

Analysis of Aseismic Capacity and Seismic Isolation of High Voltage Current Transformer

Xinfeng Dong¹, Tiezheng Huang², Quanjun Zhu³, Meigen Cao⁴, Hao Wang¹, Jianxing Ren¹

¹School of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai

²State Grid Shanxi Economic Research Institute, Taiyuan Shanxi

³Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing

⁴China Electric Power Research Institute of SGCC, Beijing

Email: laile_sd@163.com

Received: May 21st, 2017; accepted: Jun. 6th, 2017; published: Jun. 9th, 2017

Abstract

According to the weak character of seismic capacity of high voltage current transformer and ensuring no damage at the time of the earthquake, the current transformer is used as research object to carry out the aseismic capacity and seismic isolation analysis. Firstly, the modal analysis of high voltage current transformer is carried out, and the natural frequency and mode shape of the breaker are calculated, and the easily damaged parts of high voltage current transformer are determined. Secondly, according to the standards of the IEEE Std-693-2005 and GB/T13540-92, natural El-centro wave and Taft wave are used to carry out the level excitation of the high voltage current transformer, and the time history analysis of the displacement and stress of the vulnerable parts of current transformer is 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 current transformer.

Keywords

High Voltage Current Transformer, Aseismic Capacity, Modal Analysis

某高压电流互感器抗震性能分析研究

董新峰¹, 黄铁铮², 朱全军³, 曹枚根⁴, 王 昊¹, 任建兴¹

¹上海电力学院能源与机械工程学院, 上海

²国网山西省电力公司经济技术研究院, 山西 太原

³全球能源互联网研究院, 北京

⁴中国电力科学研究院, 北京

Email: laile_sd@163.com

收稿日期：2017年5月21日；录用日期：2017年6月6日；发布日期：2017年6月9日

摘要

针对高压电流互感器抗震能力较为薄弱的问题，以某型电流互感器为研究对象，开展其抗震及减震性能分析研究，旨在确保高压电流互感器在地震发生时的无破坏性。文中基于ANSYS开展电流互感器模态分析研究，获得电流互感器的固有频率和模态振型，确定电流互感器易损坏的部位；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波对高压电流互感器进行水平激励，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，为电流互感器的抗震设计优化提供技术支撑。

关键词

高压电流互感器，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][2]。因此提升电力系统设备的抗震性能，深入探索电力设备的抗震理论及抗震性能计算具有重要意义。

在电力设备抗震性能研究方面，国内外学者做了一些研究，如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[3]；Robin-Jouan等人使用Computational Fluid Dynamics Tool对SF₆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SF₆气体在腔体中的流动情况及其对腔室应力的影响[4]。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[5]。吕红山等提出不同场地的地震动反应谱放大系数分析研究[6]；赵灿晖等针对地震时程有限元分析时存在的计算效率低的问题，提出时程分析快速计算方法[7]；徐龙军等对地震反应谱进行了总结并对后期发展进行了论述[8]；刘晓明等人针对SF₆电流互感器开展抗震性能研究[9]。

针对高压电流互感器重心位置高，耐地震性能较差的特点，本文以某型高压电流互感器为研究对象，开展抗震性能分析，确定地震发生时易发生破坏的关键点和部位。

2. 电流互感器模态分析

2.1. 断路器外形简图及有限元模型

图1是电流互感器外形简图，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。三

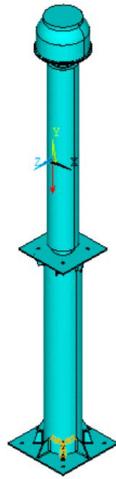


Figure 1. Structure of current transformer
图 1. 电流互感器的结构简图

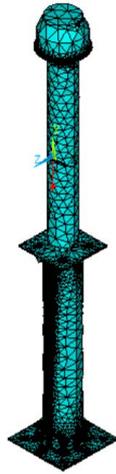


Figure 2. Finite element model of current transformer
图 2. 电流互感器有限元模型

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。

在电流互感器有限元模型中，单元类型主要为 beam189 三维梁单元和 mass21 质量单元(传感头以及复合绝缘子套管的内部结构采用集中质量进行等效)，底部支架与复合绝缘子套管采用胶装连接，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，可以计算出子套管与支架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 $1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ ，同时在有限元模型增加重力载荷(-Y 方向)，将上述各值赋予有限元模型。

2.2. 模态分析

将电流互感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，扩展模态阶数设定为 10，分析频段为 0~100 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。

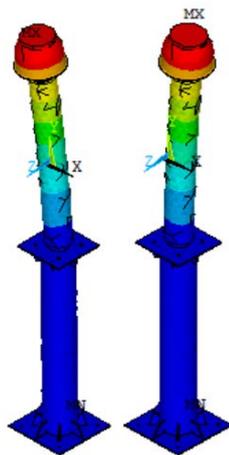
由图 3 模态振型可知，第一阶模态振型主要为复合绝缘子套管绕底部支架的左右摆动(底部支架位移

Table 1. Mechanical performance parameters of the main material**表 1.** 主要材料的力学性能参数

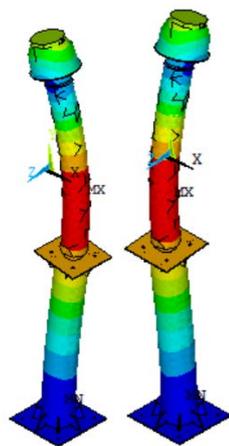
部件名称	材料名称	弹性模量(N·m ⁻²)	泊松比
底部支架	Q235A	2.1×10^{11}	0.3
法兰	ZL101A	0.7×10^{11}	0.3
复合绝缘子套管	环氧玻璃丝管	0.21×10^{11}	0.3
部件名称	质量密度(kg·m ⁻³)	许用应力(MPa)	
底部支架	7850	210	
法兰	2700	170	
复合绝缘子套管	5720	325	

Table 2. The first two order of current transformer**表 2.** 电流互感器前两阶固有频率

模态阶数	坐标方向	自振频率值
第 1 阶	X	6.1774
	Z	6.1865
第 2 阶	X	44.075
	Z	44.577
第 3 阶	X	61.978
	Z	62.251



(a)



(b)

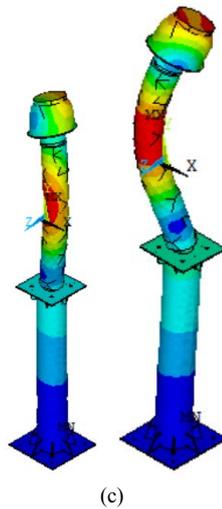


Figure 3. The first three mode shapes in two different directions; (a) The first order modal shape in X and Z directions; (b) The second order modal shape in X and Z directions; (c) The second order modal shape in X and Z directions

图 3. 电流互感器在不同方向固有频率对应的模态振型；(a) 第 1 阶 X、Z 方向的模态振型；(b) 第 2 阶 X、Z 方向的模态振型；(c) 第 3 阶 X、Z 方向的模态振型

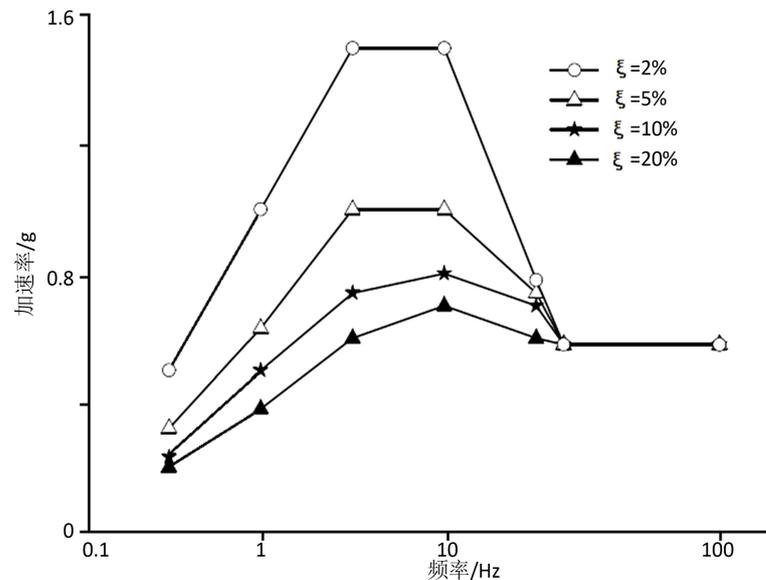


Figure 4. Acceleration seismic response curve of electrical equipment

图 4. 电气设备的加速度地震反应曲线[3]

很小)；第二阶模态振型除了第一阶模态振型的运动外，支架上半部分围绕固定端左右摆动；第三阶模态振型主要为复合绝缘子套管绕自身中点的弯曲运动。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第一阶阵型对应的危险部位。

第一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

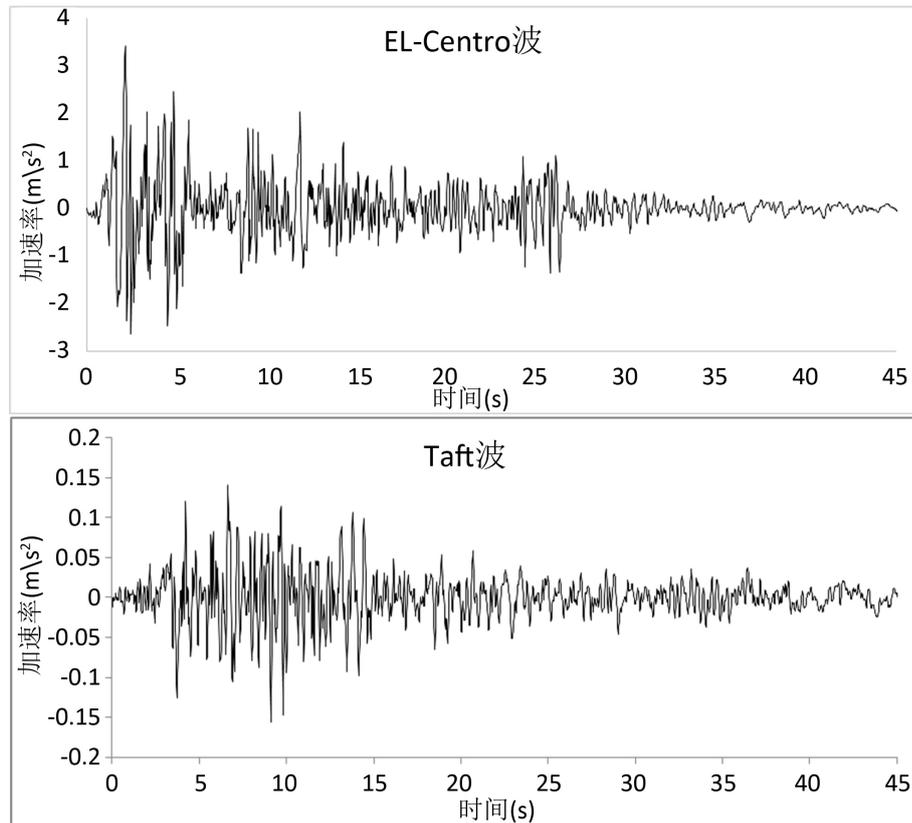


Figure 5. Seismic waves of El-centro and Taft
图 5. El-centro 波和 Taft 波的波形图

Table 3. The peak stress and displacement of key parts
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	33.97 (mm)	37.97 MPa	153.83 MPa
Taft	31.69 (mm)	36.49 MPa	149.59 MPa

下，电流互感器顶端部位的位移最大，易破坏的部位主要集中在：1) 复合绝缘子套管与底部支座的连接处；2) 底部支架与固定端的连接处。

3. 电流互感器危险部位的时程分析

地震波时程响应分析

为了对电流互感器进行地震波分析，根据美国变电站抗震设计推荐规程 IEEE Std-693-2005 和我国规范“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，本文选择 El-centro 波、Taft 波，波形如图 5 所示。

在两种地震波作用下，对电流互感器最顶端的位移、子套管与底部支座的连接处(A 点)及底部支架与固定端的连接处(B 点)的应力进行时程分析，获得相应物理量的峰值，如表 3、图 6 所示。

根据表 1 材料的许用应力可知，电流互感器危险部位的应力峰值低于许用应力，可以达到抗震要求。

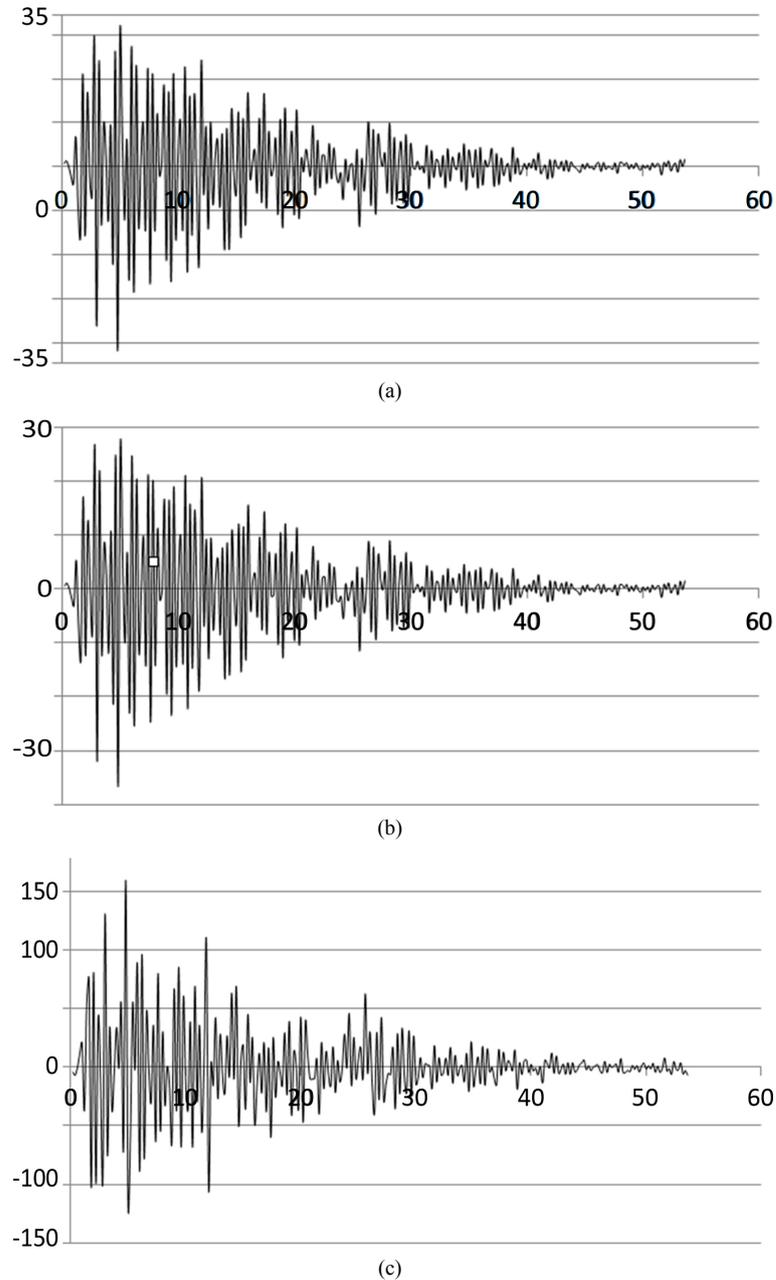


Figure 6. Seismic waves of El-centro and Taft; (a) the time history of top displacement; (b) the time history of the stress at A point; (c) the time history of the stress at B point

图 6. El-centro 波和 Taft 波的波形图; (a) 顶端的位移时程; (b) A 点的应力时程; (c) B 点的应力时程

4. 结论

1、文中以某型电流互感器为分析对象，通过有限元模型获得高压断路器在 X、Z 方向前三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。

2、文中选择 El-centro 波和 Taft 波对电流互感器进行激励，开展电流互感器危险部位的时程分析，提取相应位置的最大应力峰值，结果表明该电流互感器具有较好的抗震性能。

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分析及其抗震减震措施[J]. 高压电器, 2012, 48(3): 12-16.
- [3] Miri, A.M., Kuhner, A., Reinhardt, P., Arinescu, A. and Manea, I. (1998) Seismic Qualification of High-Voltage Substations (420 KV Circuit Breakers with Coupled Poles). Optimization of Electrical and Equipments.
- [4] Robin-Jouan, P., Dufournet, D. and Montillet, G.F. (2006) Digital Analysis of the Breakdown Process in High-Voltage Circuit Breakers. *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Dallas, 986-991.
- [5] 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>
- [6] 吕红山, 赵凤新. 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J]. 地震学报, 2007, 29(1): 67-76.
- [7] 赵灿晖, 周志祥. 多分量多点平稳随机地震响应的快速算法[J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(1): 55-60.
- [8] 徐龙军, 谢礼立, 胡进军. 抗震设计谱的发展及相关问题综述[J]. 世界地震工程, 2007, 23(2): 46-57.
- [9] 刘晓明, 王尔智, 佟立柱. 220KV 高压 SF6 电流互感器抗震性能分析[C]//中国电工技术学会电接触及电弧专业委员会. 1998.

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: ojav@hanspub.org