

带斜拉杆绝缘子的柔性直流换流阀抗震性能研究

任成林¹, 鲁翔¹, 毕良富², 杨斌², 张立红³, 吕玮³, 郭磊², 金胜波²

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司, 广州 510663; 2. 特变电工新疆新能源股份有限公司, 乌鲁木齐 830011; 3. 中国水利水电科学研究院工程抗震研究中心, 北京 100048)

摘要: 为提升支撑式柔性直流换流阀的抗震能力, 部分设备供应商在支撑绝缘子之间增设斜拉杆绝缘子, 研究斜拉杆绝缘子的布置方案及预拉力大小对换流阀整体抗震性能的影响十分必要。结合某工程换流阀, 运用有限元数值仿真技术, 首先开展模态分析, 研究了斜拉杆绝缘子的布置方案以及预拉力值对阀塔动力特性的影响, 然后分别采用振型分解反应谱法和非线性时程分析法对阀塔进行动力分析。结果表明增设斜拉杆绝缘子能显著提高换流阀阀塔基频, 但斜拉杆绝缘子预拉力的大小对阀塔结构整体频率影响较小。时程法计算得到的结果普遍大于反应谱法的结果, 且因其能精确模拟斜拉杆绝缘子可拉不可压的非线性特性, 因此建议采用时程法开展带斜拉杆绝缘子的支柱式电气设备抗震性能研究。

关键词: 柔性直流换流阀; 斜拉杆绝缘子; 反应谱法; 时程法; 抗震性能

Research on Seismic Performance of Flexible DC Converter Valve with Diagonal Rod Insulator

REN Chenglin¹, LU Xiang¹, BI Liangfu², YANG Bin², ZHANG Lihong³, LÜ Wei³, GUO Lei², JIN Shengbo²

(1. EHV Power Transmission Company, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. TBEA Sunoasis Co., Ltd., Urumchi 830011, China; 3. Earthquake Engineering Research Center, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to improve the seismic performance of the supported flexible DC converter valve, some equipment suppliers have added diagonal rod insulators between the support insulators. It is necessary to study the impact of the layout scheme and pre-tension force of the diagonal rod insulators on the overall seismic performance of the converter valve. Combined with a converter valve, finite element numerical simulation technology is used in a certain engineering project. Firstly, modal analysis is carried out to study the arrangement scheme of diagonal rod insulators and the influence of pre-tension force value on the dynamic characteristics of the valve tower. Then, the vibration mode decomposition response spectrum method and nonlinear time history analysis method are respectively used to conduct dynamic analysis of the valve tower. The results show that the addition of diagonal rod insulators can significantly increase the fundamental frequency of the converter valve tower, but the magnitude of the pre-tension force of the diagonal rod insulator has a relatively small impact on the overall frequency of the valve tower structure. The results obtained by the time history method are generally greater than those obtained by the response spectrum method. Because it can accurately simulate the nonlinear characteristic of the diagonal rod insulator which can be pulled but not compressed, it is recommended to use the time history method to study the seismic performance of pillar type electrical equipment with diagonal rod insulators.

Key words: flexible DC converter valve; diagonal rod insulator; response spectrum method; time history method; seismic performance

0 引言

换流阀作为柔性直流输电系统的核心元件,造价昂贵,其安全运行情况与整个柔性直流系统的稳定运行密切相关。在换流阀服役期间,可能会遭遇地震等极端情况,因此换流阀的抗震安全问题备受重视^[1-3]。

根据固定方式不同,换流阀包括支撑式和悬吊式两种结构型式^[4]。国内外许多学者对换流阀在动荷载作用下的安全性能进行了相关研究^[5]。文献[6-8]通过振动台试验方法研究了悬吊式阀塔的动力特性和地震响应规律。文献[9-11]对支撑式换流阀的缩比模型或部分等效组件模型开展振动台试验,测得了阀塔结构的自振频率和位移加速度等动力响应。除地震模拟振动台试验方法外,有限元数值模拟技术随着计算机技术的进步也越来越多地应用于阀塔抗震研究^[12-14]。文献[15-16]和文献[17-18]分别采用反应谱法和时程积分算法分析了悬吊式换流阀在地震作用下的动力响应。文献[19]利用反应谱法对支撑式阀塔整体结构进行数值模拟研究地震响应规律。文献[20]采用时程法研究了支撑式阀塔的动力特性,并验证了铅芯橡胶隔震支座的有效性。支撑式换流阀因其安装简便,且对阀厅屋架强度要求不高,在换流站中的应用最为普遍。

为了提升支撑式换流阀的抗震能力,部分阀塔供应商在支撑绝缘子之间增设复合材料斜拉绝缘子^[11],这种斜拉绝缘子具有重量轻、强度高、耐污闪的特点,且斜拉绝缘子端头通过设置调节装置可以解决绝缘子长度公差难以控制的现场安全问题^[21]。但是斜拉绝缘子的力学特性与支撑绝缘子不同,其仅可承受拉力不可承受压力,这种非线性特性给数值模拟带来了一定的困难。文献[22]利用自编程序研究了拉杆式避雷器的动力特性和抗震能力;文献[23-24]研究了考虑预应力影响的直流滤波电容器的抗震性能分析;文献[25]研究了增设拉线对特高压直流复合避雷器地震响应的影响分析。文献[26-27]的研究结果表明对于结构构型简单的一维结构,其基本频率随着结构预拉力的变大而增大。但是对于复杂的空间结构,斜拉杆预应力对结构基频的影响结论不一;文献[28]研究表明拉索铝合金网架的一阶频率随着铝网架预拉力的增大略有提高;文献[27]和文献[29-30]研究表明张拉索杆

支承体系、简支梁、钢结构等非完全柔性结构体系随着拉索预拉力的增大而降低。关于斜拉杆在换流阀塔这种复杂支撑式电气设备中的影响研究在已有文献中报道较少,文献[31]分析了斜拉绝缘子非线性属性对支撑式阀塔抗震性能的影响,但是关于斜拉绝缘子预应力大小对阀塔抗震性能的影响研究鲜少报道。

本文研究对象为某工程柔性直流换流阀,首先对换流阀开展模态分析,研究了斜拉绝缘子的布置方案以及预拉力大小对阀塔自振频率等动力特性的影响,然后分别采用振型分解反应谱法和逐步积分时程法进行动力分析,并利用不同方法得到的结果较大者对阀塔进行了抗震安全评价。

1 柔性直流换流阀计算条件

1.1 有限元模型

本文研究对象为某工程用柔性直流输电项目的换流阀阀塔,阀塔共由4层组件组成。为提升抗震能力,阀塔底部和层间采用支柱绝缘子和斜拉绝缘子组成的交错网状结构。其中斜拉绝缘子长度在5 m左右,而直径仅为24 mm,属于典型的细长杆结构,受到很小的压力时就会发生弯曲变形,因此可以认为斜拉绝缘子不能承受压力,其材料本构呈现明显的非线性。在设备安装完成后,斜拉绝缘子具有一定的初始预拉力。阀塔模型如图1所示,阀塔尺寸:长为6.868 m,宽为4.87 m,高为17.6 m,总质量约为93 t。定义阀塔长轴方向为X向,短轴方向为Y向,竖向为Z向。

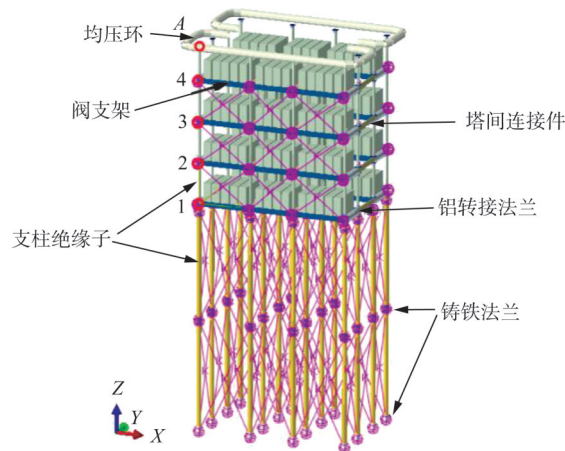


图1 换流阀有限元模型

Fig. 1 Finite element model of valve tower

1.2 材料特性

有限元模型中支撑绝缘子、阀支架铝梁、绝缘横梁、塔间连接件等采用梁单元模拟,对于斜拉杆绝缘子采用非线性弹簧进行模拟,拉应力区对应的弹簧刚度根据斜拉杆绝缘子的材料属性以及截面长度等信息确定,压应力区的弹簧刚度设为接近0的极小值。阀塔有限元模型中的材料属性如表1所示。

表1 材料参数列表
Tab. 1 Material parameters

部件	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
阀支架、铝转接法兰、均压环	69	0.33	2 700
绝缘横梁、塔间连接件	18	0.30	1 800
绝缘子芯棒	40	0.30	2 000
铸铁法兰	200	0.30	7 850

计算采用2%的阻尼比,时程法计算时采用瑞利阻尼,其中质量阵和刚度阵前面的瑞利阻尼系数通过前两阶模态频率以及阻尼比计算确定。

1.3 地震作用与工况组合

根据《中国地震动峰值加速度区划图》^[32]等资料,换流阀所处区域的地震烈度为9度。依据《GB50260-2013电力设施抗震设计规范》^[33],动力时程分析计算用的地震波水平向加速度峰值取0.4 g,竖向加速度峰值取水平向加速度峰值的65%,即 $X:Y:Z=1:1:0.65$ 。场地类别为Ⅱ类第三组,特征周期取0.45 s,阻尼比0.02,生成标准需求谱。人工地震波各方向加速度时程如图2所示。从图3所示的加速度反应谱与场地需求谱可以看出地震波反应谱能有效包络需求谱。

动力时程分析时除了1套人工合成地震动外,还选用两条能较好覆盖场地需求谱的天然地震波,分别为Elcentro波和Taft波。其中Elcentro波属于近场地震波,频带宽分布相对均匀,适用于二类场地,而Taft波属于中远场地震波,适用于三类场地。按照X+Y+Z三向同时输入的工况开展振型分解反应谱法和动力时程分析。

1.4 计算条件

为了研究斜拉杆绝缘子对阀塔抗震性能的影响,共设计如表2所示的7种工况进行对比分析。

其中工况1为未设斜拉绝缘子的工况,工况2

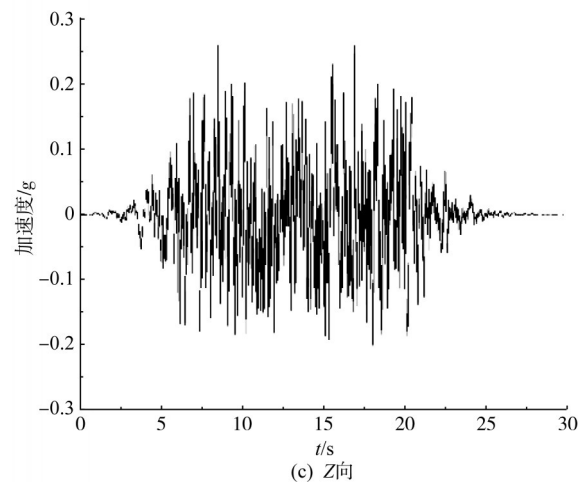
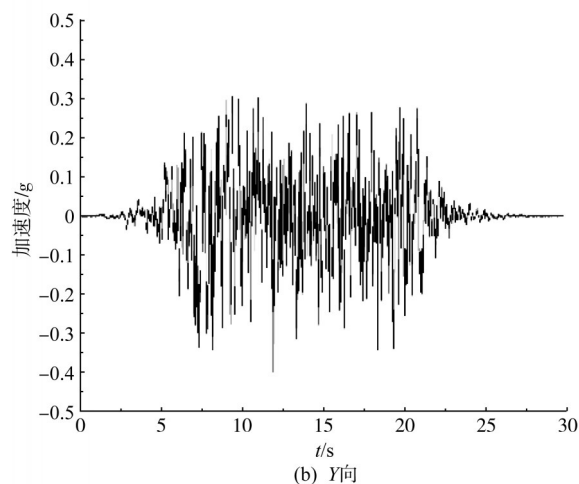
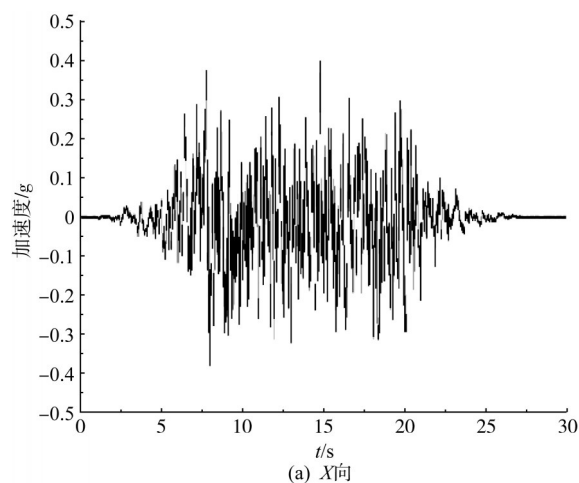


图2 人工地震波加速度时程

Fig. 2 Acceleration time histories diagram of artificial earthquake motion

—3为只有部分斜拉绝缘子的工况,工况4—7为同时设有底部和层间斜拉绝缘子但初始预拉力不同的工况。

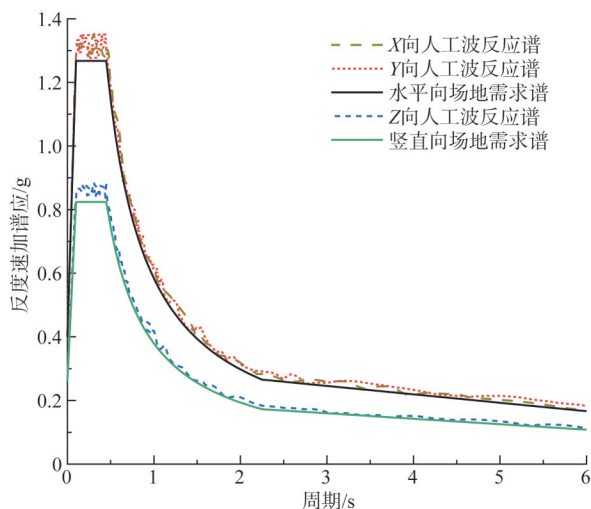


图3 人工地震波反应谱与需求谱

Fig. 3 Artificial earthquake motion response spectrums and required response spectrums

表2 工况列表

Tab. 2 Working conditions table

工况号	斜拉绝缘子属性	初始预拉力/kN
工况1	无所有斜拉绝缘子	
工况2	无底部斜拉绝缘子	
工况3	无层间斜拉绝缘子	
工况4	线弹性	0
工况5	可拉不可压非线性	3
工况6	可拉不可压非线性	6
工况7	可拉不可压非线性	12

2 斜拉杆绝缘子对阀塔动力特性影响分析

2.1 换流阀阀塔模态分析

图4为阀塔工况5的前三阶振型，一阶振型为阀塔沿短轴Y向平动，二阶振型为阀塔沿长轴X向平动，三阶振型为阀塔平面内转动。

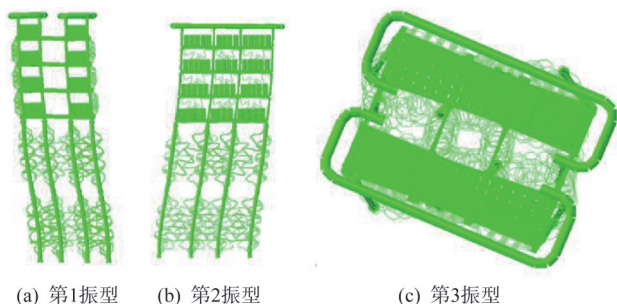


图4 工况5阀塔的前三阶振型图

Fig. 4 First three-order vibration mode diagram of the valve tower under condition 5

工况3—7的振型图均与工况5相同，而工况1和工况2的前两阶振型分别为沿阀塔长轴X向和短轴Y向的平动(与其余工况相反)，第3阶振型与其余工况相同，说明底部斜拉绝缘子对结构的力学性能影响明显。

图5为工况1—7所述的阀塔模型模态分析结果。

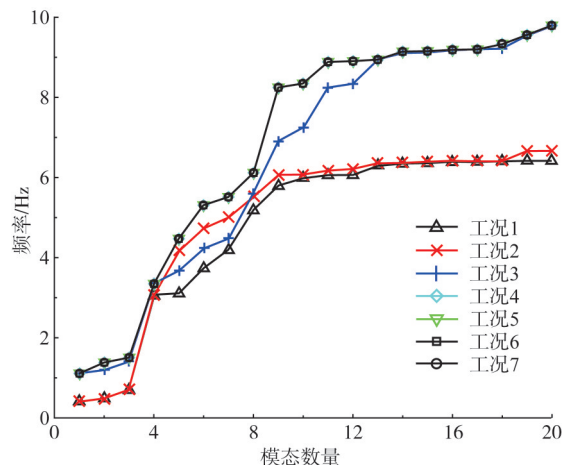


图5 不同工况阀塔频率计算结果

Fig. 5 Frequency calculation results of converter valve tower under different operating conditions

其中工况1和工况2的基频分别为0.4 Hz和0.42 Hz，工况3—7的基频均为1.11 Hz，可以看出增设斜拉绝缘子尤其是底部斜拉绝缘子对阀塔整体结构频率影响很大，这说明斜拉绝缘子的存在能显著提高换流阀整体结构的刚度。对比分析工况4—7可知，斜拉绝缘子预拉力的大小对阀塔整体结构频率影响不大，这是因为支撑式阀塔属于非完全柔性结构，其几何刚度在总刚度中贡献较小，因此考虑几何非线性影响后，斜拉绝缘子预拉力对阀塔整体结构自振频率有一定影响，但影响程度相对较小，这与文献[27]的研究结论是一致的。

2.2 动力特性计算分析

根据工程实际测量所得，安装完成后的多数斜拉绝缘子预拉力介于2.5~3.5 kN之间，因此以工况5阀塔模型为研究对象，分别采用振型分解反应谱法和逐步积分时程法进行动力分析。阀塔顶部考查点A处的位移峰值和各层考查点处(位置见图1)的加速度峰值分别如表3—4所示。

可以看出时程法计算得到的位移结果大于反应谱法的计算值，不同阀层的加速度响应峰值随着阀

表 3 阀塔考查点位移峰值

Tab. 3 Peak displacement of converter valve tower inspection

方向	points				m
	反应谱	人工波	Elcentro 波	Taft 波	
	X+Y+Z	X+Y+Z	X+Y+Z	X+Y+Z	
X	0. 128	0. 193	0. 185	0. 158	
Y	0. 155	0. 203	0. 21	0. 2	
Z	0. 004	0. 005	0. 005	0. 005	

表 4 阀塔考查点加速度峰值

Tab. 4 Acceleration peak of converter valve tower inspection

部位	方向	points			m·s ⁻²
		人工波	Elcentro 波	Taft 波	
		X+Y+Z	X+Y+Z	X+Y+Z	
1 层	X	6. 280	6. 497	5. 321	
	Y	5. 410	5. 138	4. 868	
	Z	2. 742	1. 923	1. 718	
2 层	X	7. 474	6. 658	5. 526	
	Y	5. 418	5. 426	5. 184	
	Z	2. 795	2. 206	1. 751	
3 层	X	7. 142	6. 98	5. 925	
	Y	5. 524	5. 891	5. 677	
	Z	2. 829	2. 112	1. 774	
4 层	X	7. 727	7. 68	6. 423	
	Y	6. 408	6. 142	5. 837	
	Z	2. 851	2. 161	1. 786	

层高度的增加而增大。根据计算结果, 位移响应水平向峰值最大为 0. 212 m, 而一般阀塔连接金具的允许位移约为 0. 5~0. 8 m, 满足工程需求。

阀塔各关键构件的应力结果如表 5 所示。可以看出除顶部均压环外, 其他阀塔关键支撑部件的应力结果均是时程法的计算值大于反应谱法的计算结果, 而且不同地震波之间的时程法计算结果相接

近, 分析原因是因为时程法可以精确模拟斜拉绝缘子可拉不可压的非线性特性, 因此计算结果偏大。各方法计算得到的应力结果安全系数均大于 1. 67, 满足《GB50260—2013 电力设施抗震设计规范》^[33]规定的强度要求。

图 6 为人工波 (X+Y+Z) 工况时典型的底部和层间斜拉绝缘子轴力时程图, 可以看出在动力时程计算过程中, 轴力值始终大于 0, 表明斜拉绝缘子始终仅承受拉力。

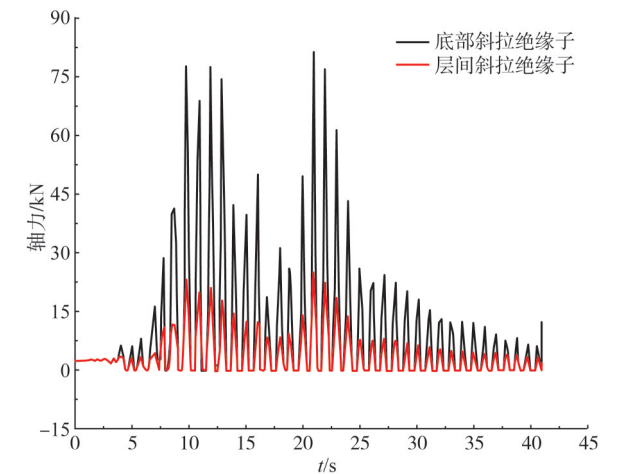


图 6 典型工况斜拉杆绝缘子轴力时程图
Fig. 6 Time-history diagram of axial force of diagonal rod insulator under typical working conditions

在阀塔抗震性能分析中, 基于线性叠加理论的反应谱法是将斜拉绝缘子材料线性化处理的, 而基于逐步积分算法的动力时程法分析方法可以精确模拟斜拉绝缘子的非线性材料属性。因此, 针对由大量斜拉绝缘子来加强刚度的支撑阀塔, 时程法计算得到的关键构件应力结果比反应谱法的计算结果偏

表 5 阀塔关键构件应力峰值计算结果

Tab. 5 Peak stresses of key components of converter valve tower

部件	反应谱法/MPa	人工波/MPa	Elcentro 波/MPa	Taft 波/MPa	容许应力/MPa	安全系数	是否满足强度要求
	X+Y+Z	X+Y+Z	X+Y+Z	X+Y+Z			
均压环	7. 4	4. 09	4. 25	3. 66	240	56. 6	是
阀支架铝梁	47. 28	62	63. 97	62. 08	240	3. 45	是
组件绝缘梁和塔间连接件	49. 05	85. 12	82. 78	67. 7	200	2. 33	是
铁法兰	60. 36	94. 72	101. 2	83. 01	235	2. 47	是
铝法兰	51. 09	101. 8	98. 27	77. 91	240	3. 13	是
支柱绝缘子	58. 48	72. 06	75. 48	61. 9	250	3. 3	是
斜拉绝缘子	153. 41	253. 10	234. 09	217. 38	550	2. 24	是

注: 斜拉绝缘子的计算应力是根据计算轴力除以截面积得到的。

大。实际工程中为确保阀塔抗震计算分析的可靠性,在反应谱法计算分析的基础上,有必要采用非线性时程分析法开展进一步的抗震安全校核。

3 结论

本文利用有限元数值仿真技术对柔性直流换流阀结构进行抗震安全分析,主要结论如下。

1)增设斜拉杆绝缘子尤其是底部斜拉绝缘子明显提高了阀塔整体结构频率,这说明斜拉绝缘子的存在能显著增强换流阀整体结构的刚度。

2)斜拉绝缘子预拉力的大小对于支撑式柔性阀塔整体结构的频率影响不大。

3)对于带斜拉绝缘子的支撑式阀塔结构,时程法计算得到的位移和应力等结果普遍大于反应谱法的计算结果,因此建议选取两种方法计算结果的较大值作为安全评价的依据。

4)时程法能够精确模拟斜拉绝缘子可拉不可压的非线性特性,因此对于带斜拉绝缘子或其他拉杆装置的支柱类电气设备,建议采用非线性时程法进行抗震安全分析。

参考文献

- [1] LARDER R A, GALLAGHER R P, NILSSON B. Innovative seismic design aspects of the intermountain power project converter stations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(3): 1708 - 1714.
- [2] YANG Z, XIE Q, ZHOU Y, et al. Seismic performance and restraint system of suspended 800 kV thyristor valve [J]. Engineering Structures, 2018(169): 179 - 187.
- [3] 王彦峰,李峰,余梦泽,等.基于 6.5 kV 压接式功率器件的 MMC 柔性直流功率模块设计和验证[J].南方电网技术, 2025, 19(12): 63 - 74.
WANG Yanfeng, LI Feng, YU Mengze, et al. Design and validation of MMC VSC-HVDC power modules based on 6.5 kV press-pack power devices [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(12): 63 - 74.
- [4] ZHANG L, JIN X, LÜ W, et al. Research on seismic analysis of converter valve of offshore flexible high voltage direct current considering the effect of initial displacement [J]. E3S Web of Conferences, 2021, 252(5): 01037.1 - 01037.5.
- [5] 马志荣,姜彦涛,孙小平,等.海上柔直换流阀塔运行期间的振动性能研究[J].高压电器, 2022, 58(3): 140 - 147.
MA Zhirong, LOU Yantao, SUN Xiaoping, et al. Study on vibration performance of offshore flexible direct current converter valve tower during operation [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 140 - 147.
- [6] 吴嘉欣.地震作用下带电力设备大型换流站阀厅结构抗倒塌性能研究[D].广州:广州大学, 2013.
- [7] 魏文晖,张迪,喻梦,等.带悬吊质量结构的多维地震反应[J].哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(4): 98 - 104.
- WEI Wenhui, ZHANG Di, YU Meng, et al. Seismic response of structure with suspended mass [J]. Journal of HARBIN Institute of Technology, 2014, 46(4): 98 - 104.
- [8] 张伟为,于海波,高彪,等.特高压悬吊换流阀地震模拟振动台实验研究[J].高压电器, 2022, 58(8): 142 - 149.
ZHANG Weiwei, YU Haibo, GAO Biao, et al. Experimental research on shaking table for seismic simulation of UHV DC suspended converter valves [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 142 - 149.
- [9] NAKAGAKI S, UCHIDA T, KOYAMA M, et al. Studies on aseismic measure for multistage thyristor valves [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(4): 1819 - 1824.
- [10] NAKAJIMA F, YAMAZAKI T, LTOH K, et al. Design and type test of a light-triggered thyristor valve for back-to-back systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(1): 31 - 37.
- [11] 高彪,张伟为,于海波,等.支撑式换流阀塔的抗地震设计[J].机械设计与制造工程, 2018, 47(11): 35 - 39.
GAO Biao, ZHANG Weiwei, YU Haibo, et al. Anti seismic design of a supported converter valve tower [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2018, 47(11): 35 - 39.
- [12] LI Q, WANG D, LEI M, et al. Seismic response analysis of interlayer-hinged suspended converter valve towers [C]//2023 International Conference on Power System Technology (PowerCon), September 21 - 22, 2023, Jinan, China. New York: IEEE, 2023: 1 - 7.
- [13] WANG Z, LIU S. Application of FEA to analyse the seismic response of converter valve tower [C]//The 37th Annual Conference on Power System and Automation in Chinese Universities (CUS-EPSCA), April 25, 2023, Singapore. Singapore: Springer, 2023: 538 - 546.
- [14] SUN Z, YU Y, WANG H, et al. Dynamic response analysis of offshore converter station based on vector form intrinsic finite element (VFIFE) method [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(6): 1 - 21.
- [15] 于海波,刘彬.有限元分析在特高压换流阀塔结构抗震设计中的应用[J].高压电器, 2016, 52(8): 184 - 188.
YU Haibo, LIU Bin. Application of FEA to seismic design of UHV converter valve tower structure [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8): 184 - 188.
- [16] 吴小峰,孙启国.特高压悬吊换流阀塔抗震分析[J].世界地震工程, 2011, 27(2): 207 - 210.
WU Xiaofeng, SUN Qiguo. Seismic analysis of an UHV suspended converter valve tower [J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(2): 207 - 210.
- [17] 黄明铎.悬吊式换流阀塔阻尼比计算及抗震分析方法研究[D].北京:北方工业大学, 2021.
- [18] 徐俊鑫,谢强,杨振宇,等.±800 kV 特高压换流阀塔-厅整体抗震性能分析[J].高压电器, 2020, 56(1): 96 - 103.
XU Junxin, XIE Qiang, YANG Zhenyu, et al. Seismic performance analysis of ±800 kV UHVDC converter valve-hall system [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 96 - 103.
- [19] 朱新华,张承,谢云龙,等.柔性直流输电换流阀抗震性能研究[J].中国电机(技术版), 2014(8): 19 - 22.
ZHU Xinhua, ZHANG Cheng, XIE Yunlong, et al. Research on anti-seismic performance of IGBT valves of flexible HVDC [J]. China Electric Power (Technology Edition), 2014(8): 19 - 22.

- [20] 涂明晖. 支撑式柔性直流换流阀塔参数识别与隔震性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2022.
- [21] 章银龙, 施延龄, 游焕洋, 等. 拉杆复合绝缘子 FKL- $\pm 420/40SS$ [Z]. 绍兴:浙江金凤凰电力科技有限公司, 2019-06-16.
- [22] 张其浩, 杨亚弟, 苏文藻, 等. 绝缘子拉杆式电气设备的抗震分析[J]. 世界地震工程, 1989(2): 30-38.
ZHANG Qihao, YANG Yadi, SU Wenzao, et al. Seismic analysis of insulator tie-type electrical equipment[J]. World Earthquake Engineering, 1989(2): 30-38.
- [23] 何畅, 谢强, 杨振宇, 等. ± 800 kV 特高压直流滤波电容器抗震性能分析[J]. 南方电网技术, 2017, 11(5): 9-16, 23.
HE Chang, XIE Qiang, YANG Zhenyu, et al. Analysis on seismic performance of ± 800 kV UHVDC filter capacitor[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(5): 9-16, 23.
- [24] 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. Analysis on the load behavior of a DC filter capacitor with prestressing force[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 151-156.
- [25] 张若愚, 曹枚根, 毛宇, 等. 增设拉线对特高压直流复合避雷器地震响应的影响分析[J]. 南方电网技术, 2020, 14(4): 31-38.
ZHANG Ruoyu, CAO Meigen, MAO Yu, et al. Analysis of the effect of additional tie lines on the seismic response of extra-high voltage DC composite surge arresters[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(4): 31-38.
- [26] 袁威. 不同弹拨力度下琵琶琴弦振动特性及声学品质的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022.
- [27] 尹越, 冯涛, 郑力. 预应力钢结构自振特性研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(S1): 169-174.
YIN Yue, FENG Tao, ZHENG Li. Study on self-vibration characteristics of prestressed steel structures[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2017, 50(S1): 169-174.
- [28] 王储, 黄呈伟, 宋欣蕾, 等. 拉索-铝合金网架的自振频率分析[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(1): 73-75.
WANG Chu, HUANG Chengwei, SONG Xinlei, et al. Self-oscillation frequency analysis of cable-aluminum alloy mesh frame[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2016, 38(1): 73-75.
- [29] 刘正权, 刘海波, 董人文. 点支式玻璃幕墙张拉索杆支承体系自振特性参数分析[J]. 建筑结构, 2008(10): 114-116.
LIU Zhengquan, LIU Haibo, DONG Renwen. Natural frequencies parameters analysis on tension cable-strut supporting system of point supported glass curtain walls[J]. Building Structure, 2008(10): 114-116.
- [30] 王飞, 李红明, 唐柏鉴, 等. 单折线体外索对简支钢梁自振频率的影响[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2020, 34(1): 105-110.
WANG Fei, LI Hongming, TANG Baijian, et al. Influence of single folded extracorporeal cables on the self-oscillation frequency of simply supported steel beams[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 34(1): 105-110.
- [31] ZHANG L, XIAO J, ZENG D, et al. The influence of nonlinear characteristics of diagonal rod insulators on the seismic performance of converter valve [C]//2023 9th international conference on architectural, civil and hydraulic engineering, December 10, 2024, Singapore. Singapore: Springer, 2024: 281-290.
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [33] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 电力设施抗震设计规范: GB 50260—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.

收稿日期: 2024-04-30; 网络首发日期: 2024-07-31

作者简介:

任成林(1971), 男, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为柔性直流输电和高压直流输电;

鲁翔(1985), 男, 高级工程师, 学士, 研究方向为高压直流输电;

毕良富(1976), 男, 通信作者, 高级工程师, 学士, 研究方向为特高压柔直换流阀结构设计工作, 8153802@163.com。