

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.06.021

海上升压站中性点保护装置地震响应与隔震分析

廖望^{1,2}, 姜娟¹, 陈立¹

(1. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335; 2. 大连理工大学水利工程博士后流动站, 辽宁 大连 116024)

摘要: 风电场海上升压站等海洋平台结构上部组块中设有地震易损性高的支柱类电气设备。为探究此类设备的抗震性能,以国内某海上升压站220 kV主变压器中性点保护装置为对象建立有限元模型,采用时程分析法对其进行地震响应分析。结果显示,上部设备瓷套管根部应力虽符合规范要求,但由于设备安装架钢板刚度较低,导致在地震中隔离开关与安装架钢板的连接处局部应力过大,存在破坏的风险,进而间接造成设备损坏。采用隔震支座对原设备进行底部隔震控制后,可明显减小设备关键位置的应力与加速度响应以及设备安装架的峰值应力,可满足抗震设计要求。

关键词: 海上升压站; 变压器中性点保护装置; 有限元分析; 地震响应; 隔震控制

Seismic Responses and Isolation Analysis of the Neutral Point Protection Device in Offshore Substations

LIAO Wang^{1,2}, JIANG Juan¹, CHEN Li¹

(1. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China; 2. Hydraulic Engineering Postdoctoral Research Station, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

Abstract: Pillar-type electrical equipment with high seismic vulnerability is installed in the upper modules of offshore platform structures such as offshore stations in wind farms. To investigate the seismic performance of such equipment, a finite element model is set up for the neutral point protection device of the 220 kV main transformer in a real offshore substation in China. The seismic responses analysis of the equipment is performed by the time-history analysis method. The results show that although the stress at the root of the porcelain bushing complies with the specification requirement, yet the low rigidity of the steel plate of the equipment mounting frame leads to excessive local stress at the connection between the disconnecter and the steel plate in seismic condition, exists the damage risk and causes indirectly the damage of equipment. After applying base isolation control using isolation bearings to the original equipment, the stress and acceleration responses at critical locations of the equipment, as well as the peak stress of the equipment mounting frame, can be significantly reduced, thereby meeting the seismic design requirements.

Key words: offshore substation; transformer neutral point protection device; FEM analysis; seismic response; seismic isolation

0 引言

在中国提出“3060”双碳目标的背景下,能源结构的转型势在必行。其中,海上风电作为一种新型清洁能源,是中国重点发展的新能源之一。海上升压站、高抗站、换流站等结构物具有将深远海的风电输送至陆上的重要作用,是以清洁能源为核心的

生命线工程中极其重要的一环。目前,此类结构物的主流施工方法为在陆上完成上部组块与设备安装后整体吊装至海上导管架基础之上^[1]。若在海上施工完成投入运营后电气设备发生损坏,其维修难度与成本相比陆上电力设施将显著提升。且此类结构物并非长期有人值守,设备损坏后难以及时处理。可见,确保海上风电结构物中的电气设备在各

收稿日期:2025-12-12; 修回日期:2026-02-29

基金项目:上海市浦江人才计划资助(22PJD097);上海勘测设计研究院有限公司科研项目(2022QT(831)-007, 2022QT(83)-048)。

Project Supported by Shanghai Pujiang Program(22PJD097), Research Project of SIDRI(2022QT(831)-007, 2022QT(83)-048).

种不利条件下不受破坏并正常工作是海上风电场稳定运行的必要条件。尤其是受我国沿海场地地质条件影响,多数海上风电场址位于地震高烈度区,电气设备受地震作用后的结构安全性需要得到保证。

海上风电场结构物中存在多种支柱类电气设备,如海上升压站中的中性点保护装置、避雷器,换流站中的换流阀塔等。这些设备的绝缘组件多采用陶瓷或复合材料等脆性材料,在结构上又具有显著的“细、高、柔”的特征,且所处位置距离海床面较高,在地震作用下更易产生不利影响^[2]。针对支柱类电气设备的抗震性能,贺海磊等^[3]指出此类设备在地震下的易损性高,在实际工程中需要提升其抗震性能;张咪等^[4]分析了支柱类避雷器的地震响应,指出瓷套管的弯曲刚度是套管顶部位移与根部应力的关键因素。针对带支架的支柱类电气设备,李吉超^[5]等进行了振动台试验研究,指出其动力放大系数高于规范要求。针对全户内变电站楼面电气设备,谢强等^[6]明确电气设备放置在更高楼层时的峰值加速度放大系数将显著提升。当前海上风电场结构物设计过程中,通常视电气设备为非结构物,根据上述研究成果可以预见,此类电气设备存在抗震性能不足的可能。

随着民用建筑领域减隔震技术的趋于成熟,国内外学者们针对电气设备的减隔震技术进行了研究。文波等^[7]尝试将铅芯橡胶支座等隔震技术应用与高压电力设施中,验证了隔震技术对电气设备抗震性能的改善效果;卢智成等^[8]提出了在经济条件允许的情况下,可采用橡胶支座的水平隔震技术与竖向减震的弹簧阻尼隔震技术结合使用的方法,增大电力设施抗震安全储备,并对其使用前景进行了探讨;Alessandri等^[9-10]在某断路器设备底部安装钢丝绳阻尼器成功进行了有效的结构震动控制;谢强等^[11-13]通过有限元数值模拟与振动台试验研究,在各类特高压电气设备支座处使用隔震器与耗能减震装置进行了结构震动控制,效果良好;基于海内外各种研究成果,陈全杰等^[14]对变电站电气设备的减隔震技术研究进展进行了总结与综述,明确了在地震高烈度区对电气设备采取减隔震措施的必要性与有效性。

然而,上述电气设备的分析研究的主要对象均为陆上电力设施及特高压设备,对风电场海上升压站中的户内电气设备相关抗震减震还未有涉及。文中选取位于我国江苏省海域高烈度区的某已建成大型风电场海上升压站中典型的带支架支

柱类电气设备 220 kV 主变压器中性点成套保护装置(TNP),通过有限元仿真模拟的方法进行抗震分析,掌握在海上升压站中此类支柱类设备的结构动力响应特征与可能的破坏形式,并尝试基于现有结构进行震动控制,对比分析隔震效果。

1 220 kV 变压器中性点保护装置有限元建模及地震响应分析

1.1 设备结构参数及有限元建模

文中研究对象中性点保护装置示意图见图1。在升压站中该设备共设2套,分别与两个220 kV主变压器的中性点相连,起到在发生过电压的情况下保护电力系统的重要作用。该装置主要由上部中性点成套接地保护装置与下部钢结构支柱两部分构成,装置总高6.6 m,总重约1 t。中性点采用避雷器与保护间隙并联,从左至右包含GW13-126/630隔离开关、YH1.5W-144/320避雷器、支柱绝缘子、电流互感器等支柱类电气设备。电气设备通过两根8号槽钢与厚10 mm的钢板组成的设备安装架互相连成成套出厂,上部设备总重480 kg。下部支柱采用两根高4.5 m的 $\phi 273$ 圆钢管。各支柱底部连接正方形基础钢板,基础钢板焊接在海上升压站平台的钢制楼面铺板上。该电气设备位于海上升压站一层平台主变压器侧边,距海床面的相对高程约为28 m,见图2。

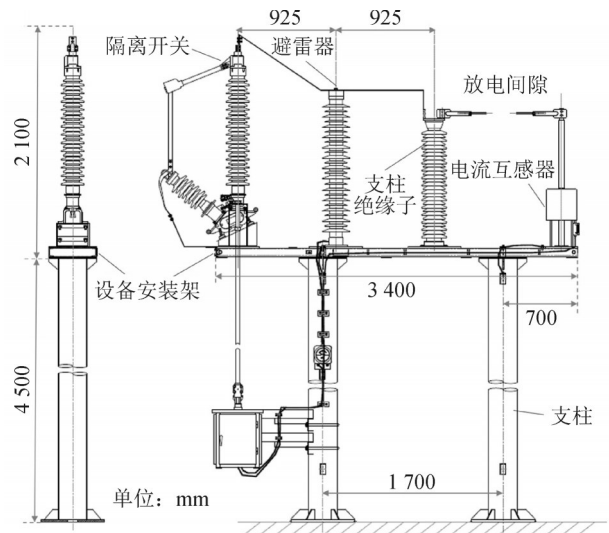


图1 220 kV主变压器中性点保护装置

Fig. 1 220 kV transformer neutral point

文中采用有限元软件Abaqus对该设备进行仿真建模,模型见图3。定义本装置短边水平方向为X方向,长边水平方向为Y方向,竖直方向为Z方向。本装置下部钢结构部分均采用S4R壳单元建立;上部电气设备中群伞、线圈等不具备结构功能且其形状对结构基本无影响^[15],故忽略其复杂的形状,采用

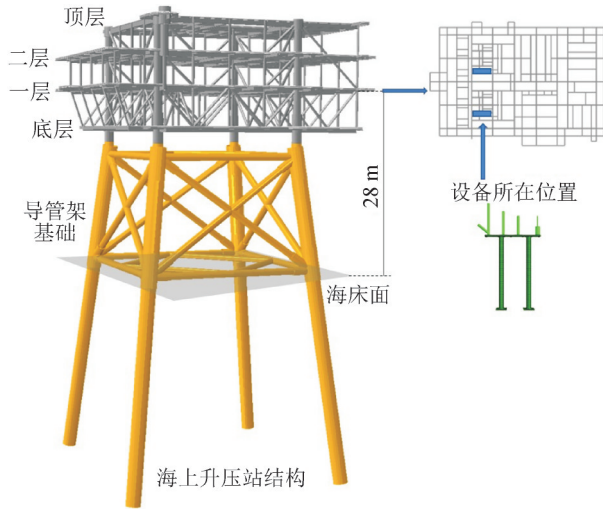


图2 中性点保护装置在海上升压站中所处位置

Fig. 2 Location of TNP in the offshore substation

B31 梁单元建立,通过等效质量密度进行模拟。建模时各部分主要材料参数见表1。

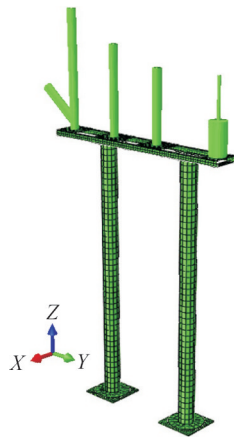


图3 中性点保护装置有限元模型

Fig. 3 Finite element model of TNP

表1 中性点保护装置主要材料参数

Table 1 Material parameters of TNP

部件名称	主要材料	材料特性
钢结构支柱及设备安装架	Q235 钢	弹性模量 206 GPa
		泊松比 0.3
隔离开关	陶瓷	密度 7 850 kg/m ³
		弹性模量 100 GPa
避雷器	复合材料	泊松比 0.25
		等效密度 2 000 kg/m ³
支柱绝缘子	陶瓷	弹性模量 16 GPa
		泊松比 0.3
电流互感器(外壳部分)	不锈钢	等效密度 1 300 kg/m ³
		弹性模量 100 GPa
		泊松比 0.25
		等效密度 2 690 kg/m ³
		弹性模量 200 GPa
		泊松比 0.3
		等效密度 1 385 kg/m ³

文中通过所建立的精细化有限元模型进行地震分析。模型的阻尼采用 Rayleigh 阻尼。参考 GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》^[16] 及 IEEE 693:2018^[17] 等规范标准及相关文献^[18], 阻尼比取 2% 进行分析。

1.2 模态分析

利用 Abaqus 软件对于该中性点保护装置进行模态分析, 得到其各阶振型与自振频率。设备前 4 阶振型及频率见表 2, 设备基频约为 2.80 Hz。由于设备为非对称结构, 质量分布不均匀, 1、2 阶振型为隔离开关及支柱平动且设备安装架局部弯曲(见图 4), 3、4 阶振型为结构整体平动且设备安装架局部扭转, 9 阶振型为结构整体扭转。通过振型模态可以预测到水平向地震作用将对该设备的动力响应产生较大影响, 且隔离开关处的结构动力响应相对较大。

表 2 中性点保护装置主要振型

Table 2 The main frequencies and modes of TNP

阶数	频率/Hz	主要振型
1	2.797 6	隔离开关及支柱 X 向平动
2	2.978 7	隔离开关及支柱 Y 向平动
3	4.948 4	结构整体 X 向平动
4	5.644 1	结构整体 Y 向平动

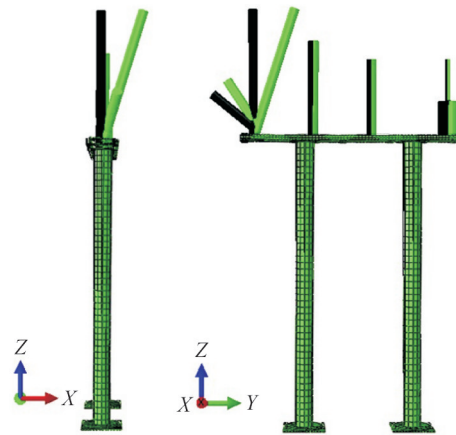


图4 中性点保护装置前 2 阶振型图

Fig. 4 The first two modes of TNP

1.3 地震动输入

本海上升压站工程场地为 III 类场地, 设防烈度 8 度, 场地地震安全性评价报告所得设计基本地震加速度为 0.282g。根据规范^[16], 选取与工程场地目标谱相匹配的 Imperial Valley 波(EQ₁)、Superstition Hills 波(EQ₂)及人工波(EQ₃)作为输入见图 5。由前期设计时所得海上升压站结构抗震分析结果可知, 电气设备的 Y 轴方向为海上升压站结构的水平主震方向。

在针对电气设备进行地震分析时, 为明确该设备在海上升压站结构中的地震响应, 视对象设备为海上升压站的附属结构, 通过对海上升压站整体结

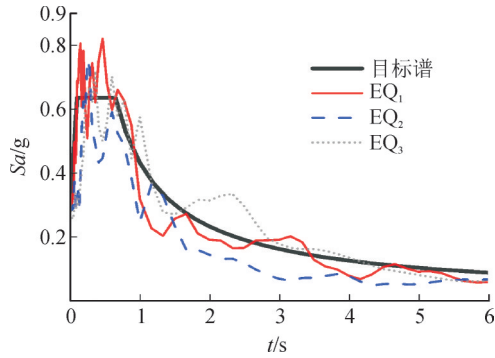


图5 地震动加速度反应谱

Fig. 5 The acceleration response spectra of the earthquake waves

构建立有限元模型并输入上述3套地震波进行时程分析后,取该电气设备所在位置处3个方向的峰值加速度放大系数后对地震波进行放大处理,作为电气设备支座底部的地震动输入,以模拟设防地震作用下电气设备作为海上升压站附属结构时可能受到的地震响应。工况表详见表3,从表3中可知,海

上升压站结构易受竖向地震作用影响,在电气设备地震分析时竖向地震动输入相对较大。

表3 地震分析工况表

Table 3 Case list of seismic analyses

工况	地震波	输入峰值加速度/(m·s ⁻²)		
		X	Y	Z
工况1	EQ ₁	2.15	3.03	8.62
工况2	EQ ₂	2.31	2.51	6.88
工况3	EQ ₃	1.89	3.42	7.35

1.4 地震响应分析

由于支架上部各类含绝缘子的设备为整套中性点装置实现其功能的重要组成,文中着重分析隔离开关等瓷质电气设备顶部的加速度、位移响应、绝缘子等脆性构件根部及设备安装架的应力响应。汇总了上述的各项动力响应峰值见表4,设备顶部加速度、位移响应及根部应力峰值均出现在单体质量最重的隔离开关处。

表4 地震作用下设备顶部动力响应峰值

Table 4 Peak dynamic response of TNP

工况	地震波	顶部加速度峰值/(m·s ⁻²)			顶部相对位移峰值/mm			应力峰值/MPa	
		X向	Y向	Z向	X向	Y向	Z向	瓷套管	设备安装架钢板
工况1	EQ ₁	9.94	31.80	19.39	31.19	87.36	3.35	4.81	437.89
工况2	EQ ₂	12.01	16.67	9.57	34.81	49.55	2.11	3.02	301.31
工况3	EQ ₃	12.63	18.64	9.92	41.16	59.28	2.51	3.28	287.39

1.4.1 设备顶部加速度响应分析

由于海上升压站220 kV主变压器整体尺寸相对较大,中性点保护装置须配合变压器的尺寸进行设置,致使其支架较高,上部支柱类设备顶部最高位置离地达6.6 m,易造成设备动力响应的放大从而提高破坏的风险。文中对比设备顶部峰值加速度与输入峰值加速度,计算得出峰值加速度放大系数汇总于表5。

表5 设备顶部峰值加速度放大系数

Table 5 Acceleration amplification factor of the top of TNP

工况	峰值加速度放大系数		
	X向	Y向	Z向
工况1	3.28	14.76	2.25
工况2	4.78	7.20	1.39
工况3	3.70	9.87	1.35

从表5可知,相较于竖向,两水平向的峰值加速度放大系数普遍较大。根据表3、4的加速度输入与响应峰值,虽然输入的竖向加速度峰值达到水平向的2倍以上,但设备顶部竖向加速度响应峰值

仅有水平向的60%,Z向的峰值加速度放大系数不到Y向的20%。可见竖向地震作用对于该电气设备顶部的加速度响应影响相对较小。

1.4.2 设备顶部相对位移响应分析

中性点保护装置顶部设有导线与其他电气设备连接,其与主变压器之间的距离有一定要求,且设备支柱绝缘子与电流互感器间设置的放电间隙也存在有效范围,过大的顶部位移可能会影响设备的正常工作,甚至发生破坏。文中定义设备顶部绝对位移与同时刻设备底座处绝对位移差值为顶部相对位移。由表4可知,由于设备的水平主震方向为Y向,故Y向顶部位移响应大于X向。图6为工况1下的Y向相对位移响应时程,其峰值达87.36 mm,达到整个设备高度的1.32%,需要引起关注。对比各工况下Z向相对位移峰值可知,不论竖向地震动输入的大小,其竖向位移响应均远小于水平向,各工况下相对位移峰值不超过4 mm。由此可见,地震作用对于该电气设备的竖向位移响应影响甚小,基本可以忽略。

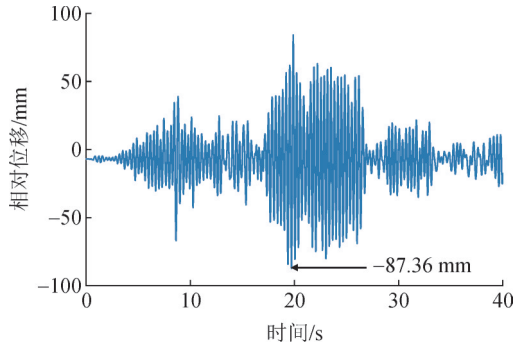


图6 隔离开关顶部Y向相对位移曲线(工况1)
Fig. 6 Time-history of relative displacement of disconnector in Y-direction(case 1)

1.4.3 设备应力响应分析

由于支架上部各类含绝缘子的设备内部元件精细,且瓷质绝缘子套管易损性高,在震害调研^[2]及支柱类电气设备地震响应研究结果^[9]显示,此类设备破坏形式多为套管根部连接处折断。因此,文中聚焦于上部瓷质设备根部以及安装设备的设备安装架基础钢板处的应力进行分析。根据厂家资料,瓷质材料的容许应力为15 MPa,设备安装架材料为Q235钢,钢板厚度为10 mm,其屈服强度为235 MPa。考虑到升压站电气设备结构重要性高,安全系数取与瓷套管相同的1.67^[6],设计容许应力取140 MPa。

工况2下隔离开关与设备安装架的应力分布云图见图7,表6汇总了各工况下瓷套管根部及基础钢板的应力峰值与安全系数。文中定义安全系数为容许应力与实际应力之比。结果显示,隔离开关处瓷套管的Mises应力峰值为工况1时的4.81 MPa,其安全系数为3.12,大于规范^[6]中所规定的1.67,故瓷套管在设防地震作用下不会出现根部断裂的现象。而根据表6所示,与隔离开关相连的设备安装架钢板连接处瞬时发生的Mises应力均远大于钢板容许应力,在工况1中其Mises应力峰值甚至可能大于钢材的极限抗拉强度。可见,虽然瓷套管本身不会发生断裂,但设备安装架的刚度过低,隔离开关与安装架的连接处极有可能发生破坏,从而间接造成整套设备的损坏。由此可见,海上升压站中性点保护装置存在破坏风险,需要增大设备安装架的刚度,或采取必要的加固手段以减小结构应力响应。

2 220 kV 变压器中性点保护装置的隔震分析

2.1 隔震支座的布置与计算模型

与陆上变电站结构不同之处在于海上升压站上部平台采用钢结构框架,对象电气设备底座与升压站平台钢板做刚性连接。考虑上述结构特征以

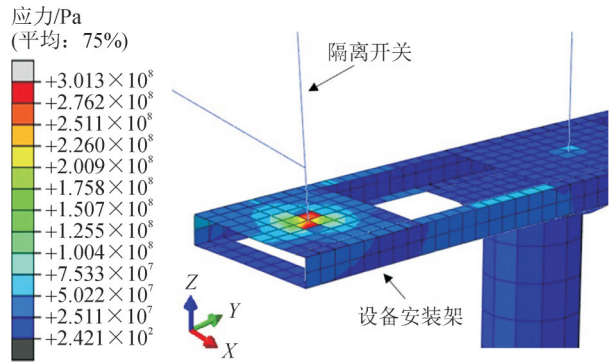


图7 隔离开关根部与设备安装架应力分布(工况2)
Fig. 7 Stress distribution of disconnector and bracket plate(case 2)

表6 应力响应峰值与安全系数

Table 6 Peak stress responses and safety factors of TNP

工况	瓷套管		安装架	
	应力/MPa	安全系数	应力/MPa	安全系数
工况1	4.81	3.12	437.89	0.32
工况2	3.02	4.97	301.31	0.46
工况3	3.28	4.57	287.39	0.49

及对于既有结构中的电气设备进行抗震加固的可行性,参考文[19]中所述高压电气设备减震设计方法,文中尝试采用在中性点保护装置支柱底座加装隔震支座的方式进行震动控制,以达到减小设备地震响应的目的,见图8。

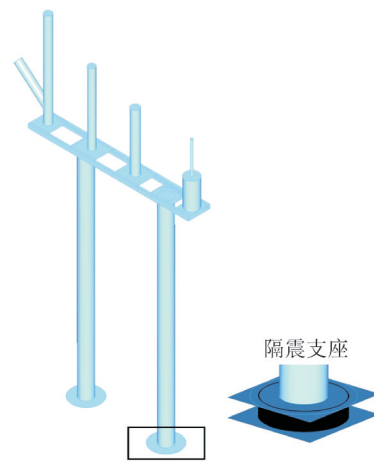


图8 隔震支座布置

Fig. 8 Arrangement of isolation bearings

隔震支座利用Abaqus软件中的CONN3D2连接器单元进行简化模拟,根据本设备支柱的尺寸,选取具有如表7所示的力学参数的叠层铅芯橡胶隔震支座进行隔震分析。通过该力学参数,参考行业规范^[20]中建议的力学计算模型,设置连接器的弹性、塑性与阻尼的输入数值,实现隔震支座水平向双线性恢复力滞回曲线。通过该计算模型,对前文所分析的3个工况进行布置隔震支座后的抗震分析。

表7 隔震支座力学参数

Table 7 Mechanical parameters of the isolation bearing

水平等效刚度/ (kN·mm ⁻¹)	等效阻 尼比/%	屈服前 刚度/(kN·mm ⁻¹)	屈服后刚 度/(kN·mm ⁻¹)	屈服 力/kN
1.12	22	9.55	0.73	40

2.2 隔震前后地震响应对比

2.2.1 设备顶部加速度与相对位移响应对比

表8列举并对比了安装隔震支座前后设备顶部的加速度放大系数。由表8对比可知,安装隔震支座后的震动控制效果卓越,隔震后X向峰值加速度平均下降至隔震前的28.11%,Y向下降至23.02%。Y向的隔震效果整体上略优于X向,说明隔震支座在该设备水平主震方向的隔震效果相对更明显。

表8 设备顶部水平向加速度放大系数对比

Table 8 Horizontal acceleration amplification factor of the top of TNP

工况	峰值加速度放大系数			
	X向		Y向	
	隔震前	隔震后	隔震前	隔震后
工况1	3.28	1.13	14.76	3.63
工况2	4.78	1.08	7.20	1.51
工况3	3.70	1.01	9.87	2.32

以隔震前Y向相对位移响应最大的工况1为例进行对比分析,隔震前后设备顶部的相对位移时程曲线见图9。隔震后,设备顶部相对隔震支座上部设备底座的位移峰值由隔震前的87.36 mm降至30.07 mm,Y向水平位移与设备高度之比从1.32%下降至0.46%。但设备顶部相对于海上升压站楼面铺板的位移响应峰值有所增大,达到119.39 mm。这是由于在某一时刻的地震输入过大,隔震支座的上下钢板间产生了较大的相对位移所致。

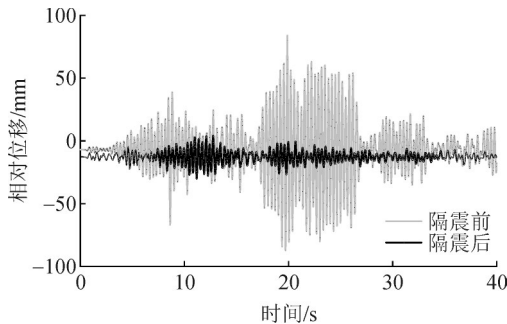


图9 隔离开关顶部Y向相对位移时程对比(工况1)

Fig. 9 Comparison of time-history of relative displacement of disconnector in Y-direction(case 1)

2.2.2 设备安装架钢板应力响应对比

1.4节分析结果显示,设备安装架钢板连接处的局部应力过大极有可能间接造成电气设备的损坏,因此本节主要针对隔震前后该位置的应力峰值

进行比较。工况2中设备安装架局部应力时程对比见图10,3种工况下隔震前后的峰值应力响应与隔震率见表9。此处的隔震率定义为隔震前后峰值应力的差值与隔震前峰值应力的比值。

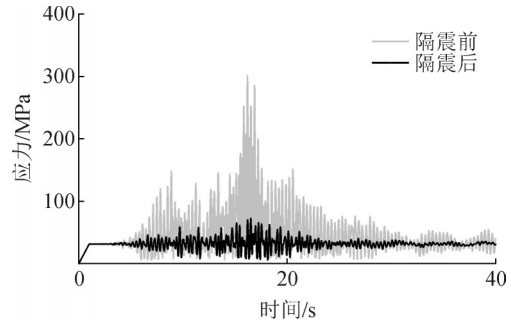


图10 安装架钢板局部应力时程对比(工况2)

Fig. 10 Comparison of time-history of local stress of bracket plate(case 2)

表9 隔震前后安装架钢板峰值应力

Table 9 Peak stress response of bracket plate

工况	隔震前/MPa	隔震后/MPa	隔震率%
工况1	437.89	100.19	77.12
工况2	301.31	72.13	76.06
工况3	287.39	69.20	75.92

由上述比较可知,隔震后设备安装架钢板局部应力峰值下降至100.19 MPa,小于钢材的容许应力,安全率达到1.40。3个工况的隔震率均超过75%,可见,采用隔震支座对于设备水平向地震作用进行隔震控制的效果很好,结构应力指标满足抗震设计要求。

3 结论

文中针对海上升压站中的220 kV主变压器中性点保护装置进行了设防地震作用下的数值仿真模拟,掌握了海上升压站中该设备的地震响应特征,并使用隔震支座尝试对原结构进行隔震控制,分析对比了隔震前后的地震响应,评价了隔震效果,得到如下结论:

1)对象电气设备为高耸悬臂结构,结构动力响应峰值集中出现在左侧质量相对较大的隔离开关设备处,设备顶部的水平向加速度与位移响应远大于竖向。

2)电气设备瓷套管根部的应力符合抗震规范要求,但由于设备安装架的刚度较小,设备与安装架连接处钢板的局部应力峰值远大于材料的容许应力,在地震中发生局部破坏的风险极高,从而间接造成电气设备的损坏。

3)通过在原设备结构支柱下方处安装隔震支

座,可有效减小设备顶部的水平向加速度与相对支柱底部的位移响应,同时减小瓷套管根部与设备安装架的局部应力,隔震后该设备满足抗震设计要求。

参考文献:

- [1] 朱继忠,高美云,肖鹏飞,等.大规模海上风电并网与运行技术综述[J]. 电力工程技术,2025,44(5):2-24.
ZHU Jizhong, GAO Meiyun, XIAO Pengfei, et al. Review of grid integration and operation technologies for large - scale offshore wind power[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44 (5):2-24.
- [2] 程永锋,朱祝兵,卢智成,等.变电站电气设备抗震研究现状及进展[J]. 建筑结构,2019,49(s2):356-361.
CHENG Yongfeng, ZHU Zhubing, LU Zhicheng, et al. Research state and development of seismic performance of substation electrical equipment[J]. Building Structure, 2019, 49(s2):356-361.
- [3] 贺海磊,郭剑波,谢强.电气设备的地震灾害易损性分析[J]. 电网技术,2011,35(4):25-28.
HE Hailei, GUO Jianbo, XIE Qiang. Vulnerability analysis of power equipments caused by earthquake disaster[J]. Power System Technology, 2011, 35(4):25-28.
- [4] 张咪,刘菲,王炳媛,等.750 kV避雷器地震响应及优化设计方法[J]. 高压电器,2022,58(8):33-40.
ZHANG Mi, LIU Fei, WANG Bingyuan, et al. Seismic response and optimization design method of 750 kV surge arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8):33-40.
- [5] 李吉超,李海洋,尚庆学,等.110 kV电流互感器振动台试验研究[J]. 高压电器,2022,58(8):135-141.
LI Jichao, LI Haiyang, SHANG Qingxue, et al. Study on shaking table test of 110 kV current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8):135-141.
- [6] 谢强,边晓旭,徐俊鑫.全户内变电站楼面电气设备抗震设计方法[J]. 高压电技术,2020,46(6):2155-2163.
XIE Qiang, BIAN Xiaoxu, XU Junxin. Anti-seismic design method for floor electrical equipment in whole - indoor substation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6):2155-2163.
- [7] 文波,牛荻涛,张俊发,等.隔震技术在高压电力设施中的应用[J]. 工业建筑,2009,39(1):36-41.
WEN Bo, NIU Ditao, ZHANG Junfa, et al. Application of isolation technology in high - voltage electrical equipment[J]. Industrial Construction, 2009, 39(1):36-41.
- [8] 卢智成,朱全军,程永峰.隔振(震)技术在电力设施中的应用及前景[J]. 电力建设,2009,30(6):87-89.
LU Zhicheng, ZHU Quanjun, CHENG Yongfeng. Vibration isolation technique application and prospect in power apparatus[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(6):87-89.
- [9] ALESSANDRI S, GIANNINI R, PAOLACCI F, et al. Seismic retrofitting of an HV circuit breaker using base isolation with wire ropes. Part 1: Preliminary tests and analyses[J]. Engineering Structures, 2015(98):251-262.
- [10] ALESSANDRI S, GIANNINI R, PAOLACCI F, et al. Seismic retrofitting of an HV circuit breaker using base isolation with wire ropes. Part 2: Shaking - table test validation[J]. Engineering Structures, 2015(98):263-274.
- [11] 谢强,王晓游,胡蓉,等.带有减震装置的±800 kV特高压直流穿墙套管振动台试验研究[J]. 高压电技术,2018,44(10):3368-3374.
XIE Qiang, WANG Xiaoyou, HU Rong, et al. Shaking table tests on ±800 kV UHV DC wall bushing with damper devices[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10):3368-3374.
- [12] HE Chang, XIE Qiang, YANG Zhenyu, et al. Seismic performance evaluation and improvement of ultra - high voltage wall bushing - valve hall system[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019 (154):123-133.
- [13] YANG Zhenyu, XIE Qiang, HE Chang, et al. Isolation design for slender ultra - high - voltage composite equipment using modal parameters considering multiple responses[J]. Engineering Structures, 2019(200):109709.
- [14] 陈全杰,刘虹,郑宏宇,等.变电站电气设备减隔震技术研究进展综述[C]//2020年工业建筑学术交流会.北京:工业建筑杂志社,2020:192-201.
CHEN Quanjie, LIU Hong, ZHENG Hongyu, et al. Review of research progress on seismic isolation technology for electrical power equipment in transformer substations[C]//Conference on Industrial Construction 2020. Beijing: Industrial Construction, 2020:192-201.
- [15] 王喆,朱鹏,石高扬.110 kV隔离开关地震响应及减震控制仿真分析[J]. 高压电器,2022,58(8):196-203.
WANG Zhe, ZHU Peng, SHI Gaoyang. Simulation analysis on seismic responses and vibration control of 110 kV disconnectors[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8):196-203.
- [16] 电力设施抗震设计规范:GB 50260—2013[S].2013.
Code for seismic design of power facilities: GB 50260—2013 [S].2013.
- [17] IEEE recommended practice for seismic design of substations: IEEE 693:2018[S].2018.
- [18] 官贞珍,朱全军,樊习英,等.中美欧电气设备抗震设计规范研究[J]. 地震工程与工程振动,2018,38(3):184-193.
GUAN Zhenzhen, ZHU Quanjun, FAN Xiying, et al. Study on Chinese, American and European codes for seismic design of electrical installations[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 38(3):184-193.
- [19] 程永锋,代泽兵,卢智成,等.高压电气设备的减震设计方法研究[J]. 高压电器,2013,49(9):67-73.
CHENG Yongfeng, DAI Zebing, LU Zhicheng, et al. Study on method of seismic design for electrical equipment with energy dissipation devices in China[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49 (9):67-73.
- [20] 建筑隔震橡胶支座:JG/T 118—2018[S].2018.
Rubber isolation bearings for buildings: JG/T 118—2018[S].2018.

廖望(1993—),男,博士,高级工程师,博士后研究员,主要从事钢结构与海上风电结构抗震相关研究(通信作者)(E-mail: liao_wang@ctg.com.cn)。

姜娟(1978—),女,硕士,正高级工程师,主要从事新能源工程设计与研究(E-mail: jiang_juan@ctg.com.cn)。

陈立(1987—),男,博士,正高级工程师,主要从事新能源海上风电相关设计与研究(E-mail: chen_li14@ctg.com.cn)。