

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.025

海上柔直换流阀塔运行期间的疲劳特性研究

高旭¹, 任军辉¹, 娄彦涛^{1,2}, 孙小平^{1,3}, 马志荣¹, 赵朝伟¹, 郑全旭¹

(1. 西安西电电力系统有限公司, 西安 710075; 2. 清华大学, 北京 100084; 3. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 换流阀是海上柔直的核心设备。为研究支撑式海上换流阀塔运行期间的疲劳特性,依据某工程中的海上柔直换流阀建立有限元模型,通过等效损伤和荷载效应分析,研究了换流阀塔的疲劳特性和在环境荷载作用下的疲劳损伤。结合疲劳分析理论,进行了换流阀塔等效损伤值与荷载效应比分析。结果表明,换流阀各部位在服役年限下有较大安全裕度,换流阀塔疲劳寿命满足25年服役年限要求。

关键词: 海上柔直换流阀塔; 有限元; 疲劳; 等效损伤; 荷载效应; 寿命

Study on Fatigue Characteristics of Offshore VSC-HVDC Converter Valve Tower in Operation

GAO Xu¹, REN Junhui¹, LOU Yantao^{1,2}, SUN Xiaoping^{1,3}, MA Zhirong¹,
ZHAO Chaowei¹, ZHENG Quanxu¹

(1. Xi'an XD Power Systems Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Converter valve is the core equipment of offshore VSC-HVDC system. For studying the fatigue characteristics of a supported offshore converter valve tower in operation, a finite element model is set up based on an offshore VSC-HVDC converter valve in a project. The fatigue characteristics and fatigue damage under environmental load are studied through equivalent damage and load effect analysis. According to the fatigue analysis theory, the equivalent damage value and load effect ratio of the converter valve tower are analyzed. The results show that each part of the converter valve tower has a large safety margin under the service life, and the fatigue life of the converter valve tower meets the 25 years service life requirement.

Key words: offshore VSC-HVDC converter valve tower; finite element; fatigue; equivalent damage; load effect; life

0 引言

根据国外风电的发展经验,海上风电将是中国今后风电发展的方向和趋势。随着风电场向远海发展,目前的交流并网方式,很难满足风电场的发展需要。因此,迫切需要采用更加灵活、经济、环保、安全的输电方式解决以上问题。

柔性直流输电在提高电力系统稳定性,改善电能质量,解决非线性负荷、冲击性负荷对系统的影响,实现远距离输电,保证敏感设备供电等方面都具有较强的技术优势,适宜在海上平台应用。采用

柔性直流输电技术可以将海上风电场与陆地电网相连接,实现海上风电的远距离并网^[1]。

换流阀是海上柔直的核心设备,处于海洋环境中的换流阀,长期受到随机风、波、流以及工作载荷的作用,特别是波浪载荷是一种变化的载荷,在交变载荷作用下,结构材料内将产生随时间变化的应力,材料抵抗这种交变应力的能力将随着应变波动次数的累加而降低,就会产生疲劳损伤。因此,在换流阀的设计阶段,有必要对设计的换流阀进行疲劳分析,近似估算换流阀的疲劳寿命进而检验设计是否满足使用年限的要求。

近年来,随着海上风电的不断发展,不少学者开展了直流输电设备运行寿命的研究。姜彦涛等基于加速寿命试验理论,搭建了高海拔地区的晶闸管寿命实验舱,建立了高海拔地区电压应力下晶闸管的失效率模型^[2];应晓亮提出了基于TCP (temperature compensation point)在线监测IGBT模块中FRD(fast recovery diode)键合线老化状态的方法,搭建了MMC换流阀IGBT模块在线监测系统^[3];赵莉华等建立了变压器阀侧套管的有限元模型,分析了振动载荷特征与套管根部结构对法兰疲劳寿命的影响^[4];周传昆等采用热氧加速老化试验方法,探索了换流阀冷却管路用FEP材料的力学性能与老化时间的关系^[5];梁宇等提出了换流阀用晶闸管加速试验方法,形成了晶闸管加速试验方案^[6];周晨等提出了多频率点等效温升试验方法,评估了换流阀阻尼电容器实际运行时内部的温度及热阻,分析了寿命影响因子,评估了试品阻尼电容器的预期寿命^[7];金恩淑等在已有可靠性研究的基础上,考虑了寿命损耗的影响,提出了一种基于两参数威布尔分布的MMC可靠性模型^[8];张宇娇等以柔性直流输电换流阀中IGBT模块为研究对象,利用基于应变的疲劳寿命模型,对IGBT焊料层进行了寿命预测^[9];雷朝煜等通过研究换流阀阻容电容器老化机理,提出了换流阀阻尼电容器加速老化试验方案,估算了试品在实际使用应力下的预期使用寿命^[10];张斌等以机组损伤维护最频繁的传动系统为研究对象,分析了机组运行工况与其结构损伤等效载荷的耦合关系,构建了基于深度神经网络的疲劳损伤数据拟合方法^[11];李玉曦等设计了750 kV输电工程复合材料杆塔复合横担及其杆件动载下的疲劳试验,研究了不同工况下复合横担高周疲劳试验及低周疲劳试验的现象^[12];豆龙江等提出一种基于振动信号的高压断路器弹簧疲劳程度检测方法,为高压断路器弹簧疲劳程度在线检测提供了一种新的思路^[13];董华军等建立了VS₁型真空断路器操动机构动力学仿真模型,预测了触头结构疲劳寿命危险区域,通过优化支撑盘结构,提高了触头结构疲劳寿命^[14];张军等从热特性角度阐述了IGBT模块的寿命评估方法,总结了现有研究存在的难点,并对IGBT模块的寿命评估研究

发展方向进行了展望^[15];刘军等研究了风电机组健康状态评价方法,分析了已有方法的优缺点,提出了未来可研究的要点^[16];常桂钦等基于电—热—力耦合分析方法,建立了功率循环试验的有限元仿真模型,并进行了两种常见IGBT模块相同条件下的功率循环试验^[17];宋戈等开展了大载荷碟簧静强度计算和工作应力仿真分析,验证了晶闸管压接用大载荷碟簧长期工作的可靠性^[18];曾鹏等使用不同方法对某电厂3台发电机定子绕组的绝缘状态进行了测试,结果表明D图像法和老化综合预测法的预测结果相近^[19];郑嘉龙等总结和梳理了全生命周期成本技术在国内电力系统的研究进展,指出了未来的研究趋势^[20];陈祥提出了一种变电站的全生命周期成本(LCC)估算模型,并通过一个35 kV变电站的主变选型经济性对比,验证了估算模型在变电站建设成本分析中的有效性^[21];何志鹏构建了一种微型断路器电寿命评估模型,可以用于微型断路器电寿命的评估^[22];范利明分析了油浸式电力变压器纸绝缘老化的主要影响因素,对3种不同厚度的纸绝缘老化特性进行了试验分析^[23];王爽等分析了316L不锈钢循环水泵内护管断裂的原因^[24];张仁奇等建立了接续管受压接残余应力影响下的微风振动与疲劳寿命数学模型,并对该数学模型对应的物理模型进行了仿真分析^[25];孙忠慧等对±500 kV直流送电线路耐张线夹引流板断裂进行了损伤机理分析,提出了改进方案^[26]。

上述研究多集中于单独部件的寿命研究,缺少对于海上支撑式换流阀塔运行疲劳特性的研究,以及对换流阀长期运行累积损伤的分析。

为深入研究海上柔直换流阀塔长期运行的疲劳特性,文中针对某典型的±400 kV/1 100 MW海上柔直换流阀塔建立了有限元模型,分析了海上换流阀在环境载荷作用下的疲劳损伤,为海上柔直换流阀塔的设计提供参考。

1 有限元模型建立

1.1 结构基本参数

所研究对象为某典型的±400 kV/1 100 MW海上柔直换流阀塔,阀塔尺寸9.00 m(长)×4.38 m(宽)×12.52 m(高),重约75 t。阀塔结构为支撑式,主

体结构主要由底部支柱绝缘子、层间支柱绝缘子、底部拉杆绝缘子、阀段组件等部件组成。阀塔结构主体分为左右两个部分,两部分之间通过4根双分裂连接绝缘子连接。阀塔整体分为4层,每层包括6个阀段,每个阀段包含6个功率模块,单个模块重量约为340 kg,其中模块功率部分为100 kg,电容部分为240 kg。阀段框架由两侧钢梁与中间绝缘横梁组合而成,相邻的底部支柱绝缘子之间通过拉杆绝缘子连接成一个整体,拉杆绝缘子上的预紧力为75 kN。各部位具体尺寸如下:换流阀长度方向包括3个阀段,单个阀段长度为3.00 m,宽度为1.645 m,阀塔两个分裂之间的间距为1.09 m,通过双分裂绝缘子连接成整体;底部支柱绝缘子高度为5.60 m,阀塔上部层间距为1.73 m,阀塔结构简图见图1。阀塔各部位材料的力学性能见表1。

依据 Miner 线性累积损伤理论来研究换流阀的疲劳特性,并通过等效损伤来具体描述。一种材料的疲劳强度可以用 S-N 曲线表示为

$$N=\left(\frac{S_0}{S}\right)^{m'}$$

(1)

式(1)中:S为对应的荷载;N为在荷载S作用下的循环次数;S₀为对应的常数;m'为S-N曲线斜率参数。

各部位疲劳参数见表2。

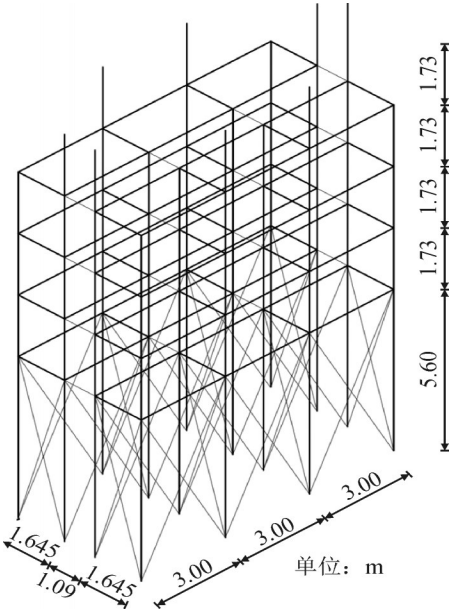


图1 阀塔结构简图

Fig. 1 Structure diagram of the converter valve

表1 阀塔主要部件材料参数

Table 1 Main material properties of the converter valve

材料参数	层间/底部 支柱绝缘子	拉杆绝 缘子	双分裂 绝缘子	绝缘工 字梁	钢梁
弹性模量/GPa	14	20	21	21	210
泊松比	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
密度/(kg·m ⁻³)	2 000	2 160	2 000	1 950	7 850
许用应力/MPa	155	720	210	100	210

表2 阀塔主要部件疲劳参数

Table 2 Fatigue parameters of main components of converter valve

存活 率/%	双分裂绝缘子		底部/层间支柱绝缘子		钢梁		绝缘工字梁		支撑模块的梁		底部拉杆绝缘子	
	m'	S ₀ /MPa	m'	S ₀ /MPa	m'	S ₀ /MPa	m'	S ₀ /MPa	m'	S ₀ /MPa	m'	S ₀ /MPa
50.0	7.438	1 103.24	10.160	1 336.54	7.438	1 103.24	10.160	1 336.54	10.160	1 336.54	10.160	1 336.54
90.0	6.965	1 214.60	9.580	1 541.31	6.965	1 214.60	9.580	1 541.31	9.580	1 541.31	9.580	1 541.31
95.0	6.831	1 251.22	9.420	1 610.66	6.831	1 251.22	9.420	1 610.66	9.420	1 610.66	9.420	1 610.66
99.0	6.580	1 327.05	9.170	1 720.08	6.580	1 327.05	9.170	1 720.08	9.170	1 720.08	9.170	1 720.08
99.8	6.298	1 420.28	8.990	1 643.59	6.298	1 420.28	8.990	1 643.59	8.990	1 643.59	8.990	1 643.59

1.2 有限元建模

在 Ansys 中建立换流阀阀塔的有限元模型,整个阀塔结构有限元模型共划分了54 112个各类单元,共有45 984个节点。其中,功率模块(子模块)用壳单元模拟,其他单元均用梁单元模拟。建立的换流阀阀塔有限元模型见图2。

1.3 计算工况及荷载

海波浪、海风和海流是作用于海洋平台上的主

要荷载,由于风和海流对平台结构疲劳损伤影响相对较小,一般忽略不计。文中主要考虑波浪荷载对换流阀疲劳寿命的影响。

在随机波浪作用下分析换流阀的动力响应,需要根据工程的要求和所在海域情况选用相应的波浪谱。文圣常谱是利用中国近海4个海域:渤海、东海、黄海和南海等观测资料得到的典型波浪谱,文中分析用到的波浪谱采用文圣常谱。

用有效波要素表示的浅水风浪频谱见式(2)–(3), 深水风浪频谱见式(4)–(5):

$$S(f) = 0.068 7 H_s^2 T_s P \exp \left[-95 \times \ln \frac{P(5.813 - 5.137 H^*)}{(6.77 - 1.088 P + 0.013 P^2)(1.307 - 1.426 H^*)} (1.1 T_s f - 1)^{12/5} \right] \quad 0 \leq f \leq 1.05/T_s \quad (2)$$

$$S(f) = 0.068 7 H_s^2 T_s \frac{(6.77 - 1.088 P + 0.013 P^2)(1.307 - 1.426 H^*)}{5.813 - 5.137 H^*} \left(\frac{1.05}{T_s f} \right)^{(4-2H^*)} \quad f > 1.05/T_s \quad (3)$$

$$S(f) = 0.068 7 H_s^2 T_s P \exp \left[-95 \ln \frac{P}{1.522 - 0.245 P + 0.002 92 P^2} (1.1 T_s f - 1)^{12/5} \right] \quad 0 \leq f \leq 1.05/T_s \quad (4)$$

$$S(f) = 0.082 4 \left(H_s^2 / T_s^3 \right) (1.522 - 0.245 P + 0.002 92 P^2) / f^4 \quad f > 1.05/T_s \quad (5)$$

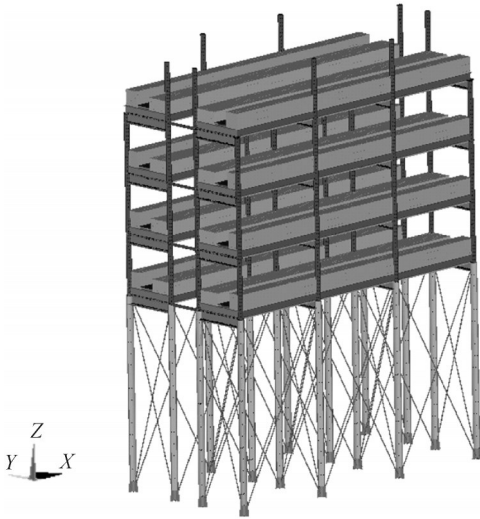


图2 换流阀塔整体有限元模型

Fig. 2 The finite element model of the converter valve

式(2)–(5)中: H_s 为有效波高; T_s 为有效波周期; P 为尖度因子。 $P = 95.3 H_s^{1.35} / T_s^{2.7}$, $H^* = 0.626 H_s / d$ (d 为水深), 依据海域基本资料查得有效波高为 0.8 m, 有效波周期为 3.6 s, 水深为 17 m。因此得到的文圣常谱见图 3。

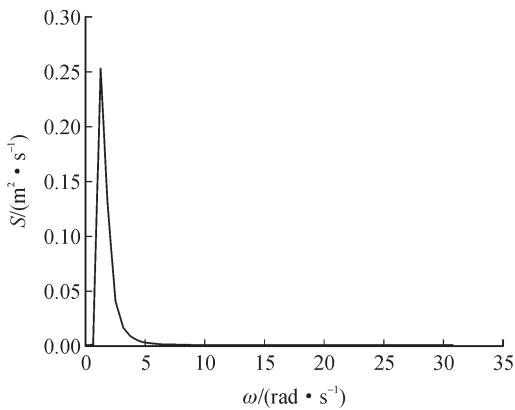


图3 文圣常波浪谱

Fig. 3 The Wen Shengchang wave spectrum

波浪对换流阀的影响直接表现在对其下部海洋平台的影响。在随机波浪中平台结构的主要位

移是沿波浪传播方向的水平位移,在一定精度范围内,可把波浪激振力引起的平台结构上部甲板的动水平位移 U 计算模型,简化为单自由度结构系统。

对于单自由度结构系统,波力谱密度 $S_F(\omega)$ 与甲板水平位移谱之间的关系为

$$S_U(\omega) = |H(\omega)|^2 S_F(\omega) \quad (6)$$

波力谱 $S_F(\omega)$ 计算式为

$$S_F(\omega) = S_{kd}(\omega) + S_{Fi}(\omega) \quad (7)$$

若忽略不计结构在水中振动的速度和加速度,则拖拽力谱 $S_{Fd}(\omega)$ 为

$$S_{Fd}(\omega) = \left(\frac{1}{2} C_d \rho D \sqrt{\frac{8}{\pi}} \frac{\omega}{\text{sh } kd} \int_0^d \sigma_u \text{ch } kz \text{d}z \right)^2 S_\eta(\omega) \quad (8)$$

惯性波力谱 $S_{Fi}(\omega)$ 为

$$S_{Fi}(\omega) = \left(C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\omega^2}{k} \right)^2 S_\eta(\omega) \quad (9)$$

式(8)、(9)中, $S_\eta(\omega)$ 为波浪谱; D 为计算波力等效直径; C_d 为拖拽力系数; C_m 为惯性力系数; d 为水深; ρ 为海水密度; σ_u^2 为高度 z 处波浪水质点水平速度 u 的方差,即

$$\begin{cases} \sigma_u^2 = \int_0^\pi \left(\omega \frac{\text{ch } kz}{\text{sh } kd} \right)^2 S_\eta(\omega) \text{d}\omega \\ \sigma_u^2 = \int_0^\infty \left(\omega \frac{\text{ch } kz}{\text{sh } kd} \right)^2 S_\eta(\omega) \text{d}\omega \end{cases} \quad (10)$$

$$k = \frac{\omega^2}{g \text{th } kd} \quad (11)$$

结构位移的频率响应函数 $|H(\omega)|^2$ 计算式为

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{M^2 \omega_r^4 \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right)^2 + 4\xi \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^2 \right]} \quad (12)$$

式(12)中: M 为平台结构等效质量, 其包括甲板和设备质量、导管架型支承结构质量以及结构在水中振动引起的附连水质量; ξ 为阻尼比(取 0.05); ω_r 为平台结构的自振频率。

计算中用到的基础数据见表 3。

表 3 波浪计算基础数据

Table 3 Basic data of wave calculation

参数	数值
有效波高 H_s/m	0.8
有效波周期 T_s/s	3.6
水深 d/m	17
计算波力单根直径 D (共 4 根)/m	4.0
拖拽力系数 C_d	1.0
惯性力系数 C_m	2.0
海水密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	1 025
平台结构等效质量 M/kg	1.97×10^7
阻尼比 ξ	0.05
平台结构自振频率 $\omega_r/(rad \cdot s^{-1})$	4.40

依据上述理论得到平台的位移功率谱后, 根据其加速度功率谱的关系, 可以得到平台的加速度功率谱, 最后依据谐波叠加法可以模拟出波浪间接性导致的换流阀遭受的加速度时程, 计算中先模拟 10 s 的加速度时程, 在此基础上结合换流阀的设计使用年限进行疲劳寿命估计。10 s 加速度时程见图 4。

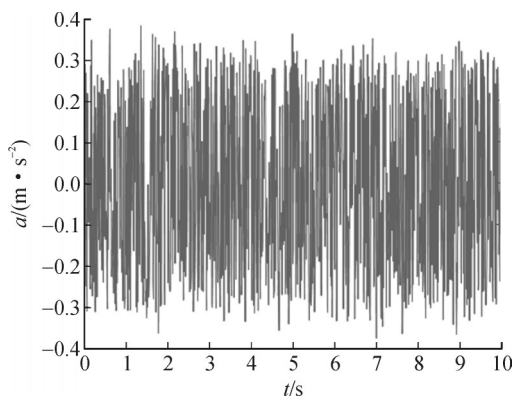


图 4 换流阀底部输入的 10 s 加速度时程

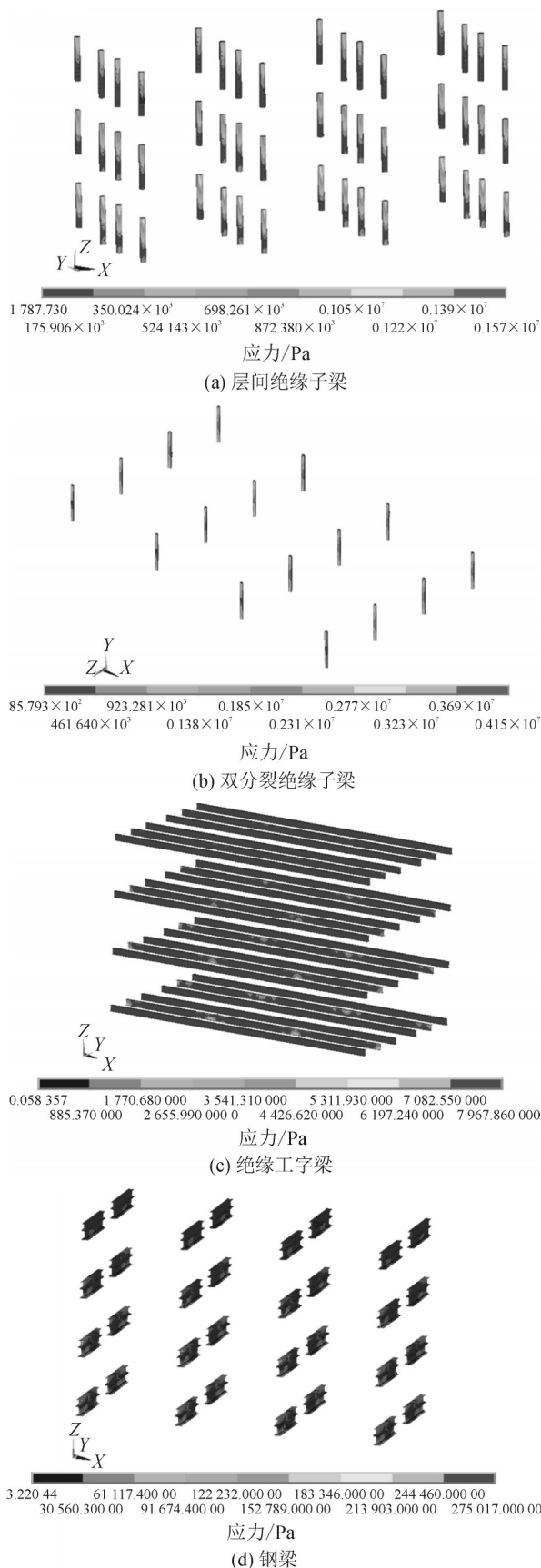
Fig. 4 The 10 s acceleration time history curve input at the bottom of the converter valve

2 计算结果分析

2.1 确定疲劳分析部位

依据海洋平台自振频率为 4.40 rad/s 的荷载工况。该工况下, 换流阀所受 10 s 加速度时程依据海洋平台自振频率为 4.40 rad/s 的位移功率谱得到。对于换流阀结构, 由于其各部分的材料组成不同, 需要找出各个部位中最容易发生疲劳破坏的点作

为疲劳分析点。在上述 10 s 加速度时程作用下, 通过 Ansys 可以求出换流阀各部位在时间历程中的应力包络图, 进而选取应力最大的位置作为疲劳分析点。各部位最大应力分布状况见图 5。



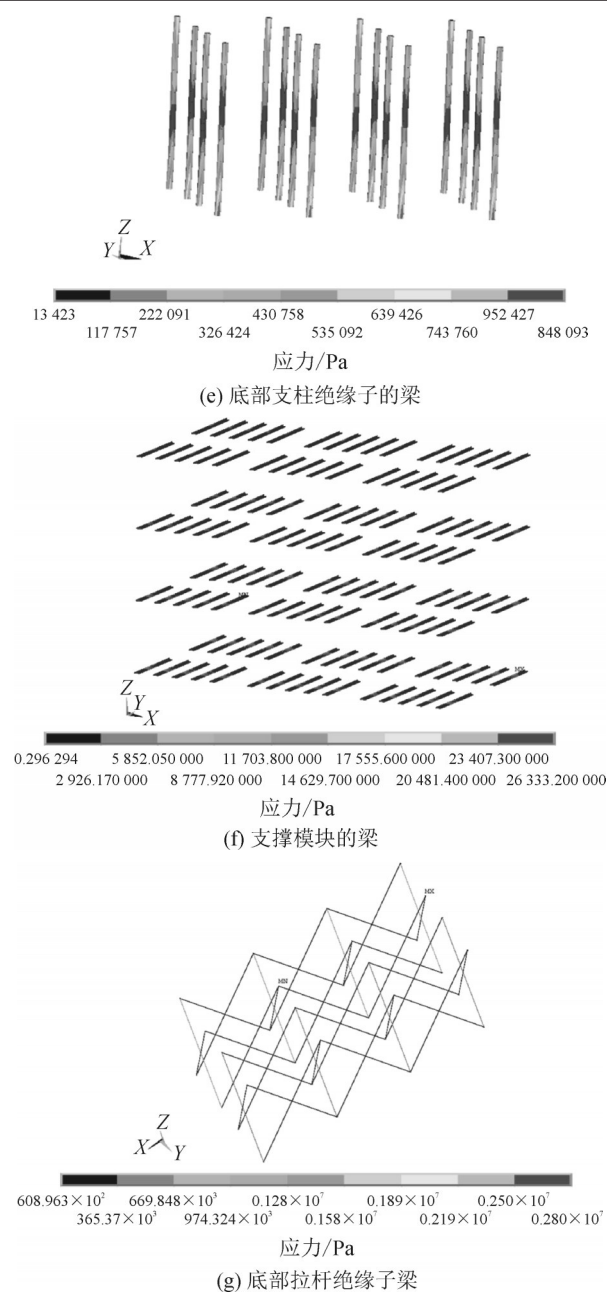


图5 各部位最大应力分布图

Fig. 5 The normal stress of bottom tie rod insulators

从图5可以看出,换流阀各部位的最大应力分布的位置。通过Ansys对各部位细化可以更进一步确定最大应力在各部位的具体分布部位,详细分布见表4。

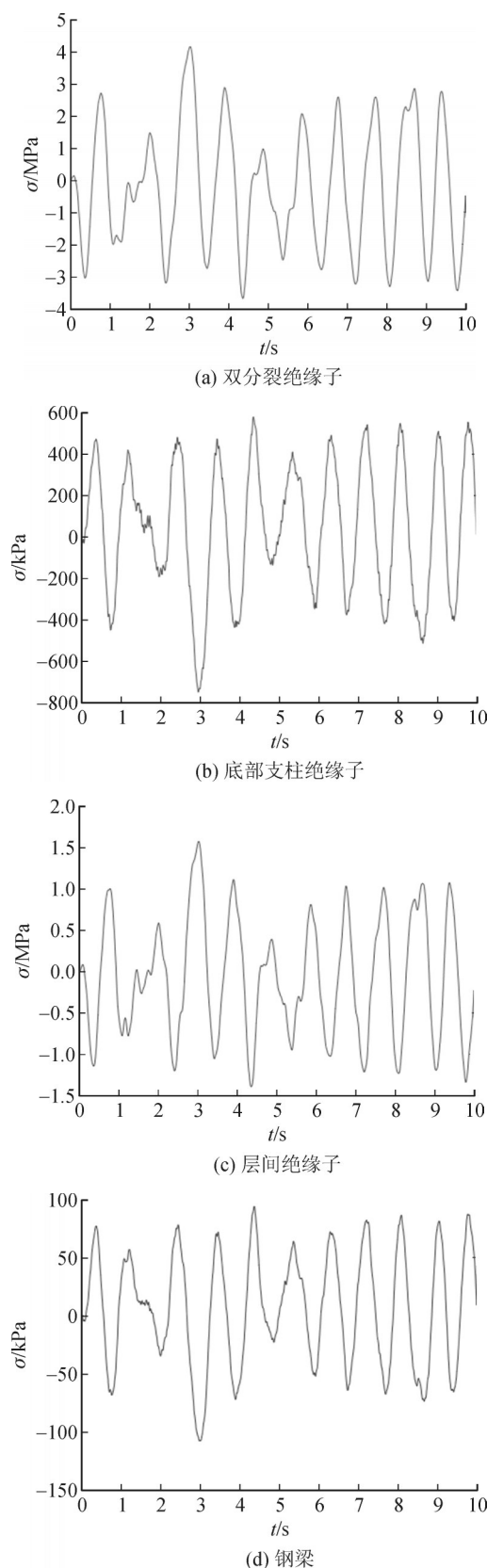
表4 换流阀各部位的疲劳分析点位置

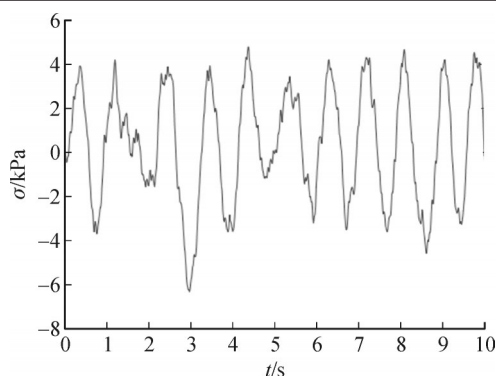
Table 4 The fatigue analysis point position of each part of the converter valve

部位名称	对应单元编号	节点编号
双分裂绝缘子	53085	289
底部支柱绝缘子	52984	172
层间绝缘子	53215	434
钢梁	54177	49356
绝缘工字梁	55113	50097
支撑模块的梁	58666	52796
底部拉杆绝缘子	155406	18

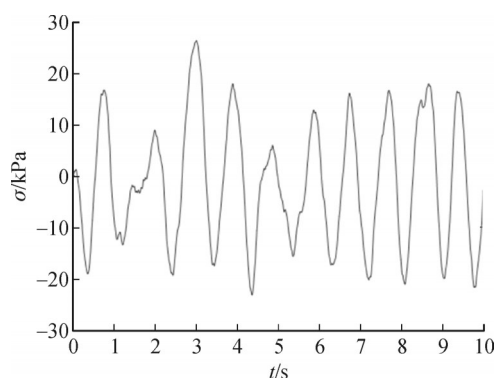
2.2 各部位疲劳分析

依据上节确定该工况下换流阀各部位疲劳的具体位置,对已确定的最容易发生疲劳破坏的点进行应力时程提取,并进行疲劳分析。换流阀各部位最容易发生疲劳的点的应力时程曲线见图6。

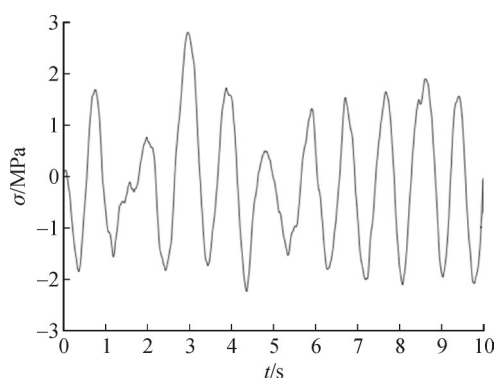




(e) 绝缘工字梁



(f) 支撑模块的梁



(g) 底部拉杆绝缘子

图6 换流阀各部位最容易发生疲劳的点的应力时程曲线

Fig. 6 The stress time history curve of fatigue analysis point of bottom tie rod insulator

Miner线性累积损伤理论是目前工程设计中广泛使用的疲劳损伤理论。该理论认为:一个指定的应力水平所消耗的疲劳寿命是该应力水平作用的循环次数与该应力水平作用到破坏所允许的次数比,并把该比值称为“损伤比”;如果几个不同的应力水平施加到一个结构细节上,各应力对应损伤比之和就是消耗掉的疲劳寿命部分;当损伤比之和为1时,表明消耗完该结构的使用寿命。

疲劳荷载产生的等效荷载 S_e 与某一标准荷载(如设计荷载)产生的应力幅 S_c 之比为荷载效应比

$$P_i = \frac{S_e}{S_c} \quad (13)$$

式(13)中,应力幅 S_c 是指当构件或构造细节经历了 N 次(N 指构件在使用期内的所有幅值的总的次数)循环之后,依据 $S-N$ 曲线确定的达到这个次数 N 破坏的应力幅。

依据上述应力时程,利用3倍方差保守估计,结合疲劳分析理论通过MATLAB可以求解得到换流阀各部位在服役年限内的等效损伤值,见表5。同理依据前述所提的荷载效应比理论,可计算荷载效应比,见表6。

3 结论

文中对典型的 ± 400 kV/1 100 MW海上柔直换流阀塔进行分析,建立了有限元模型。通过波浪载荷分析以及谐波叠加法模拟了波浪间接性导致换流阀遭受的加速度时程,通过Ansys求出换流阀各部位在时间历程中的应力包络图,进而选取应力最大的位置作为疲劳分析点。结合疲劳分析理论,通过MATLAB求解得到换流阀各部位在服役年限内的等效损伤值和荷载效应比,主要得出以下结论:

表5 换流阀各部位等效损伤值

Table 5 The equivalent damage value of each part of the converter valve

存活率/%	等效损伤值						
	双分裂连接 绝缘子	底部支柱 绝缘子	层间绝缘子	钢梁	绝缘工字梁	支撑模 块的梁	底部拉杆 绝缘子
50.0	4.708×10^{-5}	1.731×10^{-18}	7.083×10^{-15}	6.717×10^{-17}	1.478×10^{-39}	5.692×10^{-33}	1.334×10^{-12}
90.0	1.602×10^{-4}	1.364×10^{-17}	3.528×10^{-14}	1.293×10^{-15}	1.864×10^{-37}	3.045×10^{-31}	4.858×10^{-12}
95.0	2.268×10^{-4}	2.378×10^{-17}	5.416×10^{-14}	2.992×10^{-15}	6.980×10^{-37}	8.999×10^{-31}	6.843×10^{-12}
99.0	4.356×10^{-4}	5.998×10^{-17}	1.120×10^{-13}	1.442×10^{-14}	5.816×10^{-36}	5.180×10^{-30}	1.237×10^{-11}
99.8	9.290×10^{-4}	2.747×10^{-16}	4.447×10^{-13}	8.636×10^{-14}	6.295×10^{-35}	4.296×10^{-29}	4.458×10^{-11}

表6 换流阀各部位荷载效应比

Table 6 The load effect ratio of each part of the converter valve

存活率/%	荷载效应比						
	双分裂连接 绝缘子	底部支柱 绝缘子	层间绝缘子	钢梁	绝缘工字梁	支撑模 块的梁	底部拉杆 绝缘子
50.0	0.262 0	0.017 9	0.040 5	0.006 7	0.000 2	0.000 7	0.067 8
90.0	0.285 2	0.017 4	0.039 4	0.007 3	0.000 1	0.000 7	0.065 9
95.0	0.292 8	0.017 2	0.039 1	0.007 5	0.000 1	0.000 6	0.065 3
99.0	0.308 5	0.017 0	0.038 7	0.007 9	0.000 1	0.000 6	0.064 6
99.8	0.330 1	0.018 6	0.042 3	0.008 4	0.000 2	0.000 7	0.070 6

1)等效损伤最大位置为双分裂连接绝缘子处,该位置为阀塔疲劳薄弱点。

2)阀塔结构的主要部件双分裂连接绝缘子、底部支柱绝缘子、层间绝缘子、钢梁、绝缘工字梁、支撑模块的梁、底部拉杆绝缘子等在以25年为服役期的标准下,分析波浪荷载作用下各部位疲劳损伤,各部位损伤值均小于1,各部位在服役年限下有较大安全裕度。

3)从荷载效应比角度进行评价,阀塔结构的主要部件均满足荷载效应比小于1的要求,据此可以判定换流阀各部位在服役年限下有较大安全裕度。

4)阀塔结构在服役年限内考虑疲劳损伤有较大的安全裕度,阀塔设计满足25年使用寿命要求。

参考文献:

[1] 刘卫东,李奇南,王 轩,等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J]. 中国电力, 2020, 53(7):55-71.
LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 55-71.

[2] 娄彦涛,马元社,李 强,等. 高海拔环境下高压直流输电换流阀系统中晶闸管的可靠性寿命模型研究[J]. 高压电器, 2022, 58(10):33-39.
LOU Yantao, MA Yuanshe, LI Qiang, et al. Research on reliability life model of thyristor in HVDC converter valve system at high altitude environment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10):33-39.

[3] 应晓亮. MMC换流阀IGBT模块老化在线监测方法研究[D]. 北京:华北电力大学, 2020.
YING Xiaoliang. Research on online aging monitoring method of IGBT module of MMC converter valve[D]. Beijing: North China electric power university, 2020.

[4] 赵莉华,蔡维哲,王 仲. 换流变压器阀侧套管金属法兰疲劳寿命研究[J]. 高电压技术, 2022, 48(12):4842-4851.
ZHAO Lihua, CAI Weizhe, WANG Zhong. Research on

fatigue life of metal flange of converter transformer's valve-side bushing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4842-4851.

[5] 周传昆,朱洪宇,顾 杰,等. 换流阀冷却管路用FEP塑料使用寿命评估[J]. 新技术新工艺, 2022(12):93-96.
ZHOU Chuankun, ZHU Hongyu, GU Jie, et al. Service life evaluation of FEP plastics for cooling pipelines of converter valve[J]. New Technology & New Process, 2022(12): 93-96.

[6] 梁 宁,唐金昆,刘 宇,等. 换流阀用晶闸管加速寿命试验研究[J]. 电力电子技术, 2018, 52(12):137-140.
LIANG Ning, TANG Jinkun, LIU Yu, et al. Accelerated life test of thyristor for converter valve[J]. Power Electronics Technology, 2018, 52(12):137-140.

[7] 周 晨,张 翔,刘 磊,等. 换流阀阻尼电容器等效温升试验及寿命评估[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5):149-155.
ZHOU Chen, ZHANG Xiang, LIU Lei, et al. Equivalent temperature rise test and life evaluation of converter valve damping capacitor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5):149-155.

[8] 金恩淑,邓佛良,夏国武,等. 考虑寿命损耗的模块化多电平换流器可靠性分析[J]. 东北电力大学学报, 2019, 39(6):1-7.
JIN Enshu, DENG Foliang, XIA Guowu, et al. Reliability analysis of modular multilevel converter considering life loss[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2019, 39(6):1-7.

[9] 张宇娇,范虹兴,张炫焜,等. 柔性直流输电换流阀用IGBT模块焊料层疲劳寿命研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(10):3381-3389.
ZHANG Yujiao, FAN Hongxing, ZHANG Xuankun, et al. Fatigue life analysis of IGBT module solder layer for VSC-HVDC valve[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3381-3389.

[10] 雷朝煜,熊银武,魏孟刚,等. 天广HVDC换流阀阻尼电容器加速老化试验及使用寿命研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6):94-100.
LEI Chaoyu, XIONG Yinwu, WEI Menggang, et al. Study on accelerated aging and service life of damping capacitor

- for Tianguang HVDC converter valve[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6):94-100.
- [11] 张 斌,朱春生,贾鋈崑,等.数据驱动的风电机组传动系统疲劳载荷计算与主动抑制研究[J].智慧电力,2023, 51(1):24-30.
ZHANG Bin, ZHU Chunsheng, JIA Hongwai, et al. Fatigue load calculation and active suppression of wind turbine transmission system based on data-driven method[J]. Smart Power, 2023, 51(1):24-30.
- [12] 李玉曦,赵胜利,朱岸明,等.750 kV输电线路复合横担动载下的疲劳性能研究[J].智慧电力,2017,45(12):46-49.
LI Yuxi, ZHAO Shengli, ZHU Anming, et al. Study on fatigue property under dynamic load of composite cross-arm in 750 kV AC transmission line[J]. Smart Power, 2017, 45(12):46-49.
- [13] 豆龙江,何玉灵,万书亭,等.基于振动信号的高压断路器弹簧疲劳程度检测方法[J].电工技术学报,2022,37(24):6420-6430.
DOU Longjiang, HE Yuling, WAN Shuting, et al. Detecting method of high voltage circuit breaker spring fatigue based on vibration signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(24):6420-6430.
- [14] 董华军,李东恒,钟建英,等.12 kV真空灭弧室触头合闸冲击下疲劳寿命研究[J].电工技术学报,2022,37(15):3981-3988.
DONG Huajun, LI Dongheng, ZHONG Jianying, et al. Research on fatigue life of contact in 12 kV vacuum interrupter under shocking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15):3981-3988.
- [15] 张 军,张 犁,成 瑜.IGBT模块寿命评估研究综述[J].电工技术学报,2021,36(12):2560-2575.
ZHANG Jun, ZHANG Li, CHENG Yu. Review of the lifetime evaluation for the IGBT module[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12):2560-2575.
- [16] 刘 军,安柏任,张维博,等.大型风力发电机组健康状态评价综述[J].电力系统保护与控制,2023,51(1):176-187.
LIU Jun, AN Bairan, ZHANG Weibo, et al. Review of health status evaluation of large wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1):176-187.
- [17] 常桂钦,罗海辉,方 超,等.散热底板对IGBT模块功率循环老化寿命的影响[J].电工技术学报,2024,39(8):2485-2495.
CHANG Guiqin, LUO Haihui, FANG Chao, et al. Influence of heat dissipation baseplate on power cycling lifetime of IGBT modules[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8):2485-2495.
- [18] 宋 戈,姚 宁,杨懿功,等.晶闸管压接用大载荷碟簧应力松弛可靠性研究[J].电工技术,2023(07):175-178.
SONG Ge, YAO Ning, YANG Yigong, et al. Research on stress relaxation reliability of disc spring with large load for thyristor crimping[J]. Electric Engineering, 2023(7):175-178.
- [19] 曾 鹏,张 靖,高宗宝,等.水轮发电机定子绕组绝缘诊断及寿命评估研究[J].电工技术,2023(5):221-224.
ZENG Peng, ZHANG Jing, GAO Zongbao, et al. Research on insulation diagnosis and life evaluation of hydro generator stator winding[J]. Electric Engineering, 2023(5):221-224.
- [20] 郑嘉龙,陈 静,赵丽华,等.全生命周期成本技术在国内电力系统的研究进展[J].电工技术,2022(5):37-41.
ZHENG Jialong, CHEN Jing, ZHAO Lihua, et al. Research progress of life cycle cost technology in domestic power system[J]. Electric Engineering, 2022(5):37-41.
- [21] 陈 祥.基于全生命周期成本的变电站主设备选型分析[J].电工技术,2022(4):161-163.
CHEN Xiang. Selection analysis of substation main equipment based on life cycle cost[J]. Electric Engineering, 2022(4):161-163.
- [22] 何志鹏,赵 虎.微型断路器电寿命评估[J].电工技术学报,2022,37(4):1031-1040.
HE Zhipeng, ZHAO Hu. Electrical lifespan evaluation of miniature circuit breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4):1031-1040.
- [23] 范利明,杨陆卫.油浸式电力变压器纸绝缘老化特性试验分析[J].电工技术,2021(15):149-150,153.
FAN Liming, YANG Luwei. Experimental analysis of aging characteristics of paper insulation of oil immersed power transformer[J]. Electric Engineering, 2021(15):149-150.
- [24] 王 爽,白汉宽,刘海生.316L不锈钢循环水泵内护管断裂原因分析[J].电工技术,2023(21):170-172.
WANG Shuang, BAI Hankuan, LIU Haisheng. Analysis on the fracture reason of 316L stainless steel inner protection barrel of the circulating water pump[J]. Electric Engineering, 2023(21):170-172.
- [25] 张仁奇,张义钊.微风振动下导线接续管动弯应变与疲劳仿真分析及试验验证[J].电工技术,2021(3):65-68.
ZHANG Renqi, ZHANG Yizhao. Simulation analysis and experimental verification of dynamic bending strain and fatigue of wire connection tube under breeze vibration[J]. Electric Engineering, 2021(3):65-68.
- [26] 孙忠慧,金 哲,时伟君,等. ± 500 kV直流输电线路耐张线夹断裂机理分析研究[J].电工技术,2019(21):103-105.
SUN Zhonghui, JIN Zhe, SHI Weijun, et al. Analysis and research on fracture mechanism of strain clamp in ± 500 kV DC transmission line[J]. Electric Engineering, 2019(21):103-105.
- 高旭(1993—),男,硕士,研究方向为柔性直流输电技术及其工程应用(E-mail:2215371045@qq.com)。