

±800 kV 干式平波电抗器抗震性能分析

朱 旺¹,任阿阳²,薛志航³,谢 强¹

(1.同济大学土木工程学院,上海 200092;2.国网四川省电力公司特高压直流中心,四川 成都 610041;

3.国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘要:为了研究平波电抗器在地震下的动力响应以及设备耦联对地震响应的影响,文中采用 Abaqus 有限元软件对一典型±800 kV 干式平波电抗器进行仿真模拟和模态分析,选取符合场地需求谱的三组地震波进行了地震响应计算,分析电抗器本体顶部加速度峰值、顶部相对位移峰值以及下部支撑绝缘子的根部应力峰值。重新建立双电抗器“T”型耦联模型,采用同样的地震波输入并提取地震响应峰值与单体响应结果对比,研究了耦联对电抗器地震响应的影响。研究发现在 0.2g 地震波下,电抗器本体顶部加速度峰值均值达到 2.34 m/s²,顶部相对地面的位移最大达到 152.97 mm,根部应力峰值均值为 22.88 MPa。耦联后电抗器本体顶部两个水平方向加速度峰值均有所降低,在耦联方向上顶部相对地面位移有所降低,而垂直于耦联方向的水平方向上的相对地面位移反而有所提高,耦联对电抗器支撑绝缘子根部应力峰值影响不大。工程中可采用各类减震隔震措施对电抗器特定方向的动力响应进行控制,以保证电抗器在地震下的结构安全。

关键词:干式平波电抗器;模态分析;抗震性能;耦联

中图分类号:TM 478 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)06-0016-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220603

Seismic Performance Analysis of ±800 kV Dry-type Smoothing Reactor

ZHU Wang¹, REN Ayang², XUE Zhihang³, XIE Qiang¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Grid

Sichuan UHVDC Center, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Sichuan

Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to study the dynamic responses of smoothing reactor under earthquakes and the influence of equipment coupling on seismic response, the simulation and modal analysis of a typical ±800 kV dry-type smoothing reactor are carried out by Abaqus finite element software. The three groups of seismic waves which meet the demand of the required spectrum are calculated for the seismic responses, and the peak top acceleration, the peak top relative displacement of the reactor body and the peak stress of the root of support insulator are analyzed. The double reactor "T" coupling model is reestablished, and the same seismic wave inputs are used to extract the seismic response peaks and compare them with the responses of single model. The influence of coupling on seismic responses of reactor is studied. The study indicates that under the 0.2g seismic wave, the average peak acceleration of the top of reactor body reaches 2.34 m/s², the maximum displacement of the top relative to the ground is 152.97 mm, and the average peak stress of the root is 22.88 MPa. After coupling, the two horizontal acceleration peaks at the top of reactor body decreases, and the relative ground displacement of the top in the coupling direction decreases, while the relative ground displacement in the horizontal direction perpendicular to the coupling direction is increased. So coupling has little effect on the peak root stress of support insulator. In the project, various seismic isolation measures can be used to control the dynamic response of reactor in a specific direction to ensure the structural safety of reactor under earthquakes.

Key words: dry-type smoothing reactor; modal analysis; seismic performance; coupling

0 引言

变电站是电网系统的重要节点,承载着电能控制和转换的作用。作为电力系统的重要组成部分,变电站抗震性能影响着电网在地震时和地震后的安全运行状态^[1]。在历次大地震,如2008年汶川地震^[2-3]、2010年海地地震^[4]、2011年日本3·11地震^[5]、2013年芦山地震^[6]等地震中,变电站设备都受到了不同形式的损坏,体现了变电站设备在地震下存在较高易损性^[7]。变电站设备的损坏不仅影响着电能的传输和直接经济损失,更关系着人民的生产生活和社会的稳定^[8-10]。

为了提高变电站电气设备的抗震能力,已有众多学者对各类电气设备进行了抗震研究,研究手段各异,包括数值模拟、理论分析和振动台试验^[11-15]。干式平波电抗器是变电站直流输电工程的重要塔式设备,其质量大、尺寸大、重心高,因此其在地震下的响应需要重点关注。其上部电抗器本体刚度较大,自身不易发生变形,在以往地震中并未发生过破坏;然而,其下部用于支撑本体的支柱绝缘子属于脆性材料,结构细长,此类结构在以往地震中常常表现出瓷柱破坏或法兰破坏^[16],破坏严重时可能间接导致上部本体倾斜或掉落。对于细长类绝缘子构件以及支柱类电力设备,当下许多学者进行了抗震性能研究^[17-18],这些研究主要集中于地震中结构力学性能评估,包括评价顶部位移和根部应力等。然而,对于平波电抗器的研究,目前主要聚焦于本体构造和非结构性能方面,如噪声研究等。文献^[19]通过平波电抗器的电磁场特性提出了无磁金属的噪声罩的应用方案,相关噪声和温升试验测试发现无磁金属使噪声水平降低,同时不引起过多热损耗,进一步地,又在文献^[20]提出了新的隔声罩设计方法,并采用仿真方法证明了所提出方案的有效性。文献^[21]结合现场测量和仿真技术分析了电抗器的声场分布特性,并在国家标准基础上提出了较为准确的测量方法。

对于平波电抗器在地震下的力学性能分析,有部分文献也进行了深入研究。文献^[22]通过振动台试验对一复合绝缘子倾斜支撑干式空心电抗器进行了研究,确定了平波电抗器加速度放大系数最大的位置以及整个电抗器的抗震薄弱环节。文献^[23]提

出了一种带有4节绝缘子单元的新型平波电抗器,通过仿真模型验证了绝缘子的抗震强度安全系数符合要求。文献^[24]研究了某特高压直流平波电抗器的复合支柱绝缘子的抗震性能,通过理论分析计算了绝缘子芯棒的各项参数,并采用ANSYS模型验证了支柱绝缘子的安全性。然而,在一些变电站或换流站中,平波电抗器以双耦联形式设计,现有抗震研究仅针对于单体设备,没有考虑耦联对电抗器响应的影响。

下面,采用Abaqus有限元软件对某换流站的±800 kV干式平波电抗器进行了仿真模拟,并对该电抗器进行了模态分析;随后,输入典型地震动进行地震响应分析,其中包括电抗器本体顶部加速度、顶部位移以及支撑绝缘子根部应力。在此基础上进一步建立电抗器耦联模型,与单体模型进行基频、振型和动力响应比较,确定耦联效应对电抗器地震响应的影响。

1 ±800 kV 干式平波电抗器模型

所研究的±800 kV干式平波电抗器结构如图1所示。该电抗器单体由电抗器本体、复合支柱绝缘子支撑(以下称支撑绝缘子)以及其他构造构件如罩伞、支撑平台、绝缘子上下支架等组成,其中支撑绝缘子采用倾斜形式布置。

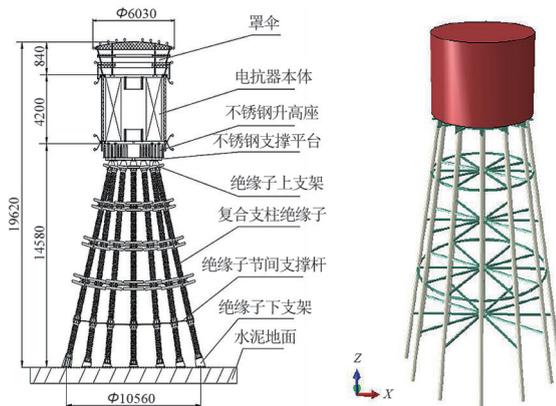


图1 干式平波电抗器单体(单位:mm)

如图1所示,电抗器单体结构整体高度为19.62 m,支撑绝缘子共12根,在本体下部均匀分布,支撑绝缘子单根总长为14.4 m,倾斜角度为10°。上部电抗器本体与下部升高座固定连接,由于其质量和刚度较大,因此可视为刚体。电抗器上的防噪声罩等非结构构件对结构刚度影响较小,仅将其质量转化

到了电抗器本体上。采用 Abaqus 软件对该电抗器进行仿真,电抗器本体采用实体单元,下部支撑绝缘子等采用梁单元模拟,电抗器本体与支撑绝缘子通过不锈钢平台固定连接,其中:电抗器本体截面直径为 4.734 m,弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3;下部支撑绝缘子直径为 280 mm,单根质量为 1772 kg,弹性模量为 20 GPa,泊松比为 0.24;不锈钢支撑为十字形截面,弹性模量为 72 GPa,泊松比为 0.31。支撑绝缘子底部为六自由度约束,模拟刚性地面。电抗器垂直方向设定为 Z 轴,水平两方向分别为 X、Y 轴。

2 模态分析

对干式平波电抗器模型进行模态分析,可以得到该电抗器各阶自振频率及模态。该模型的前 10 阶频率和对应的模态振型如表 1 所示。根据 GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》^[25]推荐的场地需求谱,其平台段为 2.22~10 Hz,可见电抗器第 3~10 阶频率分布在平台段,与地震动的卓越频率接近,地震下易产生类共振现象。同时,第 3~10 阶振型均是由支撑部分引起,说明下部支撑相对于上部的本体更易受到地震影响。该电抗器的前 4 阶振型如图 2 所示,其中:1 阶、2 阶均为电抗器整体的弯曲模态,两向相同;3 阶、4 阶分别为整体和下部支撑绝缘子的扭转振型。

表 1 平波电抗器单体前 10 阶模态频率和振型

模态	频率/Hz	振型
1	0.569	整体 Y 向弯曲振型
2	0.570	整体 X 向弯曲振型
3	0.661	本体沿 Z 轴扭转振型
4	2.986	支撑绝缘子沿 Z 轴扭转振型
5	3.258	支撑绝缘子 Y 向弯曲振型
6	3.259	支撑绝缘子 X 向弯曲振型
7	5.029	底层水平支撑弯曲振型
8	6.278	第 3 层水平支撑弯曲振型
9	8.064	第 2 层水平支撑弯曲振型
10	8.155	支撑绝缘子 2 阶弯曲振型

3 抗震性能分析

3.1 地震波选取

所研究分析的平波电抗器位于 8 度设防地区。

根据 GB 50260—2013^[25],设计基本地震加速度为 0.2g,场地类别为 II 类,场地特征周期 0.45 s。选取 El Centro 波、Landers 波和新松波在模型基底进行输入,其中 El Centro 波和 Landers 波均为天然波,新松波为人工波。Landers 波归一化三向加速度时程如图 3 所示,3 条地震波的加速度反应谱与规范给定

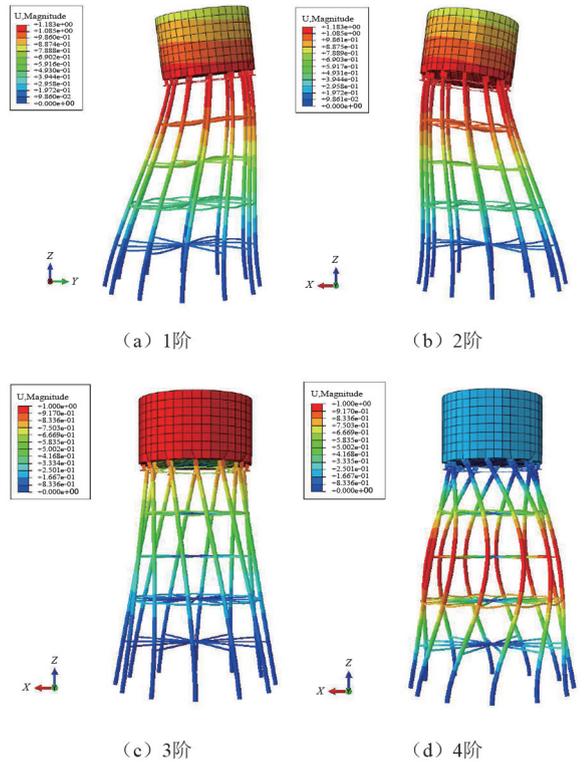


图 2 平波电抗器单体振动模态

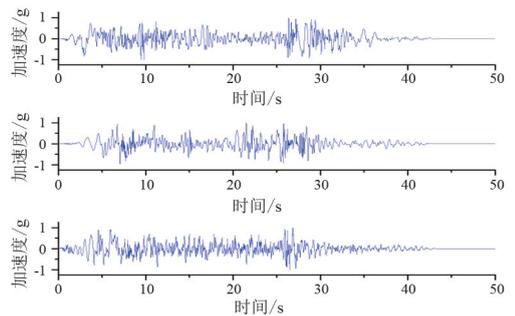


图 3 Landers 波归一化加速度时程 (Y, X, Z)

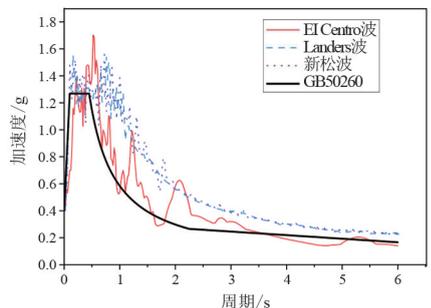


图 4 所选地震波的反应谱与需求谱

的场地需求谱如图4所示,3条地震波均能很好地覆盖住需求谱,满足规范要求。输入3组地震波时,三向加速度比值为1:0.85:0.65^[26],这里以Y向为主震方向,加速度峰值为0.2g。

3.2 加速度响应分析

平波电抗器放置于支撑绝缘子上部,支撑绝缘子相对于本体具有较低的刚度,在地震下表现出一定的柔度,因此绝缘子会将地震加速度进行一定放大。为了更好地了解电抗器抗震性能,统计了3组地震动下电抗器顶部的加速度峰值,并对3组地震动结果取平均,同时并计算加速度放大系数如表2所示。

表2 单体模型加速度峰值及放大系数均值

地震波	加速度峰值/(m·s ⁻²)			加速度放大系数		
	X	Y	Z	X	Y	Z
El Centro	1.24	1.60	1.27	0.75	0.82	1.00
Landers	2.60	3.03	1.27	1.56	1.55	1.00
新松波	1.94	2.40	1.28	1.17	1.22	1.00
平均值	1.93	2.34	1.27	1.16	1.20	1.00

由于电抗器各个方向输入的地震动加速度峰值不同,表2中加速度放大系数取各个方向加速度峰值与该方向地震动加速度峰值之比。由表2可知,电抗器顶部加速度主震方向最大值为3.03 m/s²,出现在Landers波作用下,对应加速度放大系数1.55,同时在Landers地震波下X向最大加速度为2.6 m/s²,对应放大系数1.56。而顶部加速度在Z向放大系数均为1,说明Z向几乎不存在放大效果。从平均值来看,水平两向加速度均有所提高,而竖直方向没有明显放大效应。另外,主震方向(Y向)的放大效果整体上强于X向,然而模型的水平两向原则为对称两向,说明放大系数的大小与地震动时程有关,证明了所提采用3条地震动进行研究的必要性。

3.3 相对位移响应分析

位移响应可以反映结构在地震下的变形情况,且电抗器上部一般存在导线耦联,若相对位移过大引起母线拉扯,容易引起设备的牵拉破坏,因此电抗器的位移响应也较为重要。与加速度响应分析类似,取电抗器本体顶部对于地面的相对位移进行分析,所得相对位移数据如表3所示。

由表3可知,在峰值地面加速度为0.2g的地震下,顶部相对位移峰值最大达到210.44 mm,相对电抗器本体高度19.62 m具有相对转角1.07%。其中,主震方向(Y向)最大相对位移出现在Landers地震波

下,X向最大值也出现在此地震波下,为192.02 mm。从3组地震波结果及其均值看,水平两向中,Y向相对位移明显高于X向,仍然说明地震波对于地震响应峰值有明显影响。另外,竖向相对位移仅为0.01 mm,究其原因,电抗器整体在竖直方向上的刚度由各个支撑绝缘子的轴向刚度提供,因此具有较大的刚度抑制了竖向相对位移。

表3 单体模型相对峰值及均值

地震波	相对位移峰值/mm		
	X	Y	Z
El Centro	77.31	97.79	0.01
Landers	192.02	210.44	0.02
新松波	133.38	150.67	0.01
平均值	134.24	152.97	0.01

3.4 根部应力响应分析

提取3组地震动下支撑绝缘子的根部的应力峰值,其中,El Centro波、Landers波和新松波下的应力峰值分别为16.08 MPa、30.47 MPa和22.09 MPa,均值为22.88 MPa。复合绝缘子材料的破坏应力由厂商提供,为75 MPa,支撑绝缘子的安全系数根据规范取1.67^[25],因此临界应力为75 MPa/1.67=44.9 MPa。此时3组地震波下材料并未达到破坏强度,不会发生绝缘子的强度破坏。

4 耦联效应对抗震性能的影响分析

4.1 平波电抗器耦联模型

在一些典型换流站中,平波电抗器以耦联形式设计,一般为双电抗器“T”型连接,如图5所示。在Abaqus模型中,“T”型结构采用线性梁单元建立,水平管母长度为11.6 m,外径为300 mm,壁厚为25 mm,竖向支柱长为15.58 m,连接处均压环采用Tie形式模

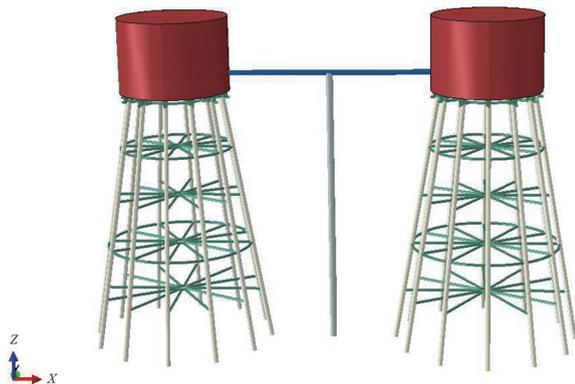


图5 平波电抗器耦联模型

拟,管母和电抗器本体连接处软母线采用 Axial 模型模拟,该连接处距离电抗器底面 0.2 m。其中,两个电抗器沿着 X 向排列,地震输入时 Y、X、Z 三向加速度峰值按照 1:0.85:0.65 的比例进行输入,Y 向仍为主震方向。

4.2 模态对比

耦联后的平波电抗器体系前三阶模态如图 6 所示,前两阶模态振型分别为两电抗器水平方向同向弯曲,第 3 阶模态为两电抗器水平方向异向弯曲。本质上,耦联带来的影响仅为两个电抗器在不同方向上的振型模态,前两阶弯曲振型与单体振型基本相同。从频率角度分析,首先提取了耦联体系的前 10 阶频率,分别为 0.569 0~3.260 9 Hz。1 阶模态频率为 0.569 0 Hz,与单体相同,说明耦联后对基频影响不大;而前 10 阶模态的范围明显小于单体情

况,说明在前 10 阶模态中,由于耦联因素出现了一些低频振型,其中包括了两个电抗器的同向和异向模态以及 T 型连接结构的局部振动模态。

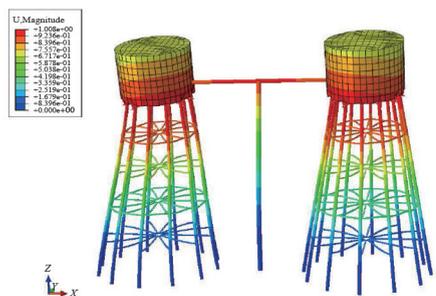
4.3 加速度响应对比

同样,对耦联模型进行地震响应分析,提取电抗器顶部的加速度并计算放大系数,如表 4 所示。

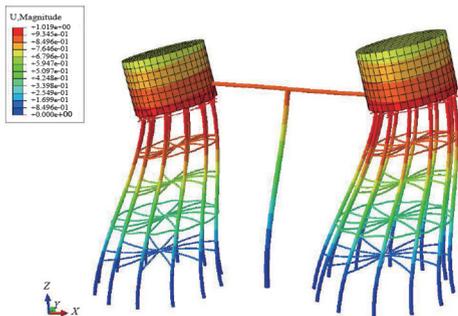
表 4 耦联模型加速度峰值及放大系数均值

地震波	加速度峰值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)			加速度放大系数		
	X	Y	Z	X	Y	Z
El Centro	1.12	1.55	1.27	0.67	0.79	1.00
Landers	2.40	2.90	1.27	1.44	1.48	1.00
新松波	2.00	2.37	1.28	1.20	1.21	1.00
平均值	1.84	2.27	1.27	1.10	1.16	1.00

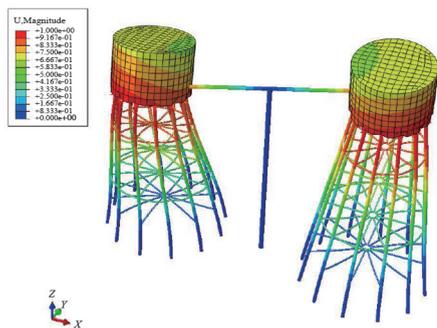
根据表 4 和表 2,绘制单体和耦联模型中电抗器顶部加速度峰值均值比较图形,如图 7 所示。表 4 中,顶部最大加速度峰值为 2.90 m/s^2 ,出现在 Landers 地震波下,相对于单体情况的最大加速度峰值 3.03 m/s^2 有所减小,降低比例为 4.3%。同时在 X 向加速度峰值也有所减小,由 2.6 m/s^2 降为 2.4 m/s^2 ,降低比例为 7.7%,说明电抗器的耦联可以降低地震下电抗器顶部的加速度峰值,同时其放大系数也有所降低。图 7 中由加速度峰值均值情况可以看出,电抗器水平方向加速度峰值在设备耦联后均有所降低,竖直方向上没有变化。



(a) 1阶



(b) 2阶



(c) 3阶

图 6 平波电抗器耦联模型振动模态

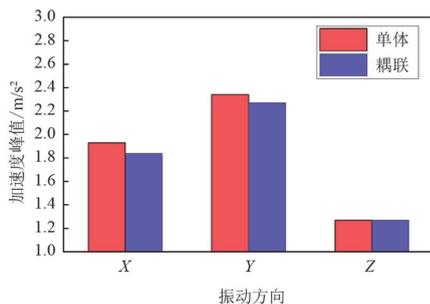


图 7 单体和耦联加速度峰值对比

4.4 相对位移响应对比

提取电抗器顶部的相对地面位移峰值,如表 5 所示,同样根据表 5 和表 3,绘制单体和耦联情况的对比图形,如图 8 所示。

表 5 中,顶部最大相对位移峰值为 210.64 mm,出现在 Landers 地震波下,相对于单体情况的最大相对位移峰值 210.44 mm 几乎无变化。在 X 向相对位移峰值有所减小,由 192.02 mm 降为 184.13 mm,说明电抗器的耦联对地震下电抗器顶部的相对位移峰值具有一定抑制作用。图 8 中由相对位移峰值均

值情况可以看出,电抗器水平 X 向相对位移峰值在设备耦联后有所降低,Y 向略有增加,竖直方向上相对位移极小,没有变化。其中,X 向为设备耦联方向,说明耦联对于两个电抗器在排列方向上的相对位移有所抑制,而在垂直于耦联方向上对相对位移有提高作用。

表 5 耦联模型相对峰值及均值

地震波	相对位移峰值/mm		
	X	Y	Z
El Centro	77.28	97.94	0.01
Landers	184.13	210.64	0.01
新松波	133.12	150.88	0
平均值	131.51	153.15	0.01

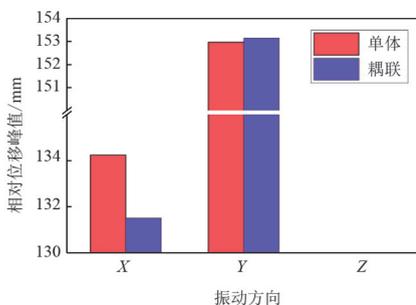


图 8 单体和耦联相对位移峰值对比

4.5 根部应力响应对比

提取电抗器支撑绝缘子的根部应力峰值,如表 6 所示,同样根据表 6 与前述单体结果,绘制单体和耦联情况的对比图形,如图 9 所示。

表 6 耦联模型支撑绝缘子根部应力峰值

地震波	应力峰值/MPa	峰值均值/MPa
El Centro 波	16.16	
Landers 波	30.49	22.91
新松波	22.09	

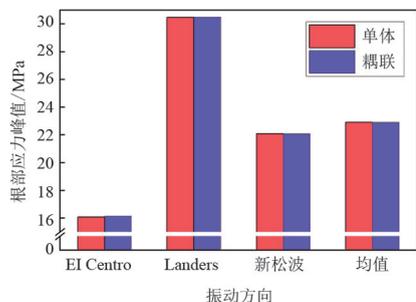


图 9 单体和耦联根部应力峰值对比

表 6 中,根部应力峰值最大为 30.49 MPa,出现在 Landers 地震波下,相对于单体情况的最大根部应力峰值 30.47 MPa 略有提高。由图 9 中根部应力峰值对比情况可以看出,3 组地震波和均值情况下

单体和耦联差别极小,几乎没有变化,说明在 0.2g 地震下,所研究的平波电抗器进行耦联对于支撑绝缘子根部应力几乎没有影响。

5 结论

上面针对某典型±800 kV 干式平波电抗器进行了仿真模拟和模态分析,并通过迭代计算分析了设备在 0.2g 地震作用下的本体顶部加速度、位移和支撑绝缘子根部应力,进而通过电抗器耦联模型研究了耦联对各类地震响应的影响。研究发现耦联对于 0.2g 地震作用下的本体顶部加速度峰值有所降低,对耦联方向上的顶部相对地面位移峰值有所抑制,对于支撑绝缘子根部应力峰值则影响不大。工程中可采用各类减震隔震措施对电抗器特定方向的动力响应进行控制,以保证电抗器在地震下的结构安全。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 于水清,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.
- [3] XIE Q, ZHU R Y. Damage to electric power grid infrastructure caused by natural disasters in China - earthquake, wind and ice[J]. IEEE Power and Energy Magazine,2011,9(2):28-36.
- [4] GOODNO B J, GOULD N C, CALDWELL P, et al. Effects of the January 2010 Haitian earthquake on selected electrical equipment[J]. Earthquake Spectra,2011,27(S1):251-276.
- [5] EIDINGER J, DAVIS C, TANG A, et al. M 9.0 Tohoku earthquake March 11 2011 performance of water and power systems[R]. Oakland, USA: G&E Engineering System Incorporated,2012.
- [6] 尤红兵,赵凤新.芦山 7.0 级地震及电力设施破坏原因分析[J].电力建设,2013,34(8):100-104.
- [7] 孙宇晗,程永锋,卢智成,等.1100 kV 复合外绝缘套管地震模拟振动台试验研究[J].高电压技术,2017,43(10):3224-3230.
- [8] HE C, XIE Q, ZHOU Y. Influence of flange on seismic performance of 1100 kV ultra high voltage transformer bushing[J]. Earthquake Spectra, 2019,35(1):447-469.

- [14] 吴素我,张焰,苏运.基于配用电数据关联的中压配电网断线故障诊断方法[J].电力自动化设备,2017,37(7):101-109.
- [15] 王一卉,姜长泓.模糊神经网络专家系统在动力锂电池组故障诊断中的应用[J].电测与仪表,2015,52(14):118-123.
- [16] CAO M G, XU A D, JIANG Y X, et al. The application of elman neural network in uninterrupted maintenance of power grid[J]. Journal of Physics Conference Series, 2020, 1673(1):012057.
- [17] SUN X Y, GONG S J, HAN G, et al. Pruning Elman neural network and its application in bolt defects classification[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2019(10):1847-1862.
- [18] 郭琰,刘森森,张萌,等.基于模糊优化多目标进化算法的配电网故障定位[J].电气工程学报,2015,10(5):61-67.
- [19] 孙铁军,曲丽萍,关海爽,等.基于智能优化的模糊 Petri 网的电网故障诊断[J].控制工程,2021,28(1):127-134.
- [20] 黄鹏,聂枝根,陈峥,等.基于优化 Elman 神经网络的锂电池容量预测[J].储能科学与技术,2022(7):2282-2294.

作者简介:

高艺文(1989),男,硕士,高级工程师,研究方向为配电网自动化、配电网故障诊断分析;

龙呈(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为配电网运行及自动化;

苏学能(1991),男,博士,工程师,研究方向为电力系统安全稳定分析与并行计算;

石铨(1999),男,硕士,研究方向为配电网运行与故障研判。(收稿日期:2022-07-31)

(上接第21页)

- [9] 東京電力株式会社.新潟県中越沖地震における所内変圧器火災状況および課題解決に向けた取組みについて[R].東京:東京電力株式会社,2007.
- [10] 東京電力株式会社.東北地方太平洋沖地震に伴う電気設備の停電復旧記録[R].東京:東京電力株式会社,2013.
- [11] 曹枚根,周福霖,谭平,等.大型电力变压器及套管振动台抗震试验研究[J].振动与冲击,2011,30(11):122-128.
- [12] 孙宇晗,卢智成,刘振林,等.特高压变电站内110 kV电容器组模型地震模拟振动台试验[J].高电压技术,2017,43(3):879-884.
- [13] XIE Q, HE C, YANG Z, et al. Influence of flexible conductors on the seismic responses of interconnected electrical equipment[J]. Engineering Structures, 2019, 191:148-161.
- [14] 马国梁,廖德芳,何畅,等.1100 kV 变压器套管抗震性能[J].高电压技术,2017,43(6):2033-2041.
- [15] 孙新豪,谢强,李晓璇,等.带有滑动摩擦摆支座的500 kV 变压器地震响应[J].高电压技术,2021,47(9):3226-3235.
- [16] 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):2594-2605.
- [17] 张小军,卢智成,刘振林.特高压支柱类设备动力放大系数研究[J].电瓷避雷器,2020(2):204-210.
- [18] 朱全军,高政国,陈应禄,等.基于随机反应谱理论的支柱类电气设备抗震性能评估方法研究[J].地震工程与工程振动,2018,38(2):194-200.
- [19] 田一,樊超,刘方,等.特高压干式平波电抗器用隔声罩及无磁金属[J].中国环保产业,2019(10):67-71.
- [20] 田一,王斌,金文德,等.干式平波电抗器隔声罩模块化设计[C].2020中国西部声学学术交流会议论文集,2020.
- [21] 何强,樊超,王斌,等.基于加密测点的干式空心平波电抗器声场分布特性[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(6):78-82.
- [22] 展猛,王社良,赵云.干式空心电抗器模型结构减震控制试验及数值分析[J].振动工程学报,2020,33(1):179-187.
- [23] 高嵩,高超,刘洋,等.新型平波电抗器复合支柱绝缘子力学性能分析[J].绝缘材料,2020,53(6):77-83.
- [24] 王黎明,汪创,傅观君,等.特高压直流平波电抗器的复合支柱绝缘子抗震特性[J].高电压技术,2011,37(9):2081-2088.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部.电力设施抗震设计规范:GB 50260—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范:GB50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

作者简介:

朱旺(1996),男,博士研究生,研究方向为电网基础设施防灾减灾;

任阿阳(1986),男,研究方向为特高压直流运维技术;

薛志航(1987),男,硕士,研究方向为电网基础设施防灾减灾;

谢强(1971),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电网基础设施防灾减灾。(收稿日期:2022-07-27)