

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.02.009

## 500 kV 浮放式变压器地震响应及水平滑移分析

洪志湖<sup>1</sup>, 邹德旭<sup>1</sup>, 周仿荣<sup>1</sup>, 代维菊<sup>1</sup>, 闵青云<sup>1</sup>, 晋金帅<sup>2</sup>, 中国标<sup>2</sup>,  
张振<sup>2</sup>, 李达<sup>3</sup>, 杨舟<sup>4</sup>, 朱旺<sup>5</sup>

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650214; 2. 云南电网有限责任公司文山供电局, 云南 文山 663000;  
3. 云南电网有限责任公司玉溪供电局, 云南 玉溪 653100; 4. 云南电网有限责任公司怒江供电局, 云南 怒江 673299;  
5. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 现有对变压器的抗震研究多集中于与基础固接的变压器,对浮放式变压器的抗震性能分析较少。文中选取工程中某500 kV浮放式变压器,文中对该500 kV变压器进行精细化建模,采用考虑变压器出线端耦合回路的抗震性能分析方法,通过有限元时程计算得到变压器关键位置的地震响应数据,分析地震中可能出现破坏的薄弱环节,并分析了变压器整体的水平滑移。结果表明:变压器的前10阶自振模态是高压套管—升高座体系及油枕等部件的一阶平动或扭转模态,自振频率在1~10 Hz范围内,与地震动的卓越频率重合;地震作用下变压器的GIS套管变截面处、油枕支撑根部应力水平较高,存在峰值应力超过材料极限应力的风险,是变压器的抗震薄弱位置。地震作用下浮放变压器产生一定的水平滑移,导致变压器整体位移,在高压出线端结构内产生一定的牵拉应力,致使应力水平增加,加剧结构破坏的可能。

**关键词:** 浮放式变压器;有限元仿真;模态分析;地震响应;水平滑移

## Seismic Response and Horizontal Sliding Analysis of 500 kV Free-standing Power Transformer

HONG Zhihu<sup>1</sup>, ZOU Dexu<sup>1</sup>, ZHOU Fangrong<sup>1</sup>, DAI Weiju<sup>1</sup>, MIN Qingyun<sup>1</sup>, JIN Jinshuai<sup>2</sup>,  
SHEN Guobiao<sup>2</sup>, ZHANG Zhen<sup>2</sup>, LI Da<sup>3</sup>, YANG Zhou<sup>4</sup>, ZHU Wang<sup>5</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Corporation, Kunming 650214, China; 2. Wenshan Power Supply Company of Yunnan Power Grid Corporation, Yunnan Wenshan 663000, China; 3. Yuxi Power Supply Company of Yunnan Power Grid Corporation, Yunnan Yuxi 653100, China; 4. Nujiang Power Supply Company of Yunnan Power Grid Corporation, Yunnan Nujiang 673299, China; 5. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Most of the existing research on the seismic performance of transformer is focused on the transformers with fixed connection to the foundation. While the seismic performance analysis of free-standing transformer is less. In this paper, a 500 kV free-standing transformer for a project is selected and a refined modeling for the transformer is carried out. The seismic response data of the key position of the transformer is obtained by using the seismic performance analysis method considering the coupling loop of the transformer outlet. The vulnerable parts that may be damaged in the earthquake is analyzed, and the overall horizontal sliding of the transformer is analyzed. The results show that the first ten natural vibration modes of the transformer are the first order transnational or torsional modes of components such as the high-voltage bushing-turret system and the oil conservator, and the natural vibration frequency is in the range of 1-10 Hz, which coincides with the excellent frequency of ground motion. The stress level at variable section of GIS bushing and the root of the oil conservator support the transformer is high under seismic condition, has

收稿日期:2025-07-18; 修回日期:2025-10-20

基金项目:南网电网公司科技项目(电气设备抗震检测评估及防震救灾应急保障技术研究)。

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Corporation(Research on Seismic Detection and Evaluation of Electrical Equipment and Emergency Support Technology for Earthquake Prevention and Disaster Relief).

the risk that the peak stress exceeding the material ultimate stress and is the weak positions of the transformer. In seismic cases, the free-standing transformer will produce a certain horizontal slip, resulting in the overall displacement of the transformer, and producing a certain tensile stress in the structure of the high-voltage outgoing terminal, which will increase the stress level and aggravate the possibility of structural damage.

**Key words:** free-standing transformer; finite element simulation; modal analysis; seismic response; horizontal slip

## 0 引言

变压器作为变电站的重要组成部分,在历次强震中却表现出较高的易损性。特别是安装在变压器上的套管一旦在地震中破坏,将严重影响电力系统的正常运行。大型变压器设备的震害调查和抗震性能研究表明,变压器一套管体系在地震作用下变电设施极易损坏<sup>[1-2]</sup>。

在唐山大地震<sup>[3]</sup>、美国北岭大地震<sup>[4]</sup>、汶川地震<sup>[5]</sup>等历次地震下,各个电压等级的变压器均受到了极大损坏。其中包括变压器整体倾倒、移位、漏油以及套管瓷套破坏、法兰破坏等,见图1。究其原因,一方面由于设施自振频率多在1~10 Hz范围内,与地震波的卓越频率接近,地震发生时极易产生共振现象;另一方面,电力设施多采用脆性材料,其阻尼比小、强度较低,在地震作用下会加大震害发生。



(a) 变压器倾倒



(b) 套管破坏

图1 变压器破坏

Fig. 1 Failure of power transformers

变压器是送变电工程的核心电气设备,承担着电压等级调整的重要作用,一旦主变压器在地震中受损,将直接导致对外供电中断,造成严重的停电事故,甚至是危及整个电网系统的稳定。鉴于此,大量学者对变压器进行了抗震分析,涉及变压器和安装在变压器上的各类套管<sup>[6-8]</sup>,主要研究方向为抗

震性能分析<sup>[9-10]</sup>,易损性分析<sup>[11-12]</sup>,经济效益分析<sup>[13-14]</sup>,以及韧性评估<sup>[15]</sup>等。1998年,Bellorini等学者对一高压套管进行了试验和数值分析,并对其抗震性能进行鉴定<sup>[16]</sup>。随后,Gilani等学者对196、230、50 kV 3种不同电压等级的套管一支架体系进行了动力试验,研究了支架对变压器套管的动力影响<sup>[17-19]</sup>。2019年,He等人对一1 100 kV特高压套管进行了有限元仿真和理论分析,分析了法兰对其地震响应的影响,并以此提出对应的改造措施<sup>[20]</sup>。基于结构地震响应的分析方法,变压器的减隔震研究逐步兴起,并取得了良好的成效工作<sup>[21-23]</sup>。

然而,现有针对变压器的抗震研究主要针对底部固定式变压器以及变压器套管,对于浮放式变压器的抗震研究较少。为了全面地评估某500 kV浮放式主变压器的抗震性能及震害风险,文中对该500 kV变压器进行精细化建模,采用考虑变压器出线端耦合回路的抗震性能分析方法,通过有限元时程计算得到变压器关键位置的地震响应数据,分析地震中可能出现破坏的薄弱环节,并分析了变压器整体的水平位移滑移。

## 1 浮放式500 kV变压器

### 1.1 结构特性

文中所选取的变压器为某型三相交流变压器,见图2,主要组成部件有变压器箱体、高压套管及其升高座、低压套管及其升高座、中性点套管及其升高座、油枕及其支撑、以及与高压侧出线端相连的GIS设备等。



(a) 整体外观

(b) 套管升高座

图2 浮放式500 kV变压器

Fig. 2 Free-standing 500 kV power transformer

该500 kV变压器的结构尺寸见图3,由图3可见其与周边设备的连接方式主要有3类:母线连接、

GIS设备直连、管道连接。低压侧出线端、中性点出线端等采用常规的母线连接;高压侧出线端与GIS设备直接连接;变压器散热采用水冷散热方式,与水冷却器之间通过管道连接。常规母线连接的刚度较小,对变压器的地震响应约束较小,研究中予以忽略;而GIS设备直连、管道连接刚度较大,对变压器的地震响应约束较大,研究中应适当考虑其带来的耦联振动效应。基于变压器的上述结构特征,文中主要进行的是考虑GIS设备耦联的变压器抗震性能分析。

1.2 有限元仿真模型

500 kV 主变压器总重 217.1 t,其中包括绝缘油重 46.9 t。基于有限元数值仿真平台软件 Abaqus<sup>[24]</sup>,对该变压器进行精细化的有限元建模。鉴于绝缘油充满整个变压器内部空间,流动性较低,故不考虑

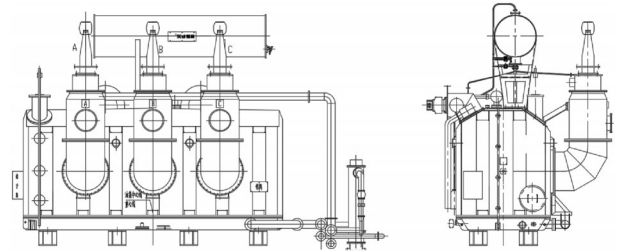


图3 变压器结构图

Fig. 3 Structures of the power transformer

其流动产生的动力效应,只将其质量等效附加到箱体及各附件的板件上。各部件特征尺寸、质量(包括绝缘油附加质量)、主要材质等建模参数见表1。

有限元数值模型中各部件的材料特性参数根据其实际材料进行设置,动力分析中涉及的主要材料参数是密度、弹性模量、泊松比、强度,各材料的参数设置见表2。

表1 500 kV 主变压器结构参数

Table 1 Structural parameters of the 500 kV power transformer

部件	结构尺寸/m	质量/t	材质
箱体	长×宽×高×壁厚: 7.61×2.77×3.94×0.02	96.842	Q235 钢
高压升高座	高×外径×壁厚: 2.84×1.12×0.01	4.326	Q235 钢
低压升高座	高×外径×壁厚: 0.56×0.70×0.01	0.982	Q235 钢
中性点升高座	高×外径×壁厚: 0.62×0.44×0.01	0.775	Q235 钢
高压套管	GIS 侧长×外径×壁厚: 1.05×0.36×0.03	0.450	高强陶瓷
	油侧长×外径×壁厚: 1.48×0.36×0.03		铸铝
低压套管	空气侧长×外径×壁厚: 0.48×0.36×0.02	0.200	高强陶瓷
	油侧长×外径×壁厚: 0.42×0.35×0.02		铸铝
中性点套管	空气侧长×外径×壁厚: 0.33×0.14×0.02	0.053	Q235 钢
	油侧长×外径×壁厚: 0.14×0.14×0.02		
油枕	长×外径×壁厚: 5.05×1.20×0.01	0.098	Q235 钢
铁心绕组	长×宽×高: 5.58×1.13×3.72	113.936	硅钢; 铜

表2 模型材料参数

Table 2 Material parameters of the simulation model

材料	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ GPa	泊松比	强度/ MPa
Q235 钢	7 800	200	0.30	235
高强陶瓷	7 500	100	0.32	40
铸铝	2 700	70	0.30	130
硅钢	7 650	200	0.27	210
绝缘油	800	—	—	—

将各部件的有限元模型按 500 kV 主变压器的实际结构进行组装,得到变压器整体有限元模型。实际的变压器各部件之间均通过焊接或高强螺栓连接,连接处整体性较强,故各部件之间的连接设置为刚接。由于各部件的单元类型有所不同,用于实现刚接的连接方式也不同。梁单元部件与壳单元部件之间采用点一面耦合连接,实体单元部件与壳单元部件、壳单元部件与壳单元部件之间采用面

一面绑定连接。变压器短边、长边方向分别假定为 X 向、Y 向,竖直方向为 Z 向。组装后得到换流变压器有限元数值模型见图4。

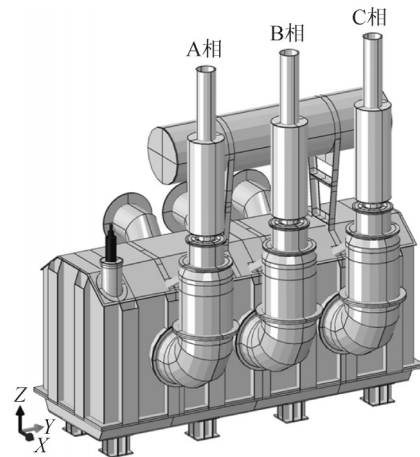


图4 变压器有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the power transformer

实际的变压器是以浮放的方式安装于基础台座之上,即变压器底部与基础无刚性连接,采用直接放置于混凝土基础台座上的方式进行安装,见图5。因此该变压器在地震作用下,底座处可以发生沿基础台面的水平滑动。此处的边界条件通过 Slide-Plane 连接器单元进行特殊建模处理,以模拟实际的浮放式基础。



图5 变压器浮放安装

Fig. 5 Free standing of the power transformer

实际变压器的出线端与 GIS 套管连接,套管上端靠近楼板位置为波纹管连接,见图6。波纹管具有一定的变形能力,不能作常规的固接处理,应当考虑波纹管实际的转动刚度,选用 Abaqus 中的 Bushing 连接器单元进行建模。

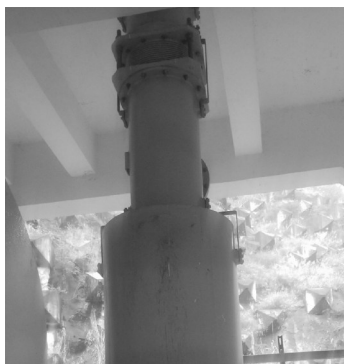


图6 GIS 出线端接口

Fig. 6 Outlet end interface of GIS

有限元数值模型的阻尼采用 Rayleigh 阻尼模型。建筑结构的抗震计算中,规范对于阻尼比的取值与结构类型有关<sup>[25]</sup>。现有的《电力设施抗震设计规范》指出电气设备的阻尼较小,建议取值不超过 0.02<sup>[26]</sup>。本变压器一套管体系的基本频率在 1~10 Hz 范围内,根据前两阶自振频率计算得到 Rayleigh 阻尼系数为 0.283 6 和 0.001 3。

## 2 模态计算分析

通过 Abaqus 软件中线性摄动分析计算变压器的自振模态,选用 Lanczos 求解器(分块兰索斯法)进行计算。该求解器是一种稀疏矩阵方程求解器,采用一组特征向量实现 Lanczos 迭代计算,将  $n \times n$  阶实

矩阵经相似变换约化为三对角矩阵以求解特征值问题的一种方法,运算速度快,输入参数少,特征值、特征向量求解精度高。同时该求解器采用了 Storm 序列检查,在用户感兴趣的频率范围内,在每个漂移点处如果找不到所有的特征值,Lanczos 方法会给出提示信息,弥补了丢根的缺陷。故文中选用 Lanczos 求解器对 500 kV 主变压器进行模态计算分析。

经有限元数值计算获取 500 kV 主变压器前 10 阶自振模态的基本频率及振型,见表 3。

表3 变压器模型频率和振型

Table 3 Vibration frequencies and modes of the transformer simulation model

阶数	频率/Hz	振型描述
1	1.796	油枕 X 向一阶平动
2	3.037	油枕 Y 向一阶平动
3	5.714	高压套管一升高座 X 向一阶平动
4	7.326	高压套管 B—升高座 Y 向一阶平动
5	7.623	高压套管 A—升高座 Y 向一阶平动
6	7.654	高压套管 C—升高座 Y 向一阶平动
7	8.517	油枕一阶扭转
8	12.149	高压套管一升高座 Y 向二阶平动
9	14.141	高压套管 B—升高座 X 向二阶平动
10	14.772	高压套管 AC—升高座 X 向二阶平动

可见该变压器的前 10 阶自振模态是高压套管—升高座体系及油枕等部件的一、二阶平动或扭转,自振频率在 1~15 Hz 范围内。其中各部件的一阶平动或扭转模态的自振频率在 1~10 Hz 范围内,与地震动的卓越频率 1~10 Hz 重合。由于类共振效应,该变压器在地震作用下的动力响应复杂且易产生较大的动力响应,因此有必要选择典型地震波进行地震响应时程计算以获取该 500 kV 变压器在地震作用下的动力响应特点。

## 3 地震响应分析

### 3.1 地震波选取

文中的变压器所在地区属于 II 类场地第二组,场地特征周期 0.4 s,抗震设防烈度为 VIII 度。考虑到电力设施的重要性,设计烈度应提高一度至 IX 度,根据《建筑抗震设计规范》<sup>[25]</sup>的要求,时程分析时所用地震加速度的最大值为 0.6g,故进行时程计算时将主震方向(X 向)地面峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)设置为 0.6g, X、Y、Z 三向峰值地面加速度比值为 1:0.85:0.65。根据《建筑抗震设计规范》<sup>[25]</sup>的要求,选取 7 组地震波输入用于时程计算,其中包括 2 组人工模拟加速度时程曲线(人工波 1、

人工波2)和5组实际强震记录(按获取强震记录的台站分别命名为El Centro波、Taft波、清平波、卧龙波、曾家波)。

7组地震波的平均加速度反应谱见图7,由图7可见3个方向上的平均反应谱与《电力设施抗震设计规范》<sup>[26]</sup>给出的II类场地地震影响系数曲线吻合较好。

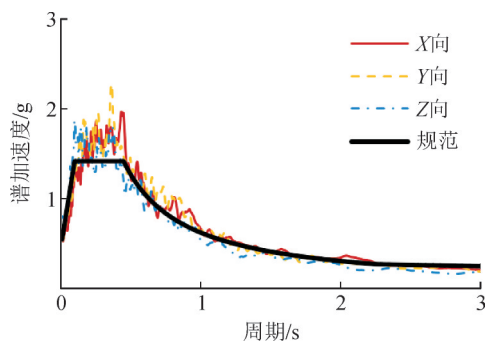


图7 地震动的平均谱与场地需求谱

Fig. 7 Average spectra and required response spectrum

### 3.2 高压出线端地震响应

根据模态计算分析可知,高压套管—升高座体系及油枕在地震作用下,相比其他构件具有较高的易损性<sup>[27-28]</sup>。因此选取高压出线端中的陶瓷套管根部、法兰根部和GIS套管变截面作为研究对象,提取了7组地震波下,A、B、C相中的各关键位置的应力响应。

7组地震波输入下高压出线端各关键位置的峰值应力见表4,并以各关键位置在各地震波输入下的峰值应力作为随机变量,采用具有95%保证概率的正态分布分别计算出A、B、C相各关键位置的峰值应力。

表4 高压出线端关键位置峰值应力

Table 4 Peak stress at the key positions on the high-voltage outlet end MPa

部件	均值 $\mu$	标准差 $\sigma$	$\mu+1.645\sigma$	
陶瓷套管	A相	17.96	4.80	25.86
	B相	18.92	7.07	30.55
	C相	17.76	4.59	25.31
法兰	A相	58.68	18.50	89.12
	B相	66.70	24.55	107.09
	C相	58.65	17.42	87.31
GIS套管	A相	123.49	38.00	185.99
	B相	139.36	55.71	231.00
	C相	121.56	39.18	186.01

高压出线端关键位置见图8。由图8可以发现GIS套管变截面的峰值应力明显高于法兰根部及陶瓷套管根部。在95%的保证概率下,A、B、C相中GIS套管变截面的峰值应力分别为185.99、231.00、186.01 MPa,另外B相中的法兰根部在95%保证概

率下的峰值应力达107.09 MPa,均超过了材料的极限应力而会发生破坏。故地震作用下GIS套管变截面处最大可能会出现峰值应力超过材料极限应力的风险,是该变压器的抗震薄弱位置。

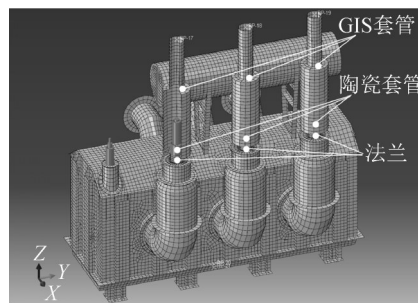


图8 高压出线端关键位置

Fig. 8 Key positions on the high-voltage outlet end

### 3.3 油枕地震响应

油枕支撑的关键位置见图9,在7组地震波输入下的峰值应力见表5,以油枕支撑根脚点在各地震波输入下的峰值应力作为随机变量,采用具有95%保证概率的正态分布分别计算出支撑4个脚点的峰值应力。

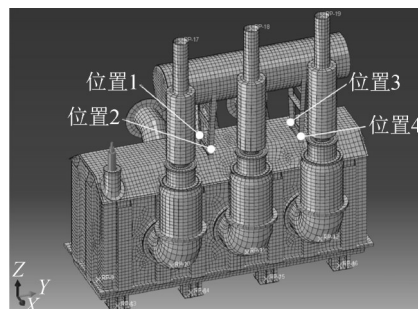


图9 油枕支撑关键位置

Fig. 9 Key positions on the support of the oil conservator

表5 油枕支撑关键位置峰值应力

Table 5 Peak stress at the key positions on the support of the oil conservator MPa

部件	均值 $\mu$	标准差 $\sigma$	$\mu+1.645\sigma$	
油枕支撑	位置1	197.23	46.53	273.76
	位置2	276.43	70.10	391.76
	位置3	198.98	43.26	270.15
	位置4	273.20	51.05	357.18

可以发现2号及4号脚点在地震作用下的应力响应偏大。在95%的保证概率下,4个脚点位置的峰值应力分别为273.76、391.76、270.15、357.18 MPa,可见,油枕支撑4个根部脚点的峰值应力均存在95%的概率会超过材料的极限应力水平,故油枕支撑根部也为该变压器的抗震薄弱位置。

### 3.4 变压器水平滑移分析

该500 kV 变压器采用浮放式基础,变压器箱体

直接搁置于基础台座上,靠变压器自身重力产生的静摩擦力保持变压器位置。在地震作用下,特别是竖向地震作用明显的近断层地震,变压器可能出现箱体与基础摩擦力不足而发生滑动,引发变压器掉台、导线牵拉破坏等问题,有必要对其基础滑移情况进行研究分析,评估变压器的基础抗震性能。El Centro波,卧龙波以及人工波1作用下的变压器基础滑移状况见图10。

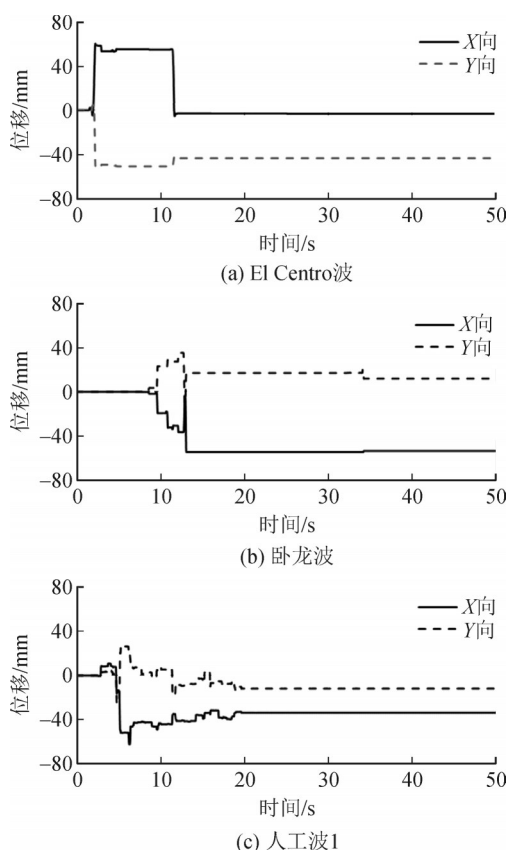


图10 地震波下变压器水平滑移

Fig. 10 Horizontal sliding of the transformer subjected to earthquakes

从图10中可以看出,在地震作用下,变压器出现了不同程度的基础滑移情况。在人工波1作用下基础滑移尤为明显,在多个时间点均出现了一定的滑移,导致整个变压器频繁出现整体位移,在导线中不断产生牵拉力,这是高压侧出线端应力水平较高的主要原因。而在El Centro波等其他几组地震波作用下出现了典型的脉冲型滑移情况,即基础只在少数几个时间点发生较大的滑动,滑动后停留在一定的位置不再滑动。这是由于这几条地震波具有典型的近断层脉冲型地震动的特征,这类地震波作用下,箱体会发生较大的残余位移,导致在GIS出线端等位置持续存在一定的牵拉应力,引发结构破坏。

## 4 结论

文中对500 kV浮放式变压器进行了地震响应分析和水平滑移分析。得出以下结论:

1)变压器的基本自振模态是高压套管一升高座体系及油枕等部件的一阶平动或扭转模态,自振频率在1~10 Hz范围内,与地震动的卓越频率重合。

2)地震作用下变压器的GIS套管变截面处、油枕支撑根部应力水平较高,存在峰值应力超过材料极限应力的风险,是变压器的抗震薄弱位置。

3)地震作用下浮放变压器产生一定的水平滑移,导致变压器整体位移,在高压出线端结构内产生一定的牵拉应力,致使应力水平增加,加剧结构破坏的可能。

## 参考文献:

- [1] 谢强,李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 126-131.  
XIE Qiang, LI Jie. Current situation of natural disaster in electric power system and countermeasures[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(4): 126-131.
- [2] 罗智荣,黄丰,郭淳,等.基于多物理场仿真的油浸式变压器振动特性分析及影响因素研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(11): 48-55.  
LUO Zhirong, HUANG Feng, GUO Chun, et al. Vibration characteristics analysis and influencing factors of oil-immersed transformer based on multi-physical field simulation[J]. Smart Power, 2024, 52(11): 48-55.
- [3] 谢强. 电力系统的地震灾害研究现状与应急响应[J]. 电力建设, 2008, 29(8): 1-6.  
XIE Qiang. State-of-the-art of seismic disaster research and emergency response of electric power system[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(8): 1-6.
- [4] 侯赛,成润坤,刘达.基于二次采样和集成学习方法的变压器故障预测[J]. 智慧电力, 2024, 52(7): 40-47.  
HOU Sai, CHENG Runkun, LIU Da. Transformer fault forecast based on re-sampling and integrated learning approach[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 40-47.
- [5] XIE Q, ZHU R. Damage to electric power grid infrastructure caused by natural disasters in China[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2011, 9(2): 28-36.
- [6] 朱旺,毛宝俊,谢强. 1100 kV特高压变压器套管震后力学性能快速评估方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4904-4914.  
ZHU Wang, MAO Baojun, XIE Qiang. Fast evaluation method on post-earthquake mechanical performance of 1100 kV UHV transformer bushing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4904-4914.
- [7] 谢强,何畅,杨振宇,等. 1100 kV特高压变压器瓷套管地震作用破坏试验与分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3154-3162.

- XIE Qiang, HE Chang, YANG Zhenyu, et al. Tests and analyses on failure mechanism of 1 100 kV UHV transformer porcelain bushing [J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(10):3154-3162.
- [8] 何畅, 何紫薇, 江力强, 等. 多重不确定性对特高压变压器瓷套管地震失效风险的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(15):5763-5774.
- HE Chang, HE Ziwei, JIANG Liqiang, et al. Effects of different sorts of uncertainties on seismic failure risk of ultra-high-voltage porcelain transformer bushing[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(15):5763-5774.
- [9] 胡雪莹, 李琳. 基于全寿命周期成本和综合故障率的油浸式变压器经济寿命评估[J]. *智慧电力*, 2024, 52(1):47-54.
- HU Xueying, LI Lin. Economic life evaluation of oil-immersed transformer based on life cycle cost and comprehensive failure rate [J]. *Smart Power*, 2024, 52(1):47-54.
- [10] FILIATRAULT A, MATT H. Experimental seismic response of high-voltage transformer-bushing systems[J]. *Earthquake Spectra*, 2005, 21(4):1009-1025.
- [11] 李晓璇, 谢强.  $\pm 800$  kV 换流变压器地震易损性分析[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(15):244-251.
- LI Xiaoxuan, XIE Qiang. Seismic vulnerability analysis of  $\pm 800$  kV converter transformer[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(15):244-251.
- [12] 柏文, 唐柏赞, 戴君武, 等. 考虑地震和材料强度不确定性的瓷柱型电气设备易损性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(7):2594-2604.
- BAI Wen, TANG Baizan, DAI Junwu, et al. Fragility analysis of porcelain cylindrical electrical equipment considering material strength and seismic uncertainties[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(7):2594-2604.
- [13] 卿东生, 陈星, 李晓璇, 等. 大型变压器抗震加固方法及其经济效用分析[J]. *高压电器*, 2021, 57(11):139-147.
- QING Dongsheng, CHEN Xing, LI Xiaoxuan, et al. Seismic reinforcement method and its economic effect analysis of large transformer[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(11):139-147.
- [14] WEN J, LI X, XIE Q. Cost-effectiveness of base isolation for large transformers in areas of high seismic intensity[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2022, 18(6):745-759.
- [15] 谢强, 孙新豪, 李晓璇. 特高压换流站换流变体系抗震韧性评估方法[J]. *高电压技术*, 2022, 48(9):3582-3592.
- XIE Qiang, SUN Xinhao, LI Xiaoxuan. Seismic resilience evaluation of converter transformer system in UHV converter station [J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(9):3582-3592.
- [16] BELLORINI S, SALVETTI M, BETTINALI F, et al. Seismic qualification of transformer high voltage bushings[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, 13(4):1208-1213.
- [17] GILANI A S, WHITTAKER A S, FENVES G L. Seismic evaluation and retrofit of 230 kV porcelain transformer bushings[J]. *Earthquake Spectra*, 2001, 17(4):597-616.
- [18] GILANI A S, WHITTAKER A S, FENVES G L, et al. Seismic evaluation of 196 kV porcelain transformer bushing[R]. Richmond: PEER, 1999.
- [19] GILANI A S, WHITTAKER A S, FENVES G L, et al. Seismic evaluation of 550 kV porcelain transformer bushings[R]. Richmond: PEER, 1999.
- [20] HE C, XIE Q, ZHOU Y. Influence of flange on seismic performance of 1 100 kV UHV transformer bushing[J]. *Earthquake Spectra*, 2019, 35(1):447-469.
- [21] 雷翔胜, 余梦泽, 王彦峰, 等. 变压器绕组振动特性的高精度求解与分析[J]. *南方电网技术*, 2024, 18(4):80-87.
- LEI Xiangsheng, YU Mengze, WANG Yanfeng, et al. High-accurate solution and analysis for vibration characteristics of transformer windings[J]. *Southern Power System Technology*, 2024, 18(4):80-87.
- [22] 谢强, 孙新豪, 赖炜煌. 变压器一套管体系抗震加固理论分析及振动台试验[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(19):6390-6398.
- XIE Qiang, SUN Xinhao, LAI Weihuang. Theoretical analysis and shaking table test on seismic reinforcement of transformer-bushing system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(19):6390-6398.
- [23] 鲁翔, 陈向东, 潘国洪, 等. 变压器一套管体系的动力模型及抗震加固分析[J]. *高压电器*, 2022, 58(9):149-156.
- LU Xiang, CHEN Xiangdong, PAN Guohong, et al. Dynamic model and seismic reinforcement analysis of transformer-bushing system [J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(9):149-156.
- [24] 马秉伟, 陈晓国, 郑宇, 等. 电力变压器环保绝缘油研究进展与趋势[J]. *南方电网技术*, 2024, 18(5):12-21.
- MA Bingwei, CHEN Xiaoguo, ZHENG Yu, et al. Research progress and trends of eco-friendly insulating oil for power transformers[J]. *Southern Power System Technology*, 2024, 18(5):12-21.
- [25] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [26] 电力设施抗震设计规范: GB 50260—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- Code for seismic design of electrical installations: GB 50260—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [27] 翁幸, 王继慷, 王一, 等. 基于多端口直流变压器的氢燃料电池—储能协调控制策略[J]. *南方电网技术*, 2024, 18(6):98-111.
- WENG Xing, WANG Jikang, WANG Yi, et al. Coordinated control strategy of hydrogen fuel cell-energy storage based on multi-port DC transformer[J]. *Southern Power System Technology*, 2024, 18(6):98-111.
- [28] 程启明, 陈颖, 孙英豪, 等. 电网电压不平衡下 MMC-SST 反馈线性化滑模控制策略[J]. *南方电网技术*, 2024, 18(3):129-137.
- CHENG Qiming, CHEN Ying, SUN Yinghao, et al. Feedback linearization sliding-mode control strategy for MMC-SST under unbalanced power grid voltage[J]. *Southern Power System Technology*, 2024, 18(3):129-137.
- 洪志湖(1993—), 男, 工程师, 硕士, 从事电力设备抗震研究(E-mail: zhihuhong@foxmail.com).
- 邹德旭(1984—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力设备抗震研究(E-mail: zoudexu@yndw.yn.csg.cn).
- 朱旺(1996—), 男, 博士(后), 从事电力设备抗震研究(通信作者)(E-mail: wang4027146@foxmail.com).