第 39 卷 第 3 期	地 莀 丄 程 字 报	Vol. 39 No.3
2017年6月	CHINA EARTHQUAKE ENGINEERING JOURNAL	June,2017

陈传新,刘彦辉,贺瑞,等.考虑液-固耦合的大型超高压换流变压器地震响应研究[J].地震工程学报,2017,39(3):0397-0403. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0397

CHEN Chuan-xin,LIU Yan-hui,HE Rui, et al.Study on the Seismic Response Study of a Converter Transformer Considering Oil-solid Interaction[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(3):0397-0403.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017. 03.0397

# 考虑液-固耦合的大型超高压换流变压器地震响应研究。

陈传新1, 刘彦辉2, 贺瑞3, 陈寅1, 谭平2

(1.中国电力工程顾问集团中南电力设计院,湖北 武汉 430071;

2.广州大学减震控制与结构安全国家重点实验室(培育),广东广州 510405; 3.电力规划总院有限公司,北京 100120)

摘要:针对大型超高压换流变压器的地震响应问题,以一超高压±800 kV 换流变压器为研究对象, 考虑其本体中油与箱壁的相互作用建立三维有限元分析模型,采用 LS-DYNA 分析换流变压器的 自振特性、地震作用下的动力响应规律以及换流变压器的薄弱部位。研究结果显示,对于大型超高 压换流变压器,本体中油与箱壁的相互作用对结构动力响应有一定的放大作用,进行自振特性和地 震响应分析时应考虑;套管体系的薄弱部位为套管的底部和中间部位,在这两个位置拉应力和压应 力最大值交替出现;换流变套管体系在地震作用下的位移较大,套管顶部的导线应设置足够大的伸 缩距离。

# Study on the Seismic Response Study of a Converter Transformer Considering Oil-solid Interaction

CHEN Chuan-xin<sup>1</sup>, LIU Yan-hui<sup>2</sup>, HE Rui<sup>3</sup>, CHEN Yin<sup>1</sup>, TAN Ping<sup>2</sup>

(1. Central southern China Electric Power Design Institute, China Power Engineering Consulting Group Corporation, Wuhan 430071, Hubei, China; 2.State Key Laboratory for Seismic Reduction /Control & Structural Safety (Cultivation Base), Guangzhou University, Guangzhou 510405, Guangdong, China; 3. Electric Power Planning & Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: With the aim of carrying out a dynamic response study of a large, ultrahigh voltage converter transformer, the 3D FEM analysis model of an actual  $\pm$ 800 kV converter transformer was built considering oil-solid interaction. Then, the natural vibration characteristics, dynamic response rules, and vulnerable points of the  $\pm$ 800 kV converter transformer were analyzed by using the LS-DYNA software. Simulation results show that interaction of the oil and wall has an obvious amplification effect on the dynamic response of the converter transformer, and that the oil-solid interaction should be considered in the analysis of natural vibration characteristics and

① 收稿日期:2016-01-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51478131,51008009);广东省高校科技创新项目(2014KQNCX094)

作者简介:陈传新(1964-),男,湖北人,教授级高级工程师,主要从事变电站建筑及构筑物的抗震设计。 E-mai;chenchuanxin@csepdi.com。

通信作者:刘彦辉(1980-),男,河南扶沟人,博士后,副研究员,硕士生导师,国家一级注册结构工程师,主要从事结构振动控制的研究。E-mail;Liuyanhui2012@163.com。

seismic response of a converter transformer. The vulnerable points of the sleeve are at the root and middle part of the sleeve, and the max tensile and press stress at these points appear in turn. The sleeves of the converter transformer show large displacement during an earthquake. In addition, the electric wire at the top of the sleeve should have enough reserved length.

Key words: converter transformer; oil-solid interaction; seismic response; dynamic analysis; ultrahigh voltage equipment

### 0 引言

换流变压器是换流站的重要电气设备,其具有体积大、质量大的特点,且瓷套管较长,在地震作用下(特别是高烈度地震作用下)将产生较大的地震力和位移,造成换流变的破坏,威胁到换流变的运行安全,直接造成重大的经济损失,更重要的是会造成间接的重大经济损失与人员伤亡,如影响地震后的抗震救灾工作及产生次生灾害<sup>[1]</sup>。自上世纪 60 年代以来,我国发生了多次对变压器等电气设备造成较大震害的地震。对国内外多次大地震灾害的调查表明已经发生过多起变电站主变压器在地震时发生倾覆、滑移及瓷套管断裂等<sup>[2-6]</sup>,因此变压器的抗震问题一直是土木工程、地震工程及电子工程领域的研究热点之一。

采用动力有限元技术分析大型电力变压器动力 响应一直是研究大型变压器抗震性能的重要手段。 在国外,Bellorini 等[7]用线性的壳元模拟钢制箱体、 用线性的梁单元模拟瓷套管,将储油罐视为集中质 量,建立了160MVA 230/135 型油浸式变压器的有 限元模型,并进行地震响应分析;Ersoy 等<sup>[8]</sup>建立了 变压器-套管体系的有限元模型,得到了变压器与套 管之间相互作用关系,认为套管的地震响应与变压 器本体的刚度有很大关系,尤其是变压器顶盖的刚 度很大程度上影响套管的响应。在国内,潘得引 等<sup>[9]</sup>对一 500 kV 油纸电容式变压器套管进行了理 论分析,介绍了变压器套管自振频率的传递矩阵方 法,并介绍了确定变压器套管地震作用力的计算方 法;李玉恒<sup>10]</sup>开展了运行变压器的抗震设防分析, 介绍了变压器地震作用下考虑惯性力的静载分析模 型,变压器底部与基础的摩擦力、地震作用下的滑动 距离计算及抗倾覆计算等;李子国等[11-13]对两台型 号分别为 110 kV SFSFZ-31500/110 及 35 kV S7-220/10 的变压器进行了地震作用下的有限元分析 计算,考虑了外壳箱体与液体的动压力对变压器本 体结构动力特性的影响,分析认为,变压器有油状况 下,应力普遍比无油状况下高 20%;且变压器基本 频率高于10 Hz,从变压器的响应结论来看,变压器

具有较好的抗震能力,与实际地震引起的破坏不很 相符;孟敏捷等<sup>[14]</sup>建立了 SFPL-120000/220 型变压 器的有限元模型,将液体单元简化为固体单元,没有 考虑变压器的液固耦合问题,得到变压器不同场地 条件下的易损性曲线;曹枚根<sup>[15]</sup>对大型电力变压器 套管体系抗震性能及隔减震控制进行了理论和试验 研究。本文在上述研究的基础上,以一实际超高压 ±800 kV 换流变压器为研究对象,考虑本体中油与 箱壁的相互作用,建立三维有限元分析模型,研究油 与箱壁的相互作用对超高压换流变压器的动力响应 的影响,以及其地震响应规律。

#### 1 超高压换流变压器有限元模型

分析模型为我国高烈度地震区远距离输电的直流变电站中的±800 kV换流变压器,其结构如图 1 所示,各部分的质量见表 1。换流变压器身主要包括铁心与绕组,一般通过定位装置固定在换流变油 箱的底板上,为了尽量真实反映结构的布局并考虑 地震作用下油箱的稳定性,有限元分析时内部铁心 及绕组等效为实体单元。正常运行情况下,换流变 的油箱和油枕内部充满绝缘油,主要发挥绝缘与冷 却的作用。换流变油均匀地分布在换流变油箱和油 枕内部,质量分布均匀,作为一种流动的介质与箱 壁、器身等结构发生相互的液固耦合作用。毫无疑 问,换流变油在地震作用下对换流变的动力特性会 有一定的影响,因此模拟时为了准确得到换流变的 地震响应,换流变液体边界条件是不可忽略的。

表 1 ±800 kV 换流变压器及套管体系各部分的装配质量 Table 1 Component mass of 800 kV converter transformer

结构组成	质量/kg	材料属性
本体	285 000	Q235D
高低压升高座	74 700	Q235D
风扇	8 700	Q235D
油枕	4 000	Q235D
本体中的油	130 500	采用密度为 0.85 kg/m <sup>3</sup> 流体模型
冷却装置中的油	1 700	采用密度为 0.85 kg/m <sup>3</sup> 固体模型
油枕中的油	4 350	采用密度为 0.85kg/m <sup>3</sup> 固体模型
总结	509 000	

本文着重考虑油箱中油对箱体的影响,液固耦

合模型 ALE(Arbitrary Lgrangian.Eulerian) 描述本 体中的油;油中的网格点按照液面的运动或结构与 液体接触面的移动而不断更新,从而将运动边界的 非线性效应融入到计算方法中。在空间域上采用有 限元离散格式;在时间域上 Navier-Stokes 方程采用 分步计算格式。建立的三维有限元模型如图 1 所示。



图 1 ±800 kV 换流变压器结构图及有限元模型 Fig.1 Structure and FEM of converter transformer

高压套管与本体之间采用法兰连接。由于法兰 与高压套管之间是用水泥等材料灌注到法兰中,连 接部件的平动刚度很大,基本接近固结,而转动刚度 介于铰接与固结之间,属于弹性连接,计算中宜计入 连接部分的转动刚度,即法兰连接视为可以转动的 柔性节点而不是刚性节点,高压套管法兰连接的力 学模型被视为半刚性节点计算模型。我国电力设 备抗震设计规范参考了日本电气技术标准委员会提出的经验公式,并结合试验与分析研究,给出了法兰与高压电套管胶装连接方式的弯曲刚度计算公式。 该公式物理概念清晰,基本能够反映连接部位的力 学特性。

$$K_{\rm c} = \beta \, \frac{d_{\rm c} h_{\rm c}^2}{t_{\rm e}^2} \tag{1}$$

式中:K。为弯曲刚度;β为计算系数,规范推荐为 6.54×10<sup>7</sup>;d。为高压电套管胶装部位外径;h。为高 压电套管与法兰胶装高度;t。为法兰与高压电套管 之间的间隙距离。

### 2 自振特性分析

采用流体单元模拟本体中的油,考虑箱体与箱体内部油之间的流固耦合作用,基于子空间迭代法 计算得到了 ABB 换流变及套管体系的前 10 阶振动 模态参数,±800 kV 换流变压器的自振频率见表 2。换流变本体的自振频率为 15.2 Hz,前四阶自振 振型见图 2。可以看出,无论是 220 kV 套管或是 800 kV 的套管,其自振频率均在地震波的卓越周期 范围内,特别是对于 800 kV 的套管,其长度较长、 质量较重,其周期在地震反应谱的平台段,易发生共 振,且该套管倾斜,两个水平方向会相互耦合,增加 结构的动力响应。



图 2 ±800 kV 换流变压器结构图及有限元模型 Fig.2 Structure and FEM of converter transformer

表 2 换流变自振频率

 Table 2
 Frequency of converter transformer

振型	频率/Hz	振型描述
1	1.675	220 kV 套管 2Y 向第1阶振动
2	1.679	220 kV 套管 2X 向第1阶振动
3	3.658	800 kV 套管 4Y 向第1阶振动
4	3.678	800 kV 套管 4X 向第1阶振动
5	3.849	油枕 X 向第1阶振动
6	3.880	800 kV 套管 3Y 向第1阶振动
7	3.898	800 kV 套管 3X 向第1阶振动
8	4.590	风扇 X 向第1阶振动
9	5.460	换流变套管+风扇+油枕
10	5.460	换流变套管 2 阶振动

## 3 换流变压器地震响应分析

拟建场地抗震设防烈度 Ⅲ度(0.3g),场地类别 Ⅱ类,分析时选用为 El Centro 波、Taft 波以及 Kobe 波,输入地震波峰值为 0.31g 和 0.51g,在 X(换 流变压器短边方向)、Y(换流变压器长边方向)同时 输入下计算换流变压器及其套管的加速度、位移、 应力分布情况。图 3 为罕遇地震 El Centro 波作用 时不同时刻换流变压器本体中油的应力云图。可以 看出,由于液体的流动性,本体中的油并不能看作是



图 3 El Centro 地震作用时不同时刻本体中油的应力云图 Fig.3 Stress of oil under El Centro at different time

固体的材料,油对换流变压器的本体有一定影响,不同时刻,本体中油的压应力不一致。通常情况,在Y 方向的两个端面处对箱体压应力较大、在X方向底 部压应力较大以及中间上部压应力较大,且随地震 波的变化其压应力的作用范围以及大小都在不断改 变,这与油在本体中的变化是有关系的。

#### 3.1 套管的应力分析

大型超高压换流变压器套管的受力状态是最受 关注的地方。在地震作用下,换流变压器的套管长 度较长、质量较大的换流变压器容易遭受破坏。在 地震作用下由于 800 kV 高压套管的受力最不利, 因此本文选择两个 800 kV 高压套管进行分析,并 绘制出其应力云图。图 4 为咖度罕遇 El Centro 地 震波作用下换流变压器套管在各个时刻的应力云 图。从图 4 可以看出,在套管与法兰柔性连接的位 置应力较大(套管的底部),不同的时刻套管中间位 置也出现较大的应力。这两个位置的应力最大值交 替出现,且拉应力与压应力也不断交替,因此在地震 作用下,这两个位置较容易发生破坏。

#### 3.2 位移响应分析

表 3 分别列出了峰值为 0.31g 和 0.51g 的 El Centro 波、Taft 波以及 Kobe 波双向输入地震波作 用下换流变 800 kV 套管 3 和套管 4 的顶部位移响 应的峰值。在三种地震波作用下,由于换流变压器 本体相对套管刚度较大,其相对位移较小,而管顶部 相对本体的位移响应峰值较大,其中峰值为 0.51g 时 800 kV 换流变套管顶部 X 向的相对位移为 82.7 mm,绝对位移为 121.5 mm;Y 向的相对位移为78.1 mm,绝对位移为116 mm。因此在套管顶部的导线 应设置足够大的伸缩距离,或适当增加导线的弧垂, 避免由于导线与换流变压器套管非一致相位运动而 导致套管被导线拉坏。

表 3 X、Y 双向输入时换流变压器本体、套管、油枕 顶部位移响应峰值(mm)

工况		方向	本体底位移	油枕下方	套管 3	套管 4
	El Centro	X	1.439	0.393	8.001	9.797
0.01	波	Y	0.605	0.528	5.142	4.444
	Kobe 波	X	11.828	0.994	33.257	36.667
0.31g		Y	20.109	1.878	37.494	40.733
	Taft 波	X	18.589	1.235	19.20	23.204
		Y	19.390	1.298	25.942	26.883
	El Centro	X	2.656	0.83	15.98	16.541
0.51g	波	Y	1.615	0.801	11.20	8.458
	Kobe 波	X	27.290	2.384	75.071	71.662
		Y	45.137	5.208	78.047	82.746
	Taft 波	X	39.123	2.281	38.448	45.194
		Y	38.962	5.974	45.840	50.54

Fig 3 Displacement of sleeve and converter transformer and oil tank (mm)

#### 3.3 加速度响应分析

表4为各工况地震波输入下,换流变本体、套管 顶部的加速度峰值及其加速度动力放大系数。从表 4可以看出,套管3顶部加速度放大动力系数最大 值的平均值为3.330,套管4顶部为3.731,换流变本 体为1.265;换流变本体对地震波有一定的放大作 用,进行动力响应分析时,换流变本体和本体中的油 不能看作刚体。同时可以看出,套管体系的动力放大 系数较大,容易发生共振,为抗震不利的结构,采用有

401





图 4 El Centro 地震作用时不同时刻 800 kV 套管应力云图

Fig.4 Stress of 800 kV sleeves under El Centro at different time

效的措施降低超高压换流变压器套管的加速度动力 放大作用是提高换流变压器抗震能力的重要涂径。

(g) *t*=14.3 S

#### 结 4 论

以一实际超高压±800 kV 换流变压器为研究 对象,考虑换流变压器本体中油与箱壁的相互作用 建立三维有限元分析模型,通过采用 LS-DYNA 对 其进行动力有限元分析,得到以下结论:

(1) 换流变本体的自振频率为 15.2 Hz, 地震输 入的卓越周期越小,地震响应越大,套管体系的自振 频率在地震波的卓越频率范围内,容易发生共振。

-3.164e+08

(h) t=15.0 s

(2) 由于液体的流动性,本体中的油不能看作 是固体材料,油对换流变压器的本体有一定的影响, 在不同的时刻本体中油的压应力并不一致,在Y方 向的两个端面处油对箱体压应力较大,在X方向底 部压应力较大,以及箱壁中间上部压应力较大。且 换流变压器本体、套管顶部加速度峰值(g)及动力放大系数

20	1	7	白	E
20	-			

Fig 4 Acceleration at the top of sleeve $(g)$ and converter transformer								
		ナム	<b>太</b> 体 0	<b>太</b> 偽 4	木体面如	动力放大系数		¢
	上701	刀凹	至日 3	委官 4	平平顶部	套管 3	套管 4	本体
El Centro 0.31g Taft 波	ELC	X National X	0.916	0.946	0.363	2.936	3.032	1.171
	El Centro 仮	Y	0.981	0.989	0.371	3.259	3.286	1.197
	TUM	X	0.966	0.985	0.373	3.178	3.240	1.203
	I alt 波	Y	0.954	0.967	0.369	2.991	3.031	1.190
	17 1 और	X	0.924	0.922	0.376	2.952	2.946	1.213
	Kobe 仮	Y	0.987	0.959	0.381	3.123	3.035	1.229
	亚拉店	X	0.952	0.954	0.371	3.330	3.330	1.196
	千均值	Y	0.984	0.958	0.374	3.316	3.316	1.205
	El Contro Mt	X	1.742	1.890	0.632	3.363	3.649	1.239
0.51g	El Centro 波	Y	1.609	1.823	0.613	3.106	3.519	1.202
	TUM	X	1.598	1.991	0.633	3.115	3.881	1.241
	I alt 仮	Y	1.595	1.796	0.621	3.085	3.474	1.218
	17 1 और	X	1.646	1.847	0.631	3.209	3.600	1.237
	Kobe 波	Y	1.695	1.959	0.702	3.317	3.834	1.376
	亚拉达	X	1.685	1.962	0.632	3.225	3.731	1.239
	平均沮	Y	1.710	1.827	0.645	3.180	3.677	1.265

-

随着地震波的变化,其压应力的作用范围以及大小 都在不断改变。

表 4

(3) 在 III 度 罕 遇 地 震 时, 套 管 的 最 薄 弱 部 位 为 套管的底部和中间部位,这两个位置的拉应力和压 应力最大值交替出现,其最大应力已经超过材料的 屈服强度,进入塑性。

(4) 强震时, 换流变压器套管体系最大位移达 到 82.7 mm,建议设计时在套管顶部的导线设置足 够大的伸缩距离,避免由于导线与 ABB 换流变套管 振动相位不一致运动而导致套管被导线拉坏。

#### 参考文献(References)

- [1] 赵成刚,冯启民.生命线地震工程[M].北京:地震出版社,1994. ZHAO Cheng-gang, FENG Qimin, Lifeline Earthquake Engineering[M].Bejing: Seismological press, 1994. (in Chinese)
- [2] 刘彦辉.带有分布参数的串联体系地震响应分析及智能控制 [D].兰州:兰州理工大学,2009.

LIU Yan-hui.Seismic Response Analysis and Smart Control of Serial System with Distributed Parameters [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2009. (in Chinese)

[3] 曹枚根.大型电力变压器套管体系抗震性能及隔减震控制研究 [D].广州:广州大学,2011. CHAO Mei-gen. Research and Application on Seismic Control

Technology for the System of Large Power Transformer[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2011. (in Chinese)

[4] 于永清,李光范,李鹏,等.四川电网汶川地震电力设施受灾调 研分析[J].电网技术,2008,32(11):1-6.

YU Yong-qing, LI Guang-fan, LI Peng, et al. Investigation and Analysis of Electric Equipment Damage in Sichuan Power Grid Caused by Wenchuan Earthquake[J]. Power Sys Tech, 2008, 32 (11):1-6.(in Chinese)

- [5] 张建业,樊迎春.包头 6.4 级地震灾害特点及城市地震对策[J]. 西北地震学报,2005,27(4):346-350. ZHANG Jian-ye, FAN Ying-chun. Disaster Characteristics of M<sub>S</sub> 6.4 Baotou Earthquake and Countermeasures of the City Earthquake J]. Northwestern Seismological Journal, 2005, 27 (4):346-350.(in Chinese)
- [6] 王兰民,吴志坚.岷县漳县 6.6 级地震震害特征及其启示[J].地 震工程学报,2013,35(3):401-412. WANG Lan-min, WU Zhi-jian, Earthquake Damage Characteristic of the Minxian - Zhangxian  $M_{\rm S}$ 6.6 Earthquake and Its Lessons[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35 (3):401-412.(in Chinese)
- [7] Bellorini S, Salvetti M, Bettinali M, et al. Seismic Qualification of Transformer High Voltage bushings[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1998.
- [8] Ersoy S, Saadeghvaziri A. Seismic Response of Transformer Bushing Systems [J]. IEEE Trans Power Del, 2004, 19(1): 131-137.
- [9] 潘得引,林循泓.500 kV 超高压油纸电容式变压器套管抗震理 论计算[J].南京工学院学报,1986,16 (4):98-106. PAN De-yin, LIN Xun-hong. A Theoretic Computation of the Antiseismic Performance for 500 kV Extrahigh Voltage Oilimpregnated Paper Condenser Transformer Bushings[J].Journal of Nanjing Institute Technology, 1986, 16(4): 98-106. (in Chinese)
- [10] 李玉恒.运行变压器的抗震设防分析[J].山西电力技术, 1997,17(5):43-48.

LI Yu-heng. Analysis of Seismic Fortification Criterion for Power Transformer J]. Shanxi Electric Power, 1997, 17(5): 43-48.(in Chinese)

[11] 李子国,史守峡,于海年.变压器结构的动力反应分析[J].世 界地震工程,1996,2(1):48-52.

LI Zi-guo, SHI, SHI Shou-xia, YU Hai-nian. Dynamic Response Analysis of Power Transformer Structure[J].World Earthquake Engineering,1996,2(1):48-52.(in Chinese)

- [12] 李子国,景丽英.S7-200110 型变压器抗震分析[J].地震工程 与工程振动,1997,17(4):99-105.
  LI Zi-guo,JING Li-ying.Seismic Analysis of S7-200110 Power Transformer[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,1997,17(4):99-105. (in Chinese)
- [13] 李子国,汤国君,景丽英,等.液体-固体相互作用的电力变压 器结构的地震响应分析[J].地震工程与工程振动,1998,18 (1):103-107.

LI Zi-guo, TANG Guo-jun, JING Li-ying, et al. Earthquake Response Analysis of Power Transformer Structure Considering Oil-solid Interaction[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(1): 103-107. (in Chinese)

- [14] 孟敏婕,陈玲俐,叶志明.油浸式高压变压器地震易损性分析
   [J].世界地震工程,2007,23 (3):163-167.
   MENG Min-jie, CHEN Ling-li, YE Zhi-ming. Modeling and Seismic Fragility Analysis of Transformers[J].World Earthquake Engineering,2007,23(3):163-167.(in Chinese)
- [15] 曹枚根,周福霖,谭平,等.变压器及套管隔震体系地震反应及 隔震层参数分析[J].中国电机工程学报,2012,32(13):166-175.

CAO Mei-gen,ZHOU Fu-lin,TAN Ping,et a.Earthquake Response and Isolation Layer Parameter Effect of Seismic Isolation Systems of Transformers With Bushings[J].Proceedings of the CSEE,2012,32 (13):166-175.(in Chinese)