

# Analysis of Aseismic Capacity of High Voltage Breaker for Porcelain Column Type

Xinfeng Dong<sup>1</sup>, Tiezheng Huang<sup>2</sup>, Quanjun Zhu<sup>3</sup>, Meigen Cao<sup>4</sup>, Hao Wang<sup>1</sup>, Jianxing Ren<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai

<sup>2</sup>State Grid Shanxi Economic Research Institute, Taiyuan Shanxi

<sup>3</sup>Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing

<sup>4</sup>China Electric Power Research Institute of SGCC, Beijing

Email: 453495875@qq.com

Received: May 17<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jun. 3<sup>rd</sup>, 2017; published: Jun. 6<sup>th</sup>, 2017

## Abstract

According to the weakness character of seismic capacity of high voltage breaker and ensuring no damage at the time of the earthquake, the breaker is used as research object to carry out the aseismic capacity and seismic Isolation analysis. Firstly, the modal analysis of high voltage breaker is carried out, the natural frequency and mode shape of the breaker are calculated, and the easily damaged parts of high voltage breaker are determined. Secondly, according to the standards of the IEEE Std-693-2005 and GB/T 13540-92, natural Elcentro wave and Taft wave are used to carry out the level excitation of the high voltage breaker, and the time history analysis of the displacement and stress of the vulnerable parts of breaker are carried out, and the maximum displacement and maximum stress of vulnerable parts are determined. The above research can provide technical support for the seismic design optimization of the breaker.

## Keywords

High Voltage Breaker, Aseismic Capacity, Modal Analysis

# 某高压瓷柱式断路器抗震性能分析研究

董新峰<sup>1</sup>, 黄铁铮<sup>2</sup>, 朱全军<sup>3</sup>, 曹枚根<sup>4</sup>, 王昊<sup>1</sup>, 任建兴<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海电力学院能源与机械工程学院, 上海

<sup>2</sup>国网山西省电力公司经济技术研究院, 山西 太原

<sup>3</sup>全球能源互联网研究院, 北京

<sup>4</sup>中国电力科学研究院, 北京

Email: 453495875@qq.com

收稿日期：2017年5月17日；录用日期：2017年6月3日；发布日期：2017年6月6日

## 摘要

针对瓷柱式高压断路器抗震能力较为薄弱的问题，以某型高压断路器为研究对象，开展其抗震及减震性能分析研究，旨在确保高压断路器在地震发生时的无破坏性。文中基于ANSYS开展某型高压断路器模态分析研究，获得断路器的固有频率和模态振型，确定断路器易损坏的部位；根据美国变电站抗震设计推荐规程IEEE Std-693-2005和高压开关设备抗地震性能试验GB/T13540-2009要求，选用天然Elcentro波和Taft波对高压断路器进行水平激励，开展易损坏部位的位移和应力时程分析，确定其最大位移和最大应力，为断路器的抗震设计优化提供技术支撑。

## 关键词

高压断路器，抗震能力，模态分析

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

电力系统是我国重要的生命线工程，电力系统若遭到破坏，会造成严重的灾害和经济损失。我国是地震灾害比较严重的国家之一，如2008年发生于四川汶川的5.12地震，据不完全统计，仅四川电网就产生约72亿元的经济损失，500KV及以下电力设备受到了严重的破坏[1]。高压断路器是电力系统中最重要控制和保护设备之一，按照其结构类型，高压断路器分为罐式断路器和瓷柱式断路器，其中瓷柱式断路器因价格便宜，因此在工程中得到广泛应用[2][3]。

高压瓷柱式断路器因其结构体形细高，阻尼比小，同时其自振频率与地震波的卓越频率较为接近，在地震作用下易产生共振；此外，瓷柱式断路器的主要部分多为脆性陶瓷材料，抗震能力较差，在地震过程中容易发生破坏，因此，对高压瓷柱式断路器的抗震性能进行分析与研究具有深远意义。

至今，各国学者对高压瓷柱式断路器的抗震性能进行了诸多方面的研究，在国外，如20世纪80年代初，美国Rolf Hellested等人通过振动试验台研究了断路器在开/断状态以及实测地震波作用下的应力状态，结果表明：考虑叠加效应所引起的断路器的整体应力会变大[4]；20世纪80年代末，法国Girode等人对比了断路器的有限元模型和断路器的振动试验，结果表明通过有限元法仿真的计算结果与试验获得的测试结果具有较高的一致性，并且该模型可以扩展到其他结构类型的断路器[5]。1998年德国Amir M.等人对高压断路器进行了有限元仿真和地震振动台试验，并比较了两种分析方法，获得了断路器易破坏的位置及破坏形式，为后续断路器的设计、布置形式、布置位置等选择提供了技术支持[6]；2006年，法国的Robin-Jouan等人使用Computational Fluid Dynamics Tool对SF<sub>6</sub>气体进入瓷柱各腔体后的流动性进行了仿真，模拟从300K升至3000K时腔室的应力变化，更好地理解SF<sub>6</sub>气体在腔体中的流动情况及其对腔室应力的影响[7]。2013年，美国Mosalam等人实时混合仿真模拟了高压断路器的抗震性能，并且这种实时混合仿真可以与小型振动台搭建使用，使试验结果更加接近人们的预想结果，使断路器抗震性能的模拟结果更加精确[8]。

在国内，2002年李亚琦建立了考虑扭转效应的断路器三维有限元计算模型，研究了高压电气设备的

抗震性能以及减震装置和导线对断路器抗震性能的影响[9]。2007年,冯东等人对高压断路器隔震装置的抗震可靠性能进行了分析,提出了基于随机震动模型的高压断路器抗震可靠性分析方法[10]。2010年曹枚根等人以 $\text{SF}_6$ 断路器为分析对象,建立了有限元模型,通过对断路器关键节点和部位的位移、加速度及应力等进行时程分析,获得了支架的动力放大系数等[11]。2011年张雪宋等人对安装新型铅减震器的断路器进行了振动实验,分析了新型铅减震器的减震效果,结果表明瓷支柱底部的应力减少了约53%以上[12]。2012年谢强等人通过白噪声扫描和抗震实验,测定设备关键部位的位移、应变和加速度,分析支架结构类型和刀闸开关对瓷瓶的影响[13]。2013年武胜斌等对高压瓷柱式断路器在AG5条件下的抗震性能进行了有限元分析,获得瓷柱式断路器在地震中容易折断的原因,分析了在没有底架情况下的抗震性能,最后得到通过改变底部支架的方式提高瓷柱式断路器的抗震性能[14]。

根据国内外研究现状,本文以某型高压瓷柱式断路器为研究对象,开展此类型断路器的抗震性能分析,确定地震发生时易发生破坏的关键点和部位。

## 2. 断路器模态分析

### 2.1. 断路器外形简图及有限元模型

图1是断路器外形简图,通过厂家提供的详细零件图进行绘制。图2是相应的有限元模型。断路器的三维模型在UG中进行装配,导出扩展名为x\_t文件,导入ANSYS中进行有限元分析。

在有限元模型中,各部分主要材料的力学性能参数如表1所示。

在断路器有限元模型中,单元类型主要为beam189三维梁单元和mass21质量单元(灭弧室瓷套内部的结构采用集中质量进行等效),法兰与瓷套管之间的连接方式为胶装连接,在ANSYS中采用Glue布尔运算进行定义。根据文献[2]中的理论公式,可以计算出瓷支架与法兰连接处的弯曲刚度为 $2.8 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ ,梁单元的界面惯性矩为 $1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ ,将上述各值赋予有限元模型。

### 2.2. 模态分析

将断路器底部的支架完全约束,采用分块法提取模态参数,分析模态阶数设定为10,扩展模态阶数

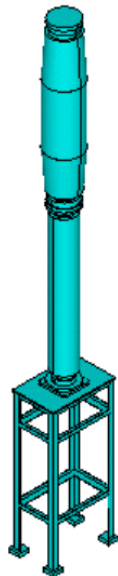


Figure 1. Schematic diagram of circuit breaker

图1. 断路器的结构简图

设定为 10，分析频段为 0~80 Hz。表 2 是断路器在 X, Y 两方向的固有频率，图 3 是相应的模态振型图。由图 3 断路器的模态振型可知，第一阶模态振型主要为灭弧室瓷套和瓷支柱绕着与箱体接触的部位

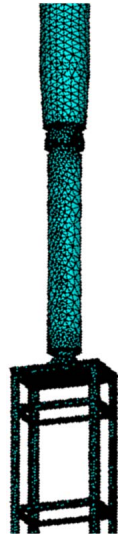


Figure 2. Finite element model of circuit breaker  
图 2. 断路器的有限元模型

Table 1. Mechanical properties of main materials

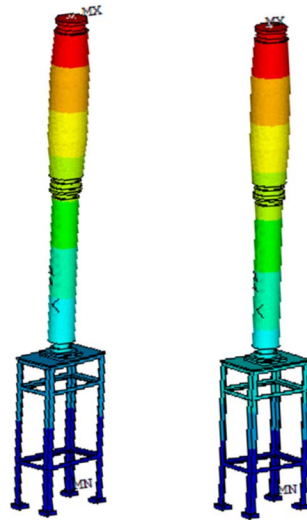
表 1. 主要材料的力学性能参数

部件名称	材料名称	弹性模量(N·m <sup>-2</sup> )	泊松比
底部支架	Q235A	$2.1 \times 10^{11}$	0.3
法兰	ZL101A	$0.7 \times 10^{11}$	0.3
瓷支柱/灭弧室瓷套	高强度瓷	$1 \times 10^{11}$	0.3
部件名称	质量密度(kg·m <sup>-3</sup> )	许用应力(MPa)	
底部支架	7850	210	
法兰	2700	170	
瓷支柱/灭弧室瓷套	5720	45	

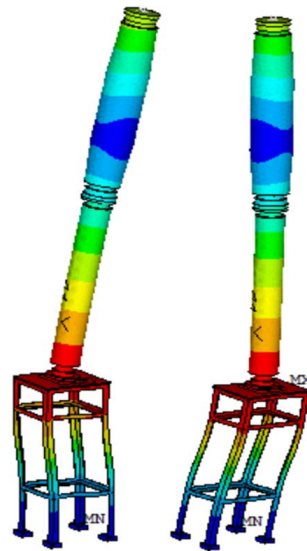
Table 2. The first two natural frequencies of circuit breaker

表 2. 断路器前两阶固有频率

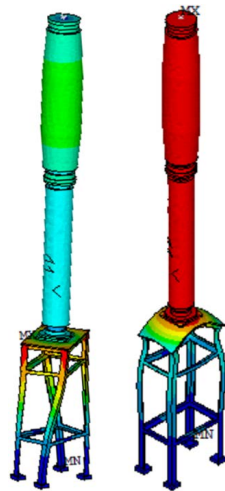
模态阶数	坐标方向	自振频率值
第 1 阶	X	4.2342
	Y	4.3282
第 2 阶	X	9.9294
	Y	10.637
第 3 阶	X	17.536
	Y	37.290
第 4 阶	X	51.052
	Y	52.086



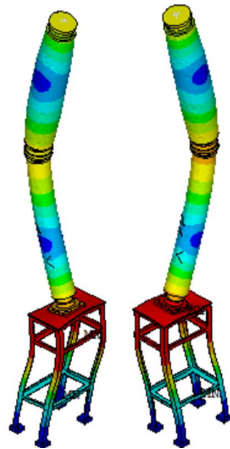
(a) 第 1 阶 X、Y 方向的模态振型



(b) 第 2 阶 X、Y 方向的模态振型



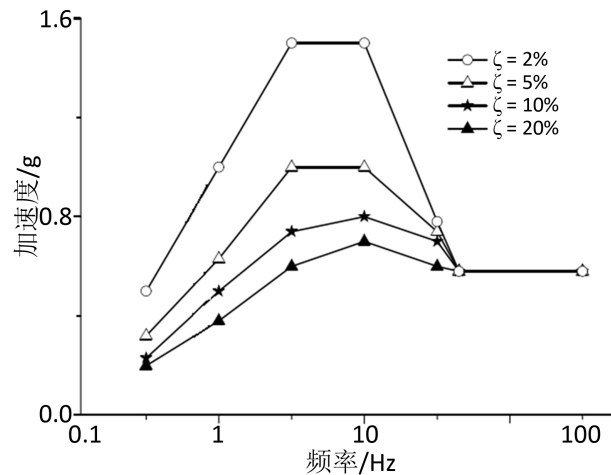
(c) 第 3 阶 X、Y 方向的模态振型



(d) 第 1 阶 X、Y 方向的模态振型

**Figure 3.** The modal shapes corresponding to the first two natural frequencies of the circuit breaker in different directions

**图 3.** 断路器在不同方向前两阶固有频率对应的模态振型



**Figure 4.** Acceleration seismic response curve of electrical equipment [3]

**图 4.** 电气设备的加速度地震反应曲线[3]

进行摆动；第二阶模态振型主要为底部支架绕支架低端的摆动；第三阶的固有频率在 X 和 Y 方向具有较大差异，绕 X 方向的阵型主要是底部支架的扭转，绕 Y 方向的阵型主要是支架顶部的上下移动；第四阶阵型主要是灭弧室瓷套和瓷支柱以及底部支架的弯曲运动。

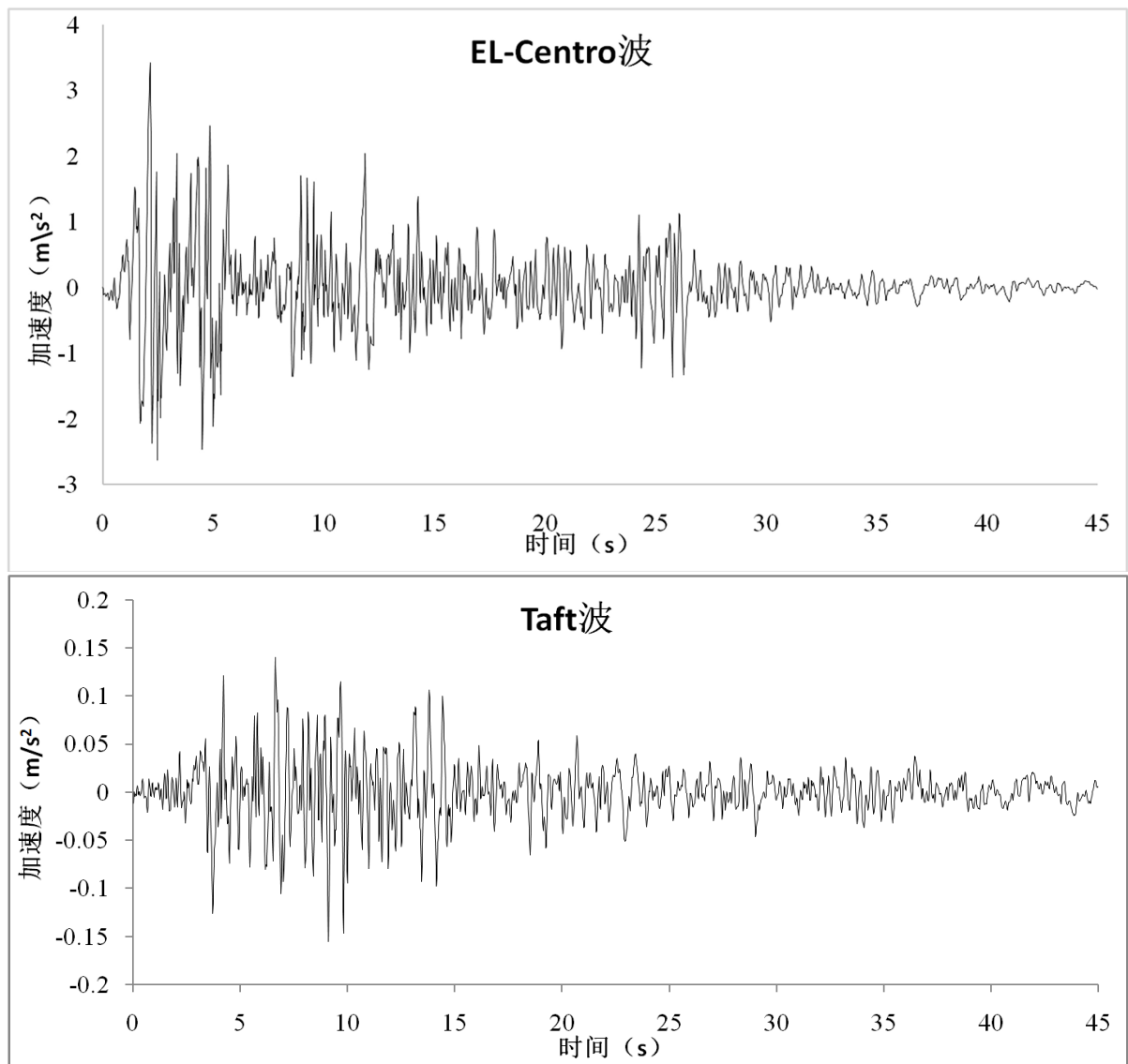
从电气设备地震反应谱统计曲线(图 4)可以发现，加速度响应的最大幅值一般发生在结构 1~15 Hz 范围内，即 15 Hz 之下的频率会对电气设备产生较大影响。鉴于此，文中重点分析断路器的前两阶阵型对于的危险部位。

前两阶模态阵型的运动类似于悬臂梁结构，根据材料力学理论可获得如下结论：在高斯白噪声激励下，断路器顶端部位的位移最大，断路器易破坏的部位主要集中在：1) 箱体与瓷支座连接处；2) 支架与箱体连接处。

### 3. 断路器危险部位的时程分析

#### 地震波时程响应分析

为了对断路器进行地震波分析，根据美国变电站抗震设计推荐规程 IEEE Std-693-2005 和我国规范



**Figure 5.** Waveform of El-centro wave and Taft wave  
**图 5.** El-centro 波和 Taft 波的波形图

**Table 3.** The peak value of displacement and stress  
**表 3.** 关键部位的位移和应力峰值

地震波	顶端位移峰值	A 点应力峰值	B 点应力峰值
El-centro	37.48 (mm)	36.3 MPa	89.5 MPa
Taft	32.62 (mm)	31.5 MPa	84.8 MPa

“高压开关设备抗震性能试验” GB/T13540-2009 的要求进行地震波的选择，本文主要选择天然 El-centro 波、Taft 波，其波形如图 5 所示。

在两种地震波作用下，对断路器最顶端的位移、箱体与瓷支柱连接处(A 点)及支架与箱体连接处(B 点)的应力进行时程分析，获得相应物理量的峰值，如表 3 所示。

根据表 1 材料的许用应力可知，断路器危险部位的应力峰值低于许用应力，可以达到 El-centro 波和

Taft 波作用下的抗震要求。

#### 4. 结论

1) 文中以某型高压断路器为分析对象, 通过有限元模型获得高压断路器在 X、Y 方向前四阶固有频率和模态振型, 通过模态振型获得断路器易破坏的部位主要集中在: 箱体与瓷支座以及支架与箱体连接处。

2) 文中选择 El-centro 波和 Taft 波对断路器进行激励, 开展断路器危险部位的时程分析, 提取相应位置的最大应力峰值, 结果表明该断路器可以达到抗震要求。

#### 基金项目

国家电网科技项目(SGRI-WD-71-15-010)。

#### 参考文献 (References)

- [1] 刘洋. 变电站电气设备抗震、基础减隔震分析研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2015.
- [2] 范荣全, 曹枚根, 卓越, 等. 高压断路器抗震能力及抗震减震措施[J]. 高压电器, 2012, 48(3): 12-16.
- [3] 邵锡杰. 高压瓷柱式断路器的抗震性能分析与隔震研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州科技学院, 2015.
- [4] Rolf, H. (1991) Evaluation of the Effect of Mechanical Operations on Seismic Qualification Test of SF6 Circuit Breakers. *Proceedings of the 1991 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, Dallas, 473-477.
- [5] Girodet, A. (1989) Seismic Behavior of "CANDLE" Type SF6 Outdoor Circuit Breakers and Associated SF6 Insulated Current Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4, 2100-2108. <https://doi.org/10.1109/61.35636>
- [6] Amir, M., Kuhner, A., Reinhardt, M. and Manea, I. (1998) Seismic Qualification of High-Voltage Substations (420KV Circuit Breakers with Coupled Poles). *Optimization of Electrical and Equipments*.
- [7] Robin-Jouan, P., Dufournet, D. and Montillet, G.F. (2006) Digital Analysis of the Breakdown Process in High-Voltage Circuit Breakers. 2005/2006 *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Dallas, 986-991.
- [8] Mosalam, K.M. (2014) Seismic Performance Evaluation of High Voltage Disconnect Switches Using Real-Time Hybrid Simulation: I. System Development and Validation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43, 1205-1222. <https://doi.org/10.1002/eqe.2395>
- [9] 李亚琦. 电瓷型高压电气设备体系抗震性能分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2002.
- [10] 郭振岩. 变压器抗地震性能的研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2005.
- [11] 尤红兵, 赵凤新. 瓷柱式 SF6 高压断路器抗震性能分析[J]. 震灾防御技术, 2010, 5(4): 418-427.
- [12] 张雪松, 代泽兵, 曹枚根, 等. 安装新型铅减震器的 220kV 断路器振动台试验[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 14-17.
- [13] 谢强, 朱瑞元, 周勇, 等. 220kV 隔离开关地震模拟振动台试验[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 262-267.
- [14] 武胜斌, 金松安, 陈刚, 等. 252kV 瓷柱式断路器在 AG5 条件下的抗震研究[J]. 高压电器, 2013(8): 96-101.



**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[jee@hanspub.org](mailto:jee@hanspub.org)