

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.016

1 100 kV 变压器套管抗震性能研究

金松安, 李 龙, 魏劲容, 李西育, 党镇平

(西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077)

摘要: 通过对某型 1 100 kV 变压器套管(A 型)的抗震计算,发现瓷件圆弧处的应力比瓷根部直线部分的应力大的现象。在另一种结构的 1 100 kV 变压器套管(B 型)的抗震试验中,证实了计算中遇见的瓷件圆弧处的应力比直线部分应力大的现象,因此仅以瓷根处直线部分的应力作为抗震试验通过与否的标准并不准确,如何判断抗震试验是否通过还需进一步的探讨。

关键词: 1 100 kV 特高压; 变压器套管; 抗震; 瓷件圆弧处; 危险横截面

Study on Anti-seismic Performance of 1 100 kV Transformer Bushing

JIN Songan, LI Long, WEI Jinrong, LI Xiyu, DANG Zhenping

(Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: By anti-seismic calculation of one type of 1 100 kV transformer bushing(Type A), it reveals the arc area stress is bigger than it in straight line area, and this is verified in anti-seismic test of another type of 1 100 kV transformer bushing (Type B). Therefore, it is not accurate to take root-section area stress to determine whether the seismic test is pass or not. It needs further discussion to how to judge the seismic test is pass or not.

Key words: 1 100 kV ultra-high voltage; transformer bushing; seismic; the arc area in porcelain; dangerous cross-section

0 引言

在各种自然灾害中,地震是对电力系统威胁最大的灾害之一。强烈的地震不仅会造成各种电力设施的严重损坏,甚至会使电力系统瘫痪,严重影响正常的生产、生活和抗震救灾工作,而且有可能引发火灾等次生灾害,对人民群众的生命财产安全构成巨大威胁^[1-3]。

中国目前正在建设和运行的特高压电网在规划上将通过多个地震带^[4],部分特高压变电站将建立在电网抗震设防区的中、高等级区域^[5-6],抗震要求很高。而特高压交流电气设备与其他电压等级电气设备相比,在体量上更大、结构体系上更复杂,更加突出了“高、大、柔、重”的特点,在地震中也更易损坏^[7-8],因此提高特高压交流电气设备的抗震性能,保证特高压变电站的安全稳定运行成为重中之重^[9]。

特高压所使用的变压器体积巨大,采用真型产品进行抗震试验的方法已经不能实现,通常采用的

方法是进行变压器套管的单独抗震试验,在试验过程中对套管危险区域的应力值及如何判断是否通过试验均出现争议^[10-12]。文中从确定抗震试验危险区域入手,结合仿真计算与试验验证,揭示瓷件圆弧处的应力比瓷根应力大的现象。

1 套管危险区域范围

抗震试验时需测量危险横截面的应力值,作为判断试验是否通过的判断依据,因此试验前需先确定危险横截面的位置^[13-14]。

《IEC/TS-61463—2000 ed2:Bushings-seismic qualification》第 9 节《振动试验评定》9.1.3《测量》中规定必须测量危险横截面的应变^[15],但危险横截面位于什么位置,标准中未有明确说明。在其附录 D 中示例的变压器套管 D.2 套管的危险部分中指出套管最危险部分为绝缘子底部,见图 1。

国内现有标准未对抗震试验应变片测量区域进行规定,仅在作废的 GB/T 13540—1992《高压开关设备和控制设备的抗震要求》对电阻应变片的布点

收稿日期:2015-11-22; 修回日期:2015-12-27

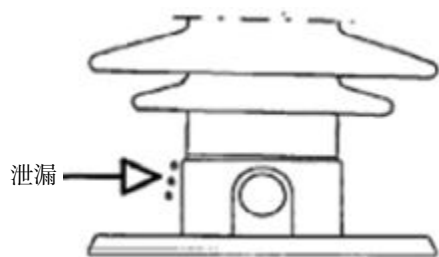
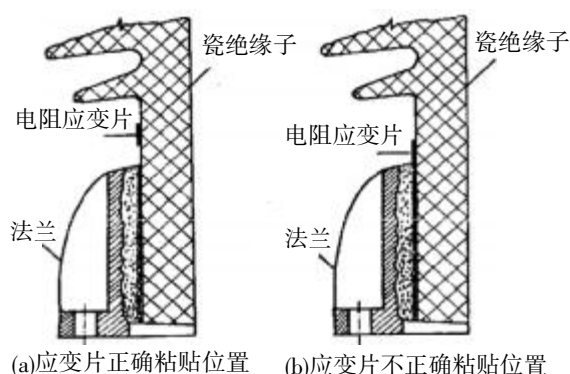


图 1 IEC/TS-61463—2000 中对变压器套管危险区域的定义

Fig. 1 The definition for critical part of the bushing in IEC/TS-61463—2000

及接线要求测量瓷根部的应变,见图 2。



(a)应变片正确粘贴位置 (b)应变片不正确粘贴位置

图 2 GB/T 13540—1992 电阻应变片布点要求

Fig. 2 The request of assigning strain gage in GB/T 13540—1992

文中认为这样的说法具有一定的片面性,危险区域为绝缘子底部的情况仅适用于瓷件杆径无变径的情况;如果在距离绝缘子底部较近处的瓷件杆径发生突变时,由于杆径突然变细,该处的截面惯性矩突然变小,且距离危险区域较近,其应力值可能比瓷根部的应力值更大;因此变径区域也应当列为套管的危险部分进行考核。对于存在变截面的产品,在进行静力计算和抗震计算时均应当增加对变径处的强度校核^[6]。

2 A 型 1 100 kV 变压器套管仿真计算

2.1 A 型 1 100 kV 变压器套管危险区域建模

为验证变径处也为危险区域,文中以某型特高压变压器套管为模型,采用有限元法对该模型进行抗震计算。该模型的杆径从瓷根部通过一个伞裙缩小了 20 mm(半径),此时截面惯性矩缩小了约 40%,因此该模型的危险区域为瓷根部及第 1 个伞裙(从法兰安装面向上)上杆径变径处,见图 3。

为了准确获取变径处的应力值,GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》6.3 节《抗震计算》所采用的等效梁单元的计算方法将不再适用^[7]。文中采用实体建模的方法建立有限元计算模型,特别对变径处伞裙真实建模,以获得较为准确地计算结果,

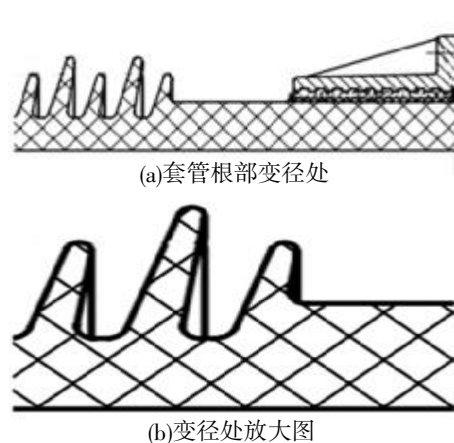


图 3 A 型套管瓷根部变径处示意图

Fig. 3 Root-section of bushing (Type A)

见图 4。



(a)A 型 1 100 kV 变压器套管仿真模型



(b)变径处伞裙模型

图 4 A 型 1 100 kV 变压器套管仿真模型

Fig. 4 Simulation model of 1 100 kV transformer bushing (Type A)

2.2 A 型 1 100 kV 变压器套管建模方式

顶部均压环采用集中质量点的方式代替实体模型。文中重点研究瓷根部和变径处危险区域,因此在该区域采用实体建模的方式建立带 3 个伞裙的瓷件模型。所建模型局部见图 4。采用六面体网格剖分实体模型,网格剖分图见图 5。

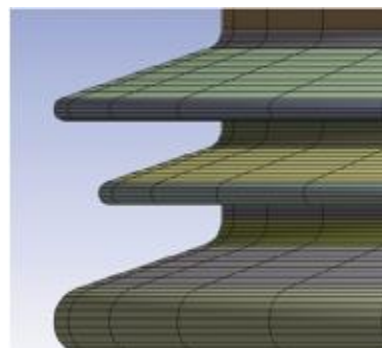


图 5 A 型 1 100 kV 变压器套管六面体网格剖分图

Fig. 5 Hexahedral mesh of 1 100 kV transformer bushing (Type A)

2.3 A型1100 kV 变压器套管计算参数

A型1100 kV 变压器套管材料参数设定见表1。

表1 主要材料参数表

Table 1 Material parameters

部件名称	材料	弹性模量/(N·m ⁻²)	泊松比	质量密度/(kg·m ⁻³)
瓷件	高强瓷	1.0×10 ¹¹	0.3	8 570(折算) ^注
法兰	铸铝	7.1×10 ¹⁰	0.3	2 770
支架	Q235	2.0×10 ¹¹	0.3	7 850

注:计算时,将伞裙质量及内部电气设备的质量均布在瓷件上,确保计算模型质量与实际产品质量相符。

抗震计算采用频域分析的方法,将RRS对应的频谱曲线作为输入,计算得出研究对象的最大应变、最大位移等参数的云图^[18]。计算所采用的RRS频谱曲线为《特高压瓷绝缘电气设备抗震设计及减震装置安装与维护技术规程》^[19-20],设计加速度值按照0.4g考虑,阻尼比为0.02,地震影响系数最大值为1.00,见图6,边界条件设为钢架底部固定。计算中不考虑螺栓连接的影响,也就是法兰与底架的连接、底架与地面的连接均为刚性连接。

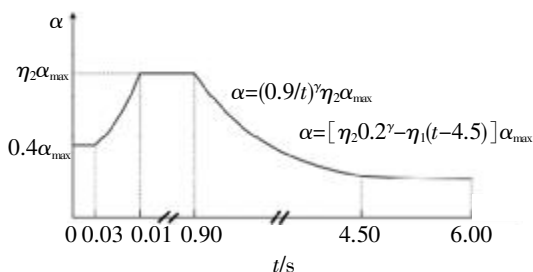


图6 特高压交流电气设备抗震设计标准谱

Fig. 6 Seismic standard spectrum of UHV AC electrical equipment

2.4 A型1100 kV 变压器套管计算结果

计算结果显示变径处瓷件应力远大于瓷件根部瓷件应力,见图7、表2。

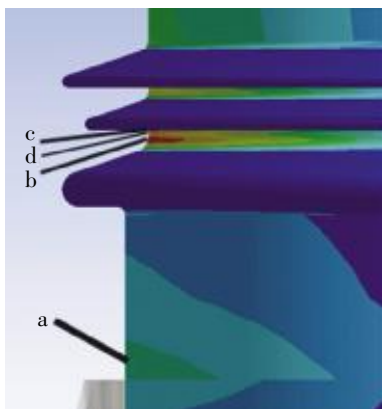


图7 A型1100 kV 变压器套管危险区域应力云图

Fig. 7 Stress nephogram of dangerous area in 1100 kV transformer bushing (Type A)

表2 A型1100 kV 变压器套管危险区域计算应力值

Table 2 Calculated stress of dangerous area in 1100 kV transformer bushing (Type A)

位置	应力值/MPa
瓷根部(a点)	15
大伞上圆弧处(从下往上第一个大伞)(b点)	52
小伞下圆弧处(从下往上第一个小伞)(c点)	48
大小伞间直线段部分(d点)	42

从计算结果可以看出圆弧处的计算应力值远大于瓷根部的应力值,两圆弧处直线段部分的应力值小于圆弧处的应力值,但是也远大于瓷根部的应力值,因此圆弧处及圆弧间区域均应当为危险区域。

3 B型1100 kV 变压器套管抗震试验

为提高A型1100 kV 变压器套管的抗震性能,重新设计了B型1100 kV 变压器套管,瓷件根部采用杆径渐变方式代替通过一个大伞突变杆径的设计方式,其示意图见图8。

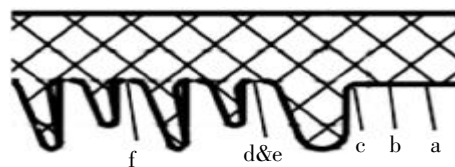
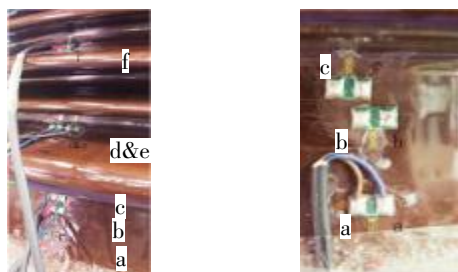


图8 B型变压器套管瓷根部示意图

Fig. 8 Root-section of 1100 kV transformer bushing (Type B)

该产品进行了真型抗震试验,见图9。图9中测试点a位于瓷件根部靠近法兰处,b点位于瓷根法兰与伞圆弧中间位置,c点位于瓷根接近大伞下沿圆弧处(应变片约1/3位于圆弧位置),由于这3个点位置比较接近,因此这3个点测量的数据应该较为接近。d点和e点均为第1个大伞上两圆弧间的直线部分,此处距离瓷件根部具有一定的距离,但是由于截面惯性矩降低(降低不明显),测量的应力值应该和瓷根测量数据相差不大,f点位于第2个大伞上沿两圆弧间的直线部分。



(a)试验时应变片测量位置 (b)a、b、c三测量点应变片图

图9 B型变压器套管应变片位置

Fig. 9 Strain gage location of 1100 kV transformer bushing (Type B)

按照传统的经验分析,a点至f点的应力值应逐渐下降;a点应力值最大,但是实际试验数据显示这样的观点不正确。试验中试验台台面加速度峰值为0.19g,测量点a-f的测量值见表3。

表3 测量点a-f的测量应力值(试验台台面0.19g)

Table 3 Stress of measuring point a-f(the acceleration of the table is 0.19g)

测量点	a点	b点	c点	d点	e点	f点
测量值/MPa	3.97	3.74	6.03	6.79	6.94	6.86

注:瓷件弹性模量按照100 GPa计算。

a点和b点位置较为接近,且均处于直线段部分,因此这两个数值较为接近,可以作为数据分析的基础参考值。a点值比b点值大,分析原因是由于法兰对瓷件的影响导致。c点和b点的距离与b点和a点的距离接近,但是c点值急剧增大,分析原因是应变片一部分贴于圆弧处,导致测量值增大。d、e、f 3点均位于伞裙圆弧间的直线部分,由于圆弧的影响,导致测量值比a点大。

考虑到应变片的使用范围限制(应变片在圆弧部分测量误差较大)和可能存在的测量结果误差,圆弧处的测量值仅作为试验时的参考值。但是结合仿真计算的结果,文中认为瓷件伞裙间圆弧处的应力值远大于瓷件根部直线部分的应力值的现象是存在的。因此,抗震计算和抗震试验均应将瓷件根部和靠近瓷件根部的伞裙作为危险区域进行考核。

4 结论

1)仿真计算模型处理以及边界条件设置与实际产品有一定的出入,因此计算结果存在一定的误差;同时,应变片在圆弧处的使用会导致测量误差增大;但是,不论是仿真计算结果还是试验测试值均显示,瓷根附近伞裙圆弧间(包括圆弧部分及直线部分)的应力比瓷根部直线部分的应力大的多。因此,套管抗震试验的危险区域不应仅关注瓷根部分,还应当关注靠近瓷件根部的伞裙区域。所以,抗震计算如果还按照传统梁单元计算方法仅校核瓷根部的应力值是不够的。还应当分析靠近瓷根的伞裙间应力值,尤其是此处伞裙发生杆径变小的情况。

2)虽然文中仅分析了变压器套管,但是上述现象不应仅存在于套管,对于其他的瓷绝缘子也应当存在相同的问题,因此对于瓷绝缘子来说,不管是进行静力试验还是抗震试验,以及数值计算,均应当关注瓷根及靠近瓷根的伞裙间应力值。

3)现阶段产品的破坏应力值是通过静力试验,采用经验公式的方法推断出瓷根部的应力值。使用

这样的计算方法,对于杆径有变化的产品获得的破坏应力值并不准确,且获得的破坏应力值仅适用于瓷根部,不适用于瓷件伞裙间的破坏应力值。因此,文中认为在抗震计算及试验中采用瓷根部的破坏应力值来判断整体瓷件是否满足抗震要求并不准确。

研究工作显示瓷件伞裙间圆弧处的应力值比瓷根部的应力值大,但是抗震试验中大部分的瓷件破坏位置处于瓷件根部,如何解释该现象还有待继续的深入研究。

对于抗震计算及抗震试验如何判断产品是否满足抗震要求,建议对瓷件根部和瓷件伞裙间采用不同的瓷件破坏应力值进行判断,瓷件伞裙间的瓷件破坏应力值应当通过试验方式确定。

参考文献:

- [1] 刘朝丰,金松安,李 龙,等.具有预应力的某型直流滤波电容器载荷分析[J]. 高压电器,2015,51(4):151-156.
LIU Chaofeng,JIN Songan,LI Long,et al. Study the load behavior of a type of DC filter capacitor with prestressing force[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(4): 151-156.
- [2] 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.
YU Yongqing,LI Guangfan,LI Peng,et al. Investigation and analysis of electric equipment damage in Sichuan power grid caused by wenchuan earthquake[J]. Power System Technology, 2008,32(11):1.
- [3] 刘建秋,王亚超,韩文庆.变电站震害分析与抗震措施的研究综述[J]. 电力建设,2011,32(7):44-50.
LIU Jianqiu,WANG Yachao,HAN Wenqing. Review on seismic disaster analysis and aseismatic measures of transformer substation [J]. Electric Power Construction, 2011,32(7):44-50
- [4] 张文亮,吴维宁,胡 毅.特高压输电技术的研究与我国电网的发展[J]. 高电压技术,2003,29(9):16-18.
ZHANG Wenliang,WU Weining,HU Yi. Research on UHV transmission technology and development of power network in China[J]. High Voltage Engineering, 2003,29(9):16-18.
- [5] 中国电力科学研究院. 电网地震灾害规律研究及分布图绘制[R]. 北京:中国电力科学研究院,2014:5.
China Electric Power Research Institute. Grid research and distribution of earthquake disasters in drawing [R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2014:5.
- [6] 钟 珉,房正刚. 电气设备抗震设防水准研究[J]. 电工电气,2013,33(10):54-58.
ZHONG Min,FANG Zhenggang. Study on seismic fortification level of electrical equipment[J]. Electrotechnics Electric,2013,33(10):54-58.

- [7] 刘振林,代泽兵,卢智成. 基于 Weibull 分布的电瓷型电气设备地震易损性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1076-1081.
LIU Zhenlin, DAI Zebing, LU Zhicheng. Seismic damage probability analysis of porcelain power equipment based on Weibull distribution[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 1076-1081.
- [8] 程永锋,朱全军,卢智成. 变电站电力设施抗震措施研究现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 84-89.
CHENG Yongfeng, ZHU Qianjun, LU Zhicheng. Progress and development trend on seismic measures of electric power equipments in transformer substation[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 84-89.
- [9] 邱宁,程永锋. 1 000 kV 特高压交流电气设备抗震研究进展与展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1732-1739.
QIU Ning, CHENG Yongfeng. Progress and Prospect in seismic research of 1 000 kV UHV AC electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1732-1739.
- [10] KNIGHT B T, KEMPNER L J. Seismic vulnerabilities and retrofit of high-voltage electrical substation facilities[C]// California. United States: [s.n], 2009: 1-12.
- [11] 秦征. 支持式母线用支柱绝缘子抗弯强度校验[J]. 广西电力工程, 2001(2): 36-37.
QIN Zheng. Verifying the bending resistance of support insulator for support type tubular busbar[J]. Guangxi Electric Power Engineering, 2001(2): 36-37.
- [12] 阎东,罗菁,卢明,等. 支柱绝缘子强度计算方法的探讨[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 123-124.
YAN Dong, LUO Jing, LU Ming, et al. Discussion on calculation of strength of post insulator[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 123-124.
- [13] 陈平. 高压电瓷材料的发展趋势[J]. 中国陶瓷工业, 2005, 12(3): 34-37.
CHEN Ping. Development trend of high tension electric porcelain[J]. China Ceramic Industry, 2005, 12(3): 34-37.
- [14] LIEBERMANN J. Reliability of materials for high-voltage insulators[R]. American Ceramic Society Bulletin, 2000: 55-58.
- [15] IEC/TS 61463 —2000 ed2: Bushings-seismic qualification[S]. 2000.
- [16] 陈爱军,吴美茹,南丽萍. 基于 ANSYS 的平面不规则结构地震响应分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2008, 6(2): 25-27.
CHEN Aijun, WU Meiru, NAN Liping. Analysis on seismic responses of irregular plane structure based on ANSYS[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2008, 6(2): 25-27.
- [17] 孙涛,肖汉宁. 棒形支柱瓷绝缘子弯曲应力的有限元仿真分析[J]. 电瓷避雷器, 2007(2): 19-21.
SUN Tao, XIAO Hanning. Simulation analysis of bending stress of solid core post insulator by finite element method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2007(2): 19-21.
- [18] 金松安,刘朝丰. 高海拔隔离开关抗震分析研究[J]. 高压电器, 2013, 49(10): 37-45.
JIN Songan, LIU Chaofeng. Study the seismic behavior of disconnector in High altitude area[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10): 37-45.
- [19] Q/GWD 11132—2013 特高压瓷绝缘电气设备抗震设计及减震装置安装与维护技术规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
Q/GDW 11132—2013 Technical specification for seismic design of ultra-high voltage porcelain insulating equipments and installation/maintenance to energy dissipation devices[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [20] 周锡元,齐微,徐平,等. 震级、震中距和场地条件对反应谱特性影响的统计分析[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(2): 97-103.
ZHOU Xiyuan, QI Wei, XU Ping, et al. Statistical analysis on the influence of magnitude, distance and site condition on response spectra[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(2): 97-103.

金松安(1980—),男,硕士研究生,高级工程师,从事高压电气设备结构、抗震方面的研究。

版权声明:

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我编辑部上述声明。

《高压电器》编辑部