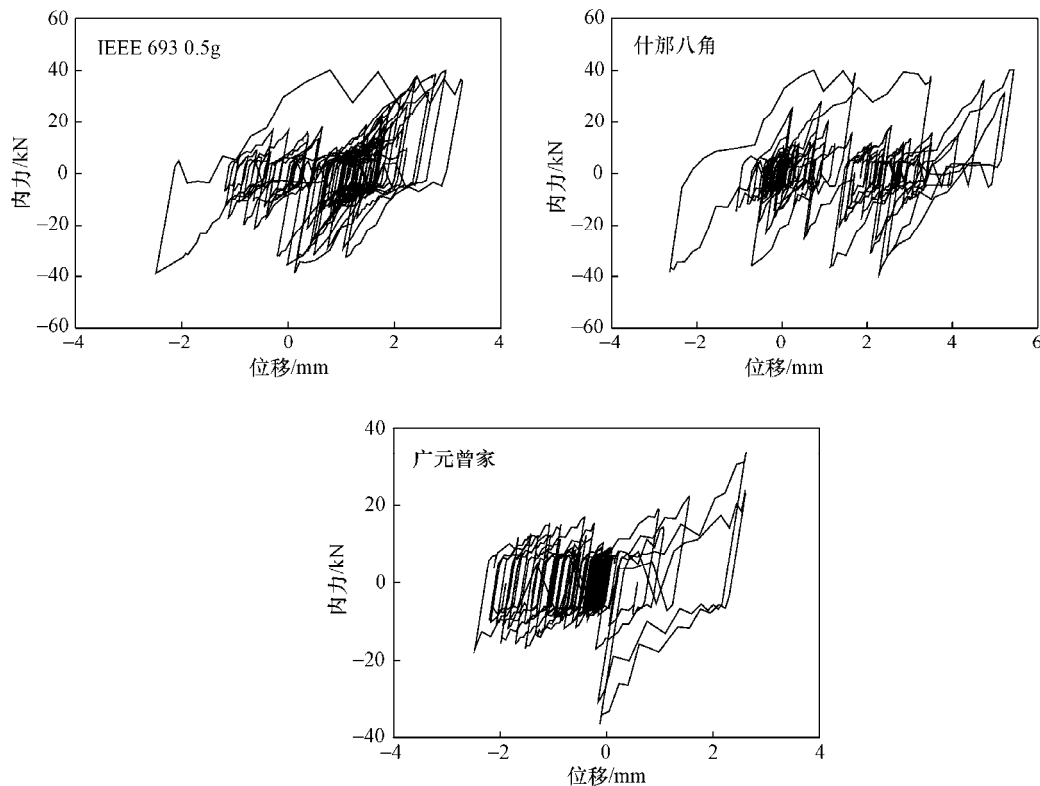


图 9 不同地震波输入下减震器滞回曲线

Fig. 9 The hysteresis curves of the lead alloy absorber for different input time history

### 3.3 断路器抗震性能分析

根据 IEEE Std 693-2005 的相关规定, 应以振动台试验结果作为此断路器抗震性能评定的依据。本文以计算结果给出的抗震性能分析, 可作为抗震性能评定的参考。



IEEE Std 693-2005 规定:瓷套所受应力不超过允许应力的 50%。断路器瓷套的允许应力为 45MPa,则瓷套的地震反应不应超过 22.5MPa。表 3 中只有加速度幅值为 0.25g 时,瓷套的最大应力为 16.2MPa(未减震)小于 22.5MPa。同时断路器无其他破坏。通过了与中等水准要求反应谱(RRS)相符的地震动时程检验,可达到中等水准抗震水平。

加速度幅值为 0.5g、1.0g 时,无论是减震还是未减震情况下,底部瓷套的最大应力均超过了 22.5MPa,不符合 IEEE Std 693-2005 要求。因此,LW36-252 /T3150-40 型瓷柱式 SF6 断路器达不到高等水准抗震水平。

在什邡八角波作用下,瓷套未减震时的最大应力为 53.7MPa,大于允许应力,瓷套破坏。这也是汶川地震中断路器破坏严重的主要原因。若安装减震器后,瓷套应力为 32.5MPa,小于允许应力,瓷套可避免破坏。在广元曾家波作用下,瓷套的最大应力均小于允许应力。若不考虑其他因素,断路器是安全的。

## 4 结语

利用 ANSYS,建立了 LW36-252 /T3150-40 型瓷柱式 SF6 断路器的有限元模型。并以 IEEE Standard 693 推荐时程和汶川地震典型时程作为地震输入,计算了支架底部未安装与安装铝合金减震器时断路器的地震反应。同时分析了减震器的减震效果,对断路器的抗震性能给出了以下初步评定。

(1) 安装铝合金减震器能有效降低断路器顶部的水平向加速度幅值以及底部瓷套的最大应力,具有良好的减震效果。输入加速度峰值越大,减震效果也相对越好,平均减震效果可达 40%。

(2) 铝合金减震器对竖向加速度的减震效果不明显,还有待进一步改进。

(3) 按照 IEEE Std 693-2005 的相关要求,LW36-252 /T3150-40 型瓷柱式 SF6 断路器可达到中等水准抗震水平,但达不到高等水准抗震水平。

(4) 应进一步开展电气设备的减震、隔震研究工作,推广减震、隔震技术的应用。

## 参考文献

- 李旭,鞠彦忠,李霞,2009. 高压断路器的抗震性能分析. 华东电力, **37** (4): 618—620.
- 李亚琦,2002. 电瓷型高压电气设备体系抗震性能分析(博士论文). 北京:中国地震局地球物理研究所.
- 李亚琦,李小军,刘锡荟,2005. 铝合金减震的动力特性及适用范围. 地震学报, **27** (1): 86—95.
- 谢强,王亚非,魏思航,2009. 软母线连接的变电站开关设备地震破坏原因分析. 电力建设, **30** (4): 10—14.
- 姚德康,李绍敏,周锡元,2000. 弯剪型铝合金减震器,中国发明专利,CN2407179.
- 尤红兵,田学民,赵凤新等,2008. 汶川大地震及电力系统抗震研究. 动力与电气工程师, **5** (2): 27—30.
- 尤红兵,赵凤新,刘锡荟,2009. 美国《变电站抗震设计推荐规程》评介. 电力建设, **30** (6): 43—47.
- 于永清,李光范,李鹏等,2008. 四川电网汶川地震电力设施受灾调研分析. 电网技术, **32** (11): 1—6.
- 文波,牛荻涛,张俊发等,2009. 隔震技术在高压电力设施中的应用. 工业建筑, **39** (1): 36—41.
- IEEE Standard 693, 2005. Recommended Practice for Seismic Design of Substations. Institute of Electrical and Electronic Engineers, USA.
- JEAG 5003, 1998. 《电气设备抗震设计指南》. 日本.

- Saadeghvaziri M.A. and Feng M., 2001. Experimental and Analytical Study of Base-Isolation for Electric Power Equipment, Research Progress and Accomplishment, State U. New York at Buffalo, U.S.
- Selahattin Ersoy, M. Ala Saadeghvaziri, Gee-Yu Liu, 2001. Analytical and Experimental Seismic Studies of Transformer Isolated with Friction Pendulum System and Design Aspects. *Earthquake Spectra*, **17**(4): 569—595.
- Shakhzod M. Takhirov, Gregory L. Fenves, Fujisaki Eric, 2005. Ground Motions for Earthquake Simulator Qualification of Electrical Substation Equipment, PEER-2004/07, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA.

## The Anti-seismic Performance Analysis of the Porcelain Knob Type SF6 High-Voltage Circuit-Breaker

You Hongbing and Zhao Fengxin

(China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China)

**Abstract** Improving anti-seismic capacity of the electrical equipments is of great significance for the performance analysis of circuit-breaker and seismic-reduced effect of the lead alloy absorber. Based on ANSYS, the finite element model of the LW36-252 /T3150-40 porcelain knob type SF6 high-voltage circuit-breaker is built. The recommended acceleration time history by IEEE Standard 693 and typical records of the Wenchuan 8.0 earthquake are selected for input motions. The seismic responses of circuit-breaker are calculated for uninstalling and installing lead alloy absorber at the bottom of the support respectively. The seismic-reduced effect of the lead alloy absorber and the antiseismic performance of the circuit-breaker are analyzed. The lead alloy absorber has good seismic-reduced effect and can effectively improve the anti-seismic capacity of the electrical equipments. This circuit-breaker is qualified to the moderate seismic level according to IEEE Std 693-2005.

**Key words:** Circuit-breaker; Lead alloy absorber; IEEE std 693; Seismic-reduced effect; Anti-seismic performance