

330kV 变压器套管抗震性能研究

耿全胜

北方工业大学 土木工程学院，北京，100144；

摘要：随着电网建设速度加快，变电站不可避免建设于一些抗震不利地区，而变压器作为变电站最核心关键的设备，其一旦损坏将造成严重的社会危害和经济损失。本文以某 330kV 变压器为分析对象建立精细有限元模型，经过模态分析获得套管前 3 阶自振频率及振型，并通过输入三种形式地震波对变压器套管进行地震响应分析，获得了高压套管在地震激励下的加速度、位移和应变响应。结果表明：该变压器套管前 3 阶的自振频率分布在 2-7hz 之间，与地震动的卓越周期较为接近。在 PGA 为 0.4g 的不同地震波激励下，其套管顶部加速度最大动力放大系数达到了 5.91，位移响应峰值最大为 204.3mm，达到了变压器高度的 2.4%，套管根部应变的安全系数均小于规范要求 1.67，在强震作用下破坏风险极高，很有必要对变压器采取减隔震措施。

关键词：变压器；套管；有限元；地震响应分析

DOI:10.69979/3041-0673.25.03.045

引言

电力系统的正常运行关系着国家经济命脉，变电站在其中起到不可或缺的作用。而变压器作为变电站内最核心的设备，具有体量大、成本高且结构复杂的特点。变压器在地震作用下有较高的响应，因此最容易遭受破坏，设备一旦损毁可能会造成整个输电系统的瘫痪，引起不可估量的经济损失。变压器的结构特点是质量大，重心低，但套管固定在变压器顶部且长度较高，变成一种底部柔度较大的高耸式结构，在地震作用下容易产生较大的响应从而受到破坏。

本文建立了变压器有限元模型，首先对其进行动力特性分析，得到套管的自振频率。然后通过施加三种地震波激励并对套管做地震响应分析，得到了套管顶部的加速度、位移和应变响应，通过分析与标准规范的对比研究变压器套管的抗震性能。

1 变压器有限元模型

采用有限元软件 Abaqus 并以某 330kV 变压器为原型建立其精细有限元模型。变压器模型主要由箱体、油箱、高压套管、低压套管以及升高座组成。在建立有限元模型时对于箱体的各个面采用壳单元模拟，套管用梁单元模拟，升高座则用实体单元建模。实际工程中升高座与套管通过相应的法兰连接，在建立有限元模型时可将套管与升高座接触面建立耦合约束，而变压器内部铁芯、绕组等部件在地震时并非易损部位，因此对变压器整体来说可仅考虑其质量效应。其各部分具体的材料属

性见表 1，有限元模型图见图 1。

表 1 变压器材料属性

部件	套管	箱体	升高座
材料	陶瓷	Q235 钢	Q235 钢
密度 (kg/m^3)	2500	7850	7850
弹性模量 (Mpa)	6.5×10^4	2.1×10^5	2.1×10^5
泊松比	0.24	0.3	0.3

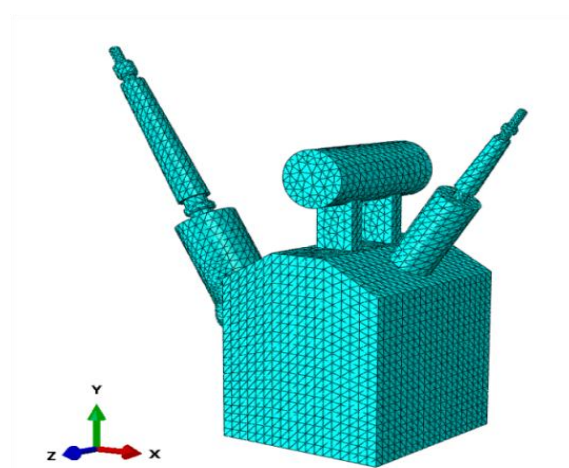


图 1 变压器有限元模型

2 动力特性分析

结构的自振特性决定了结构在地震作用下可能产生的动力响应。通过有限元数值计算对 300kV 变压器高压套管模型进行模态计算可以得到套管的自振频率和振型。高压套管的前三阶振型图如图 2 所示，其对应的

频率和振型描述如表 2 所示。

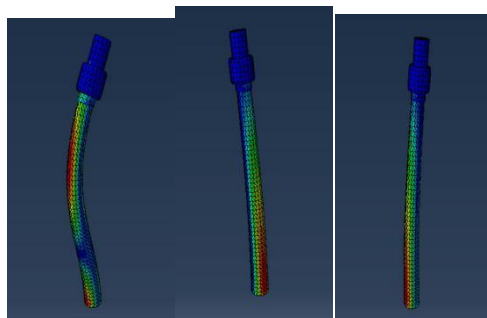


图 2 变压器套管前三阶振型图

由表 2 中的频率数据可知，前三阶的基本频率在 2~7Hz 频段，与地震波的卓越频率相近，在地震作用下极易发生较大的动力响应。

表 2 变压器套管前 3 阶频率及振型描述

模态	频率 (Hz)	振型
1	2.14	沿 x 向一阶弯曲
2	3.71	沿 y 向一阶弯曲
3	6.92	沿 x 向二阶弯曲

3 地震波的选取

本文的 330kV 变压器处于 8 度设防的 II 类场地地区，考虑到电力设施安全性需提高 1 度设防，采用 9 度设防目标，设计 PGA 为 0.4g。根据《电力设施抗震设计规范》（GB 50260-2013）规定，选取的地震波的反应谱能覆盖设备所在场地的需求谱，文中选取了两类地震工程中著名的实震记录以及一类根据规范拟合出来的人工波进行地震时程分析。三种地震波的归一化时程曲线如图 3 所示。

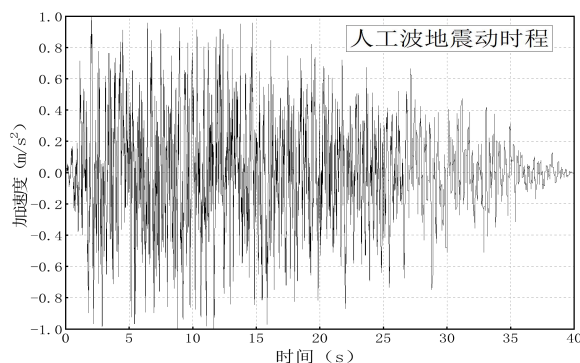
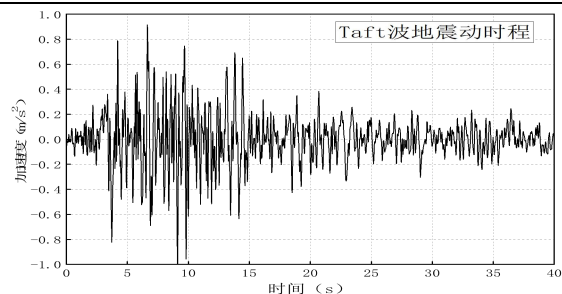
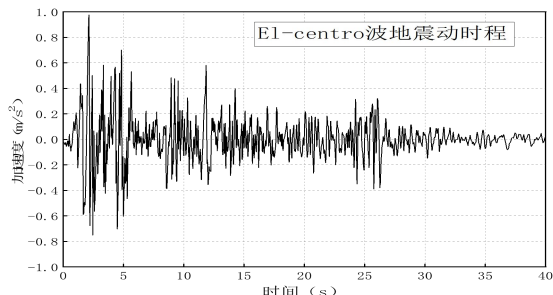


图 3 地震波归一化时程曲线

4 地震响应时程分析

分别对变压器有限元模型输入所选三类地震波，开展 PGA 为 0.4g 时变压器的地震时程分析。重点关注变压器高压套管顶部的加速度响应和位移响应以及套管根部连接处的应力响应。

4.1 加速度响应分析

由于变压器套管顶部一般距离地面较高，下部的地震动往往会对顶部产生放大作用，这种放大效应会影响变压器的正常工作，甚至产生破坏。加速度的放大系数为套管顶部的加速度响应与输入的地震峰值加速度之比。在三种地震波的作用下，变压器套管顶部的加速度响应及其放大系数见表 3。

表 3 套管顶部加速度峰值以及加速度放大系数

地震波	El-Centro 波	Taft 波	人工波
PGA (g)	0.4	0.4	0.4
套管顶部加速度响应峰值 (g)	1.896	2.052	2.364
加速度放大系数	4.74	5.13	5.91

由表可知，三种地震波对变压器套管顶部加速度均有较大影响，其中人工波的影响最大，其动力放大系数达到了 5.91，套管极容易发生破坏，因此很有必要采取措施来减小地震响应。

4.2 位移响应分析

实际变电站中,变压器与相邻设备通过导线相连接,软导线预留有一定的冗余度。当地震作用下变压器套管顶部位移过大,超过软导线预留冗余度时,可能引起设备间的

牵拉作用,造成套管的牵拉破坏。在三种地震波的作用下,变压器套管顶部的位移响应峰值见表 4。

表 4 套管顶部位移峰值

地震波	El-Centro 波	Taft 波	人工波
PGA (g)	0.4	0.4	0.4
套管顶部位移峰值 (mm)	165.4	204.3	180.1

由表可知,在 PGA 为 0.4g 的 Taft 地震波下,套管顶部的位移峰值最大达到了 204.3mm,而套管距离地面高度为 8350mm,其顶部位移达到了变压器高度的 2.4%,易遭受牵拉破坏,因此很有必要通过采取一些减隔震措施来减小套管的地震响应。

4.3 应力响应分析

变压器套管是一种高柔结构,其主要材料为陶瓷,强度较低,且在瓷套管根部容易产生应力集中,故由于应力过大导致断裂破坏的情况十分常见。由于抗震设计时设立了一定的安全系数,因此在研究中应当将考虑了安全系数后的容许应力作为结构的失效指标。

表 5 套管根部应力以及安全系数

地震波	El-Centro 波	Taft 波	人工波
套管根部应力 (Mpa)	46.4	36.9	50.3
安全系数	0.86	1.08	0.79

由表可知,在 PGA 为 0.4g 的人工地震波下,套管根部的应力峰值最大达到了 50.3Mpa,且三类地震波的作用下套管根部的安全系数均小于规范要求的 1.67,在强震作用下根部破坏的风险极高,因此十分有必要对变压器减采取减隔震措施。

6 结论

本文建立了某 330kV 变压器有限元模型,并对其进行动力特性和地震响应分析,得出的主要结论如下:

(1) 330kV 变压器套管前三阶自振频率分布在 2~7 hz 之间,与地震动的卓越周期较为接近,很有必要对变

压器采取一些减隔震措施。

不同地震波对变压器套管顶部加速度都有较大影响,其中人工波的影响最大。在 PGA 为 0.4g 人工波激励下变压器套管动力放大系数达到了 5.91,套管极容易发生破坏。

地震作用下变压器套管顶部会发生位移。在 PGA 为 0.4g 的 Taft 地震波下,套管顶部的位移峰值达到了变压器高度的 2.4%,易遭受牵拉破坏,可增加导线的冗余长度从而减少套管位移造成的破坏。

变压器套管由于其高柔的特性,在套管根部易发生应力集中而破坏,设计时应通过验算从而满足安全系数的规范要求。

参考文献

- [1] 国家电网公司科技部. 汶川 8.0 级地震电网受灾情况调研及初步分析报告 [R], 2008. 6.
- [2] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997: 29-65.
- [3] 孙宇晗,程永锋,卢智成等. 特高压 GIS 瓷质套管与复合套管抗震性能试验
- [4] 曹枚根,范荣全,李世平. 大型电力变压器及套管隔震体系的设计与应用[J]. 电网技术,2011,35(12): 130-135
- [5] 谢强,文嘉意,庞准. 大型变压器-套管体系基底隔震及其经济效用分析[J]. 高电压技术,2020,46(3): 890-897.
- [6] 朱祝兵. 特高压换流变压器抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所,2020.
- [7] 电力设施抗震设计规范: GB50260-2013[S]. 2013.
- [8] 高压开关设备和控制设备的抗震要求: GB/T13540 [S]. 北京: 中国标准出版社出版,2010.
- [9] 电力设施抗震设计规范: GB50260-2013[S]. 北京: 中国计划出版社出版,2013.
- [10] 建筑抗震设计规范: GB50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社出版,2016

作者简介: 耿全胜 (1992.11-), 男, 汉族, 山东人, 硕士在读, 研究方向: 结构抗震防灾减灾