

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.06.017

考虑抗震性能的特高压换流阀机械—电气协同设计研究

赵伟杰^{1,2}, 崔彰伦^{3,4}, 李凌飞^{2,5}, 李海波^{2,6}, 江一^{1,2},
耿要强⁷, 黄剑湘^{1,2}

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局, 昆明 650217; 2. 云南省特高压直流智能运检与安全运行工程研究中心, 昆明 650217; 3. 昆明理工大学电力工程学院, 昆明 650500; 4. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局研究生工作站, 昆明 650217; 5. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663; 6. 清华四川能源互联网研究院, 成都 610042; 7. 许昌开普电气研究院有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 为验证±800 kV/5 000 A特高压换流阀在多重安全约束下的综合设计合理性,文中基于已通过抗震验证的结构设计方案,开展全屏蔽系统电场数值模拟分析。采用Solidworks建立1:1简化三维模型,基于ANSYS Maxwell仿真软件,依据相关标准并考虑海拔修正系数施加边界条件,运用有限元法开展电场仿真计算。结果表明,在保证卓越抗震性能的基础上,换流阀各部位最大场强仍满足2.0 kV/mm的极端工况控制值,顶屏蔽1.4 kV/mm、底屏蔽1.89 kV/mm、层屏蔽1.5 kV/mm、层间水管1.0 kV/mm,且电场分布均匀。进一步,结合抗震数据提出“机械—电气协同裕度”框架,论证底屏蔽场强接近控制值并非设计缺陷,而是在保障抗震性能前提下电气性能的系统权衡。为特高压复杂装备的多物理场协同设计提供了可借鉴的方法论与工程范例。

关键词: 特高压直流输电; 换流阀屏蔽系统; 静电场分析; 有限元法; 机械—电气协同

Research on Mechanical-electrical Collaborative Design of UHV Converter Valves Considering Seismic Performance

ZHAO Weijie^{1,2}, CUI Zhanglun^{3,4}, LI Lingfei^{2,5}, LI Haibo^{2,6}, JIANG Yi^{1,2}, GENG Yaoqiang⁷,
HUANG Jianxiang^{1,2}

(1. Kunming Bureau of CSG EHV Transmission Company, Kunming 650217, China; 2. Yunnan Provincial Engineering Research Center of UHVDC Smart O & M and Safe Operation, Kunming 650217, China; 3. School of Electric Power Engineering in Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 4. Kunming Bureau Postgraduate Workstation of CSG EHV Transmission Company, Kunming 650217, China; 5. Southern Power Grid Scientific Research Institute, Guangzhou 510663, China; 6. Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute, Chengdu 610042, China; 7. Xuchang Ketop Electrical Research Institute Co., Ltd., Henan Xuchang 461000, China)

Abstract: To verify the comprehensive design rationality of ±800 kV/5 000 A UHV converter valve under multiple safety constraints, in this paper the numerical simulation analysis on the electric field of the full shielding system is performed based on the seismic verification-proven structural design scheme. A 1:1 simplified three-dimensional model is set up using Solidworks. The electric field simulation calculation is performed based on the ANSYS Maxwell simulation software, in accordance with relevant standards and consideration of the application boundary conditions of the altitude correction factor as well as the use of the finite element method. The results show that, on the basis of ensuring excellent seismic performance, the maximum electric field strength at each part of the converter valve still satisfies the extreme operating condition control value of 2.0 kV/mm, 1.4 kV/mm for the top shield,

收稿日期:2025-12-24; 修回日期:2026-02-20

基金项目:云南省重点研发计划项目(202503AA080001)。

Project Supported by Key Science and Technology Projects of Yunnan Province(202503AA080001).

1.89 kV/mm for the bottom shield, 1.5 kV/mm for the layer shield, and 1.0 kV/mm for the interlayer water pipe, with uniform electric field distribution. Furthermore, a mechanical-electrical collaborative margin framework is proposed in combination with seismic data. It is demonstrated that the electric field strength of the bottom shield approaching the control value is not a the design defect, but a systematic trade-off of electrical performance under the premise of guaranteeing seismic performance. This work provides a referable methodology and engineering example for the multi-physics collaborative design of complex UHV equipment.

Key words: ultra-high voltage direct current transmission; converter valve shielding system; electrostatic field analysis; finite element method; mechanical-electrical collaboration

0 引言

特高压直流输电技术是中国能源优化配置的关键支撑,在“西电东送”国家重大能源战略工程中发挥骨干作用^[1-2]。其核心设备换流阀的运行可靠性直接影响系统安全^[3]。在 ± 800 kV 特高压及高海拔极端工况下,换流阀设计需同时满足机械抗震^[4-5]、电气绝缘^[6-7]等多重物理场约束。一方面,作为悬吊于阀厅的大型重型设备,尤其在强震区域,其抗震性能是保障地震发生时设备及系统安全的刚性要求^[8-9];另一方面,屏蔽系统长期处于极高电场中,绝缘性能^[10]必须得到充分验证。如何在高抗震要求下仍保持优良的电场性能,是特高压换流阀系统化设计的关键挑战^[11]。

目前,针对换流阀的电场仿真研究已较为深入,文[12]采用 3.0 kV/mm 作为场强控制值,对 ± 500 kV 柔性直流换流阀进行电场分析,但控制值较为宽松。文[13]利用 Creo Parametric 对阀厅进行电场分析,将阀塔精细化三维建模,但建模较为繁琐。文[14]针对换流阀屏蔽罩,运用有限元法对其进行电场分析,但屏蔽系统分析不完全。文[15]对换流阀绝缘子进行电场分析,但进行电场分析时未考虑海拔修正系数。在抗震方面,文[16]运用地震模拟振动台试验对换流阀进行抗震性能研究。文[17]运用有限元法仿真,针对斜拉绝缘子进行不同预应力下的地震响应研究并提出安装环簧阻尼器增加抗震性能。然而,现有研究大多将抗震分析与电场分析单独进行,但特高压换流阀面临“多物理场耦合约束”困境,不是单一物理场的优化问题,而是一个在机械、电气等多重安全约束下的权衡过程。

针对以上问题,文中将某高海拔地区特高压换流阀作为研究对象,创新性地已将已通过验证的卓越抗震性能结构作为既定前提和设计基础,以完整屏蔽系统为目标,采用 Solidworks 建立 1:1 三维仿真模型;采用更为严格的 2.0 kV/mm 作为场强设计控制值;结合 GB/T 20990.1—2020《高压直流输电晶闸管

阀第 1 部分:电气试验》标准^[18]及 2 000 m 海拔对应的 1.13 倍修正系数^[19]模拟高海拔、高电压极端工况。

文中目的在于:第一,验证在确保卓越抗震性能的基础上,电气绝缘仍能满足极端工况要求;第二,提出“机械—电气协同裕度”框架,即在机械抗震拥有巨裕的情况下,电气绝缘在严格的控制值下也验证通过,整体设计没有冗余浪费,且安全层次清晰;第三,针对底屏蔽场强接近控制值这一现象,结合抗震数据,论证其并非设计缺陷,而是在多重约束下的权衡解,为特高压复杂装备的多物理场协同设计提供了可借鉴的方法论与工程范例。

1 换流阀仿真模型建立

± 800 kV/5 000 A 特高压换流阀塔极 1 包括两个 12 脉动桥,下 12 脉动桥的低压端连接到中性点电位,上 12 脉动桥低压端连接到直流 400 kV,每个 12 脉动桥额定电压 400 kV,由 6 个双重阀结构组成,阀悬吊于阀厅顶部,由两个串联的 6 脉动桥组成。每个双重阀由 2 个单阀串联组成,一个完整的单阀由 8 个晶闸管组件串联而成。单极下 12 脉动桥见图 1。

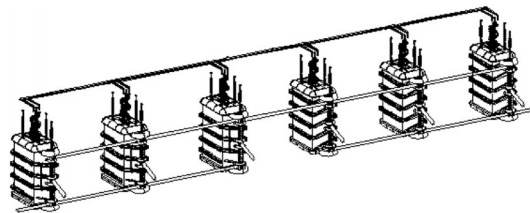


图 1 ± 800 kV 单极下 12 脉动桥示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 12-pulse bridge under unipolar operation at ± 800 kV

1.1 换流阀结构抗震性能介绍

为保证特高压换流阀在极端地震工况下的运行安全,文中针对 ± 800 kV/5 000 A 换流阀,依据 GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》^[20],完成了系统的抗震分析与试验,验证其机械结构是否满足抗震标准。

分析试验结果表明,该阀塔结构具有极高的安全裕度。以受力最大的高压阀塔顶部悬吊绝缘子

为例,在静态荷载下,最小安全系数达8.67,远高于标准要求的2.5;模拟8级地震烈度的动态荷载下,最小动态安全系数仍达7.77,远高于标准要求的1.67。换流阀机械结构及节点标识见图2,安全系数计算结果见表1。

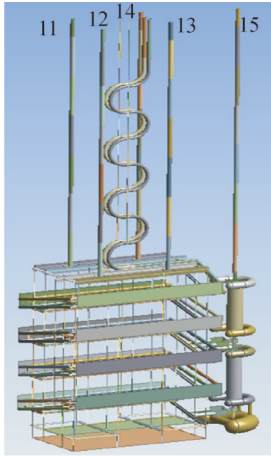


图2 换流阀机械结构及节点标识

Fig. 2 Mechanical structure and node identification of converter valve

表1 高压阀塔顶部悬吊绝缘子的受力和安全系数

Table 1 Stress and safety factor of top-suspension insulator in high-voltage valve tower

节点	静载荷 力/N	最大动载 荷力/N	允许最大 载荷力/kN	安全系数	
				动态	静态
11	22 915	4 444		10.97	13.09
12	23 572	4 628		10.64	12.73
13	23 040	4 347	300	10.95	13.02
14	23 795	4 190		10.72	12.61
15	34 598	4 011		7.77	8.67

该换流阀塔结构抗震性能卓越,为后续的电气绝缘性能分析奠定了一个稳固、可靠的机械结构前提。后续的电场仿真工作将基于此机械结构展开。

1.2 阀塔模型简化

换流阀包括阀段、屏蔽系统、冷却系统、支撑结构及辅助电气部件^[21]等,换流阀的屏蔽系统包括顶屏蔽、底屏蔽、层屏蔽及层间水管屏蔽。

文中重点研究换流阀屏蔽系统的电场分布,所采用的模型为已通过抗震性能验证的结构设计,继续验证其电场分布特性。在此前提下对母线板、电抗器等部件进行电场简化处理^[22],由于电场主要集中在表面和边缘,其内部结构对整体电场分布影响较小,故简化为等效导体,保留其电位边界条件;冷却回路用等电位线与母线板、阀段进行电气连接,保证电位边界条件准确;均压电极利用规则圆柱体代替,并合并成等效电极,避免了局部网格过密导致的剖分失效;对阀层设计独立计算域,简化反映

实际等电位线连接结构。简化模型与实际模型在电场分布趋势与机械结构上几乎一致,不影响对换流阀机械抗震与电气绝缘的整体判断结论,符合工程仿真中对复杂结构进行适当简化的做法。

简化后的阀塔距阀厅墙体水平10 m,距阀厅顶部垂直7.5 m,距地面安装高度8.2 m。简化后的Solidworks三维换流阀塔结构见图3。

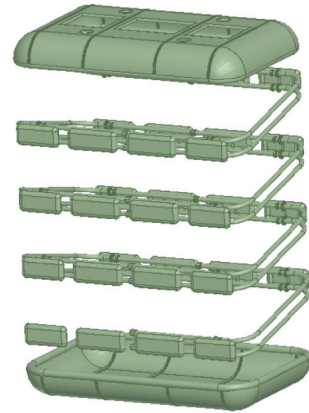


图3 换流阀塔三维简化模型(基于抗震验证结构)

Fig. 3 3D simplified model of converter valve tower (structure based on seismic verification)

2 仿真实论

2.1 有限元分析法原理及应用

在换流阀电场仿真中,有限元法的应用流程^[23-24]如下:

1)模型处理,将三维模型导入ANSYS Maxwell后,生成初始六面体网格。对电场集中区域进行加密处理,确保精确捕捉场强的梯度变化;对于场强分布均匀区域采用较粗网格,以控制总体单元数量;在空气介质与金属屏蔽的交界面,进行2层网格细化处理,以准确模拟界面处的电场法向分量跃变。

2)边界条件处理,根据GB/T 20990.1—2020及海拔修正系数对换流阀施加直流电压以模拟极端工况;所有金属屏蔽件定义为理想导体,空气介质设为 $\epsilon_r = 1.0$,层间水管设为与对应阀层等电位;外围边界无穷远接地,阀厅墙壁与地面设为固定0电位。

3)求解,通过ANSYS Maxwell软件求解各单元的线性方程组,得到每个有限元的电位分布,再通过场强与电位的梯度关系推导得出场强分布。

2.2 电场计算方程

在正常运行工况下,换流阀周围的工频电场属于准静电场范畴,其场强几乎不随时间变化,仅与空间坐标相关,因此可采用静电场理论进行分析,由此麦克斯韦方程组可简化为:

$$\nabla \times E = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{D} = \rho \quad (2)$$

式(1)、(2)中: E 为场强, V/m; D 为电位移矢量, C/m²; ρ 为电荷密度, C/m³。由式可知, 静电场为无旋场, 存在标量电位函数 φ , 使得场强与电位函数满足梯度关系

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi \quad (3)$$

式(3)中: ∇ 为电位函数的梯度算子; 负号表示场强方向与电位梯度方向相反, 即电场线由高电位指向低电位。电位函数 φ 满足拉普拉斯方程

$$\nabla^2\varphi = 0 \quad (4)$$

式(4)中, ∇^2 为拉普拉斯算子。电位 φ 的拉普拉斯方程为

$$\nabla^2\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} \quad (5)$$

电场边界条件可分为3类, 第1类为给定边界电位值的诺以曼边界条件

$$\varphi|_{\Gamma_1} = \varphi_0 \quad (6)$$

式(6)中: Γ_1 为第一类模型边界; φ_0 为已知电位值。

第2类为给定电位法向导数值的狄里赫希边界条件

$$\left. \frac{\partial\varphi}{\partial\mathbf{n}} \right|_{\Gamma_2} = \psi \quad (7)$$

式(7)中: \mathbf{n} 为边界的外法线方向向量; Γ_2 为第2类模型边界; ψ 为已知电位法向导数值。

第3类为由前两类边界条件线性组合的混合边界条件

$$\beta \left. \frac{\partial\varphi}{\partial\mathbf{n}} \right|_{\Gamma_3} + \gamma\varphi|_{\Gamma_3} = q \quad (8)$$

式(8)中: β 、 γ 、 q 为系数; Γ_3 为第3类模型边界。由于阀厅四周接地为零电位, 故求解域满足第一类边界条件, φ_0 根据施加直流电压不同而改变。

电位移矢量与场强的关系为

$$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E} \quad (9)$$

式(9)中, ε 为介质的介电常数, F/m。

综上可得

$$\nabla \times \varepsilon\nabla\varphi = -\rho \quad (10)$$

在换流阀屏蔽系统的场域范围内, 无自由点电荷分布 $\rho=0$, 此时静电场的控制方程进一步简化为拉普拉斯方程

$$\nabla \times \varepsilon\nabla\varphi = 0 \quad (11)$$

ANSYS Maxwell 软件通过对该控制方程进行有限元离散化处理, 将其转化为线性方程组, 求解得到整个场域的电位分布, 再通过式(11)计算得出场

强分布, 实现对换流阀屏蔽系统电场的定量分析^[25]。

3 电场仿真计算结果与分析

电场仿真计算的目标是在确保结构机械抗震性能的前提下, 验证换流阀在极端工况下的电压耐受能力, 为换流阀设计提供数据支撑^[5]。对于验证换流阀绝缘性能的设计控制值没有统一标准, 一般约定空气介质的击穿场强范围为 2.0~3.0 kV/mm。为保证换流阀能够在极端工况下的安全稳定运行, 选取严苛的 2.0 kV/mm 作为换流阀场强控制值。

为保障仿真精度, 文中进行了系统的网格收敛性验证, 在电场梯度较大的屏蔽边缘区域逐步加密网格, 当局部网格尺寸细化至 2 mm 时, 顶屏蔽、底屏蔽最大场强计算值的相对变化小于 3%, 判定结果收敛。最终全模型采用约 120 万单元形成的六面体进行求解, 在确保计算效率的同时满足工程分析对精度的要求, 从而有效佐证了仿真结果的可信度。

3.1 顶、底屏蔽电场分析

文中以多重阀单元电气试验中高端换流阀的电压为基准, 同时考虑海拔、湿度、温度带来的影响, 根据 GB/T 311.2—2013《绝缘配合第 2 部分: 使用导则》标准知湿度、温度符合使用条件, 海拔需要进行修正。根据公式

$$K_a = e^{m(H-1000)/8150} \quad (12)$$

式(12)中: K_a 为海拔修正系数; e 为自然常数; m 取决于包括在设计阶段未知的最小放电路径在内的各种参数, 根据标准, 在直流耐受电压试验时 $m=1$ 。则在 $H=2000$ m 时, $K_a=1.13$, 即取 1.13 倍的海拔修正系数。确定顶屏蔽施加 984 kV 直流电压, 底屏蔽施加 1476 kV 直流电压, 该边界条件模拟了换流阀整体运行时的极端工况。

3.1.1 顶屏蔽电场分布特征

顶屏蔽电场分布云图见图 4。顶屏蔽的电场分布呈现“边缘集中、中间均匀”的对称分布特征。最大场强出现在顶屏蔽外侧边缘区域, 最大值为 1.4 kV/mm, 低于 2.0 kV/mm 的设计控制值; 顶屏蔽中间区域电场分布均匀, 场强在 0.8~1.0 kV/mm 之间; 在距顶屏蔽 1.0 m 范围内场强降至 0.5 kV/mm 以下, 不会造成电压击穿放电。

3.1.2 底屏蔽电场分布特征

底屏蔽电场分布云图见图 5。最大值出现在外侧边缘区域为 1.89 kV/mm, 仍满足 2.0 kV/mm 的控制要求; 底屏蔽电场主要集中于下侧, 在距底屏蔽 0.8 m 范围内场强呈现快速衰减, 地面附近场强降至

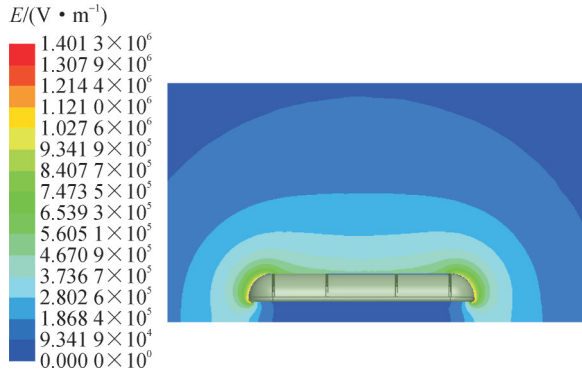


图4 顶屏蔽电场分布云图

Fig. 4 Cloud map of electric field distribution of top shielding

0.6 kV/mm 以下;底屏蔽中间区域场强分布均匀,平均值约为 1.2 kV/mm。

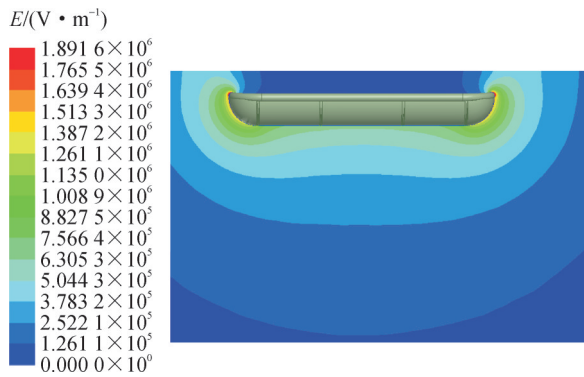


图5 底屏蔽电场分布云图

Fig. 5 Cloud map of electric field distribution of bottom shielding

3.2 换流阀层间电场分析

针对换流阀层及各层之间的电场分布特性,文中按规定,考虑 1.6 倍试验安全系数以及 1.13 倍海拔修正系数,对单阀施加 369 kV 直流试验电压,阀塔顶屏蔽设定为 0 kV 基准电位,以此模拟极端绝缘工况。

3.2.1 换流阀单阀电压分布特征

换流阀单阀电压分布云图见图 6。中间各层电压呈均匀下降趋势,层间电压差值约为 41 kV,电压分布云图过渡顺滑,未出现明显的畸变区域。

3.2.2 屏蔽系统整体电场分布

屏蔽系统整体电场分布云图见图 7。整体最大场强值为 1.5 kV/mm,满足 2.0 kV/mm 的设计控制值;场强从外而内逐步递减,层屏蔽之间的中间区域场强分布均匀,平均值约为 0.9 kV/mm,避免层间绝缘击穿风险;屏蔽系统与阀厅墙体、顶部及地面之间的区域场强均低于 0.4 kV/mm,不会对周边环境产生电压击穿风险。

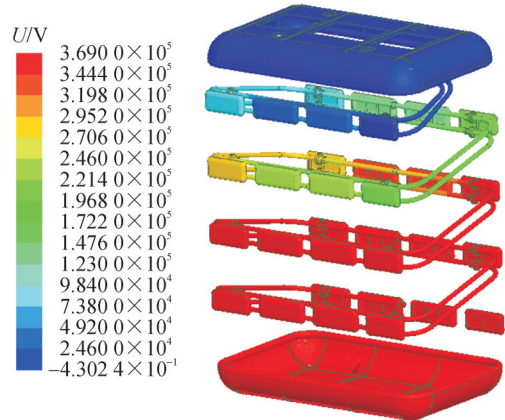


图6 换流阀电压分布云图(单阀)

Fig. 6 Cloud map of voltage distribution of converter valve (single valve)

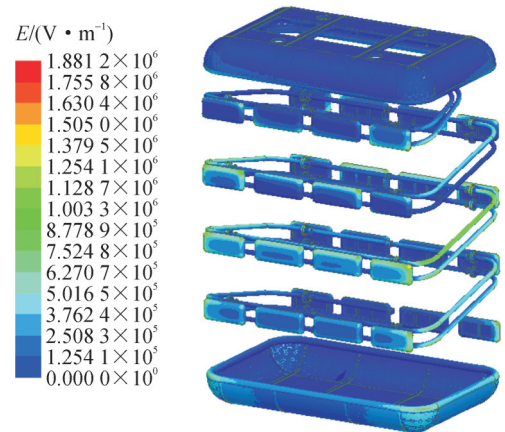


图7 换流阀屏蔽系统电场分布云图

Fig. 7 Cloud map of electric field distribution of converter valve shielding system

3.2.3 层屏蔽切面电场分布

为进一步验证该换流阀的绝缘性能,增加对屏蔽沿 X-Y 切面与 Y-Z 切面的电场分布云图分析。

层屏蔽沿 X-Y 切面电场分布云图见图 8。电场分布呈对称分布特征,最大场强集中在外侧边缘区域,约为 1.3 kV/mm,满足 2.0 kV/mm 的控制标准;内部区域场强分布均匀,平均值在 0.7~0.9 kV/mm 之间,能够有效避免场强的分布集中;边缘场强虽相对集中,但衰减速度较快,不会产生放电现象。

层屏蔽沿 Y-Z 切面电场分布云图见图 9。电场分布呈现均匀递减趋势,最大场强出现在切面上方外侧边缘,约为 1.4 kV/mm,满足 2.0 kV/mm 的设计控制值。下方区域场强逐步递减至 0.6 kV/mm。切面电场分布无明显畸变,避免垂直方向电场集中带来的问题。

3.2.4 层间水管表面电场分布

层间水管表面电场分布云图见图 10。水管表面的电场分布相对均匀,最大场强约为 1.0 kV/mm,

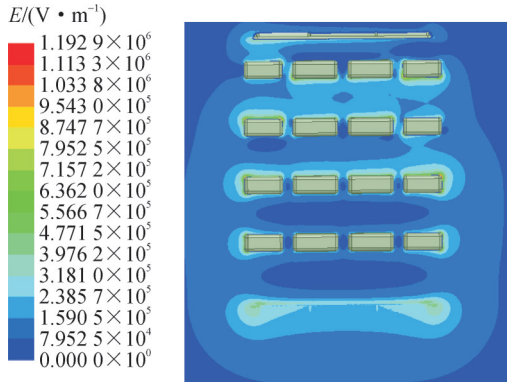


图8 层屏蔽沿X-Y切面电场分布云图

Fig. 8 Cloud map of electric field distribution of valve tiershield along the X-Y cross-section

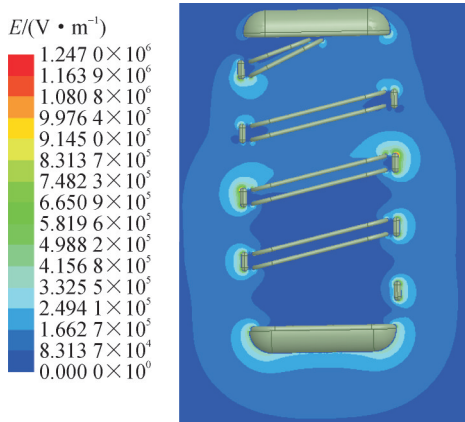


图9 层屏蔽沿Y-Z切面电场分布云图

Fig. 9 Cloud map of electric field distribution of valve tier shield along the Y-Z cross-section

满足2.0 kV/mm的设计控制值。靠近场强较大屏蔽侧的水管表面场强略高, 远离屏蔽侧的水管表面场强较低。这一分布规律与屏蔽系统的电场分布趋

势一致, 表明层间水管通过等电位连接能够有效响应周边电场环境, 水管表面无明显场强集中区域, 表明水管在实现冷却功能的同时, 其管径选择、安装位置及材质特性均满足电场屏蔽限值要求, 没有恶化换流阀内部的电场分布。

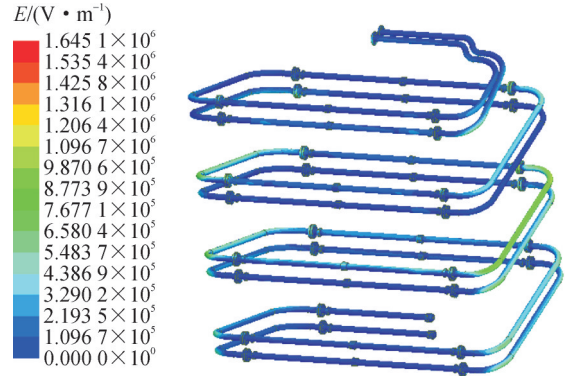


图10 层间水管表面电场分布云图

Fig. 10 Cloud map of electric field distribution on the surface of inter-tier water pipe

4 机械—电气性能协同综合评估

4.1 抗震与电场性能的综合评估

该特高压换流阀设计同时满足了严苛的双重安全标准。在保证机械抗震性能卓越的前提下, 电气绝缘性能也保证可靠性。在考虑高海拔修正的极端工况下, 屏蔽系统各部位最大电场强度均低于2.0 kV/mm的严苛设计控制值, 且电场分布均匀, 无异常畸变。该设计在抗震与绝缘两个独立物理场上均达到了优异的性能水平, 换流阀各部位电场仿真结果见表2。

表2 换流阀各部位电场仿真结果一览表

Table 2 Table of electric field simulation results for each part of converter valve

换流阀部位	施加电压/ kV	最大场强/ (kV·mm ⁻¹)	平均场强/ (kV·mm ⁻¹)	场强设计控制/ (kV·mm ⁻¹)	结论
顶屏蔽	984	1.40	0.90	2.0	符合
底屏蔽	1 476	1.89	1.20		符合
层间屏蔽(整体)	369(单阀)	1.50	0.90		符合
层屏蔽沿X-Y切面	369(单阀)	1.30	0.80		符合
层屏蔽沿Y-Z切面	369(单阀)	1.40	0.75		符合
层间水管(近高场强侧)	369(单阀)	1.00	0.80		符合
层间水管(远离高场强侧)	369(单阀)	0.50	0.40		符合

4.2 “机械—电气协同裕度”框架探讨

进一步提出“机械—电气协同裕度”评价框架。对于特高压复杂设备, 应考察它们在系统层面的耦合协同关系, 而不是孤立看待机械抗震性能或绝缘裕度。

在机械抗震性能拥有巨大裕度的情况下, 电气绝缘仍满足了苛刻的控制值。特高压换流阀机械—电气协同裕度图见图11, 这实现了一种高效的安全资源配置, 将裕度重点配置于机械抗震这一更难以实时监测、失效后果更严重的维度, 而在电气绝缘维度则

采用经过精确仿真验证的高标准、低裕度设计。

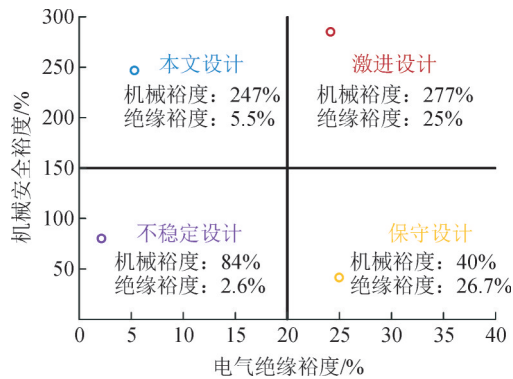


图 11 特高压换流阀机械—电气协同裕度图

Fig. 11 Mechanical-electrical collaborative margin diagram of UHV converter valve

4.3 多重约束下的系统权衡设计分析

针对底屏蔽最大场强接近设计控制值的情况,常见方式会通过改变屏蔽形状、增加均压环或改变曲率半径等方式来优化降低场强。然而,在特高压换流阀这类多物理场紧密耦合的复杂系统中,优化单一物理场并不一定会带来整体可靠性的提高,若仅为提升电场裕度而改变底屏蔽的局部结构,可能造成换流阀的机械抗震性能降低,导致其已通过验证的卓越抗震能力被削弱。

因此,抗震性能极优,电场合格且接近苛刻限值无需优化,而是在机械抗震与电气绝缘双重约束下,经过系统权衡后达到的平衡点。底屏蔽场强接近控制值,恰恰是在优先保障地震安全这一更高级风险的前提下,电气设计所能达到的性能极限。

5 结论

文中从系统视角,对 ± 800 kV/5 000 A特高压换流阀的机械抗震与电气绝缘性能进行了协同验证与深入分析。

1)明确高机械抗震的安全前提。以抗震性能为基础,在此基础上验证其具有卓越抗震能力结构的电气绝缘能力。

2)提出“机械—电气协同裕度”评价框架。对于特高压复杂装备,其设计应在系统层面协同考量不同物理场。即在机械抗震保有巨大裕度时,对绝缘进行了电气安全性能验证。

3)论证多重约束下的系统权衡设计逻辑。针对底屏蔽场强接近控制值的现象,并非设计缺陷,而是在确保极高抗震性能的刚性约束下,电气绝缘所能达到的最优平衡。验证了多重约束下的系统权衡设计在工程中的有效性,为同类装备在安全、经济与可靠性之间的优化配比提供了方法论参考。

参考文献:

- [1] 李怡然,刘 瑶,李小腾,等.面向送端电网稳定性的直流落点多目标优化方法研究[J]. 智慧电力,2026,54(3):39-47.
LI Yiran, LIU Yao, LI Xiaoteng, et al. A multi-objective optimization method for DC terminal siting oriented to stability of sending-end grid[J]. Smart Power, 2026, 54(3): 39-47.
- [2] 杨新宇,赵庆生,韩肖清,等.基于IF-AD-ELM的特高压直流输电系统故障辨识[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(8):1-9.
YANG Xinyu, ZHAO Qingsheng, HAN Xiaoqing, et al. Fault identification of a UHVDC transmission system based on IF-AD-ELM[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 1-9.
- [3] 李 凯,廖卉莲,汪 涛,等.特高压直流输电换流阀晶闸管温度分布预测方法研究[J]. 电测与仪表,2025,62(11):216-224.
LI Kai, LIAO Huilian, WANG Tao, et al. Research on prediction method of temperature distribution in thyristor of UHVDC converter valve[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(11): 216-224.
- [4] MENG Wanchen, LIU Yanhui, LI Hao, et al. Seismic evaluation and analysis of supported 800 kV converter valve[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2025.
- [5] DING Can, LIU Yifan, ZHU Pingjie, et al. Analysis of the seismic performance of ± 500 kV flexible DC converter valves[J]. Energies, 2023, 16(17): 6335.
- [6] 郑全旭,孙小平,娄彦涛,等. ± 500 kV海上柔直换流阀轻型化设计及仿真分析[J]. 高压电器,2023,59(6):188-201.
ZHENG Quanxu, SUN Xiaoping, LOU Yantao, et al. Lightweight design and simulation analysis of ± 500 kV offshore VSC converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 188-201.
- [7] 袁洪涛,胡四全,韩 坤,等. 535 kV张北工程柔直换流阀子模块电磁骚扰研究[J]. 高压电器,2023,59(12):103-112.
YUAN Hongtao, HU Siquan, HAN Kun, et al. Research on electromagnetic disturbance of sub-module of VSC-HVDC valve in 535 kV Zhangbei project[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12): 103-112.
- [8] 刘 潇,谢 强. 特高压换流站抗震韧性及震后修复策略快速评估方法[J]. 中国电机工程学报,2024,44(3):1224-1236.
LIU Xiao, XIE Qiang. Rapid evaluation method for seismic resilience and post-earthquake repair strategy of UHV converter station[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 1224-1236.
- [9] 于海波,高 彪,张晓波,等. 临时加固下换流阀塔海上运输结构强度分析[J]. 中国工程机械学报,2024,22(2):231-235.
YU Haibo, GAO Biao, ZHANG Xiaobo, et al. Strength analysis of the offshore transportation structure of the converter valve tower under temporary reinforcement[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2024, 22(2): 231-235.
- [10] ZHANG Bo, HU Qiuling, HUANG Jiahao, et al. Research on abnormal discharge of exhaust valve of HVDC converter valve[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2427(1): 012033.
- [11] 随祥旭,卢 鹏,刘 旭,等. 4 000 m高海拔1 100 kV GIS复合套管研制[J]. 高压电器,2025,61(6):236-244.
SUI Xiangxu, LU Peng, LIU Xu, et al. Development of 1 100 kV GIS composite bushing at altitude of 4 000 m[J]. High Voltage

- Apparatus, 2025, 61(6): 236-244.
- [12] 范彩云, 胡秋玲, 陶颖军, 等. ± 500 kV 柔性直流换流阀电场分布及绝缘特性研究[J]. 高压电器, 2017, 53(10): 183-189.
FAN Caiyun, HU Qiuling, TAO Yingjun, et al. Research of electric field distribution and insulation properties for ± 500 kV VSC-HVDC converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 183-189.
- [13] 陈思懿. 高海拔 ± 800 kV 直流换流站阀厅典型金具表面电场分布及结构优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2024.
CHEN Siyi. Surface electric field distribution and structural optimization of typical fittings in valve hall of ± 800 kV DC converter station at high altitude[D]. Chongqing: Chongqing University, 2024.
- [14] 马元社, 雒偲立, 姚舒. ± 1 100 kV/12 GW 特高压换流阀屏蔽设计与工程应用[J]. 电工技术, 2023(15): 206-210.
MA Yuanshe, LUO Caili, YAO Shu. Shielding design and engineering application of ± 1 100 kV/12 GW UHV converter valve [J]. Electric Engineering, 2023(15): 206-210.
- [15] 刘黎, 俞恩科, 郑荣亮. ± 200 kV 柔直换流阀在绝缘试验下的电场分析[J]. 电力电子技术, 2022, 56(12): 103-106.
LIU Li, YU Enke, ZHENG Rongliang. Electric field analysis of ± 200 kV flexible direct current converter valve under insulation test[J]. Power Electronics, 2022, 56(12): 103-106.
- [16] 毕良富, 张立红, 牛朝阳, 等. 真型换流阀组件抗震性能振动台试验研究[J]. 高压电器, 2025, 61(4): 47-53.
BI Liangfu, ZHANG Lihong, NIU Chaoyang, et al. Study on seismic performance shaking table test of real converter valve assembly[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(4): 47-53.
- [17] 李子轩, 吴水根, 杨阿娟, 等. 支撑式柔性直流换流阀地震响应及减震控制仿真分析[J]. 高压电器, 2025, 61(4): 168-176.
LI Zixuan, WU Shuigen, YANG Ajuan, et al. Simulation analysis of seismic response and damping control of supported VSC-DC converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(4): 168-176.
- [18] 高压直流输电晶闸管阀第1部分: 电气试验: GB/T 20990. 1—2020[S]. 2020.
Thyristor valves for high-voltage direct current (HVDC) transmission-Part 1: Electrical tests: GB/T 20990. 1—2020[S]. 2020.
- [19] 绝缘配合第2部分: 使用导则: GB/T 311. 2—2013[S]. 2013.
insulation coordination-part 2: Application guide: GB/T 311. 2—2013[S]. 2013.
- [20] 电力设施抗震设计规范: GB 50260—2013[S]. 2013.
Code for seismic design of electric power facilities: GB 50260—2013[S]. 2013.
- [21] XIAO Jin, ZHANG Yanhong, XING Yichuan, et al. Mechanical behavior of crimping composite post insulator: Experimental and simulation study[J]. Buildings, 2023, 13(5): 1275.
- [22] 王宗泽, 余占清, 许超群, 等. 新型IGCT直流输电换流阀运行试验研究及其等效性评估[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(10): 4112-4122.
WANG Zongze, YU Zhanqing, XU Chaoqun, et al. Operation test and equivalence evaluation of a novel IGCT DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 4112-4122.
- [23] ZHANG Liubin, ZHANG Wuneng, JIN Jun, et al. Stress & strength verification and clamps cracking failures analysis of outdoor ultra-high voltage GIL pipeline shell structures[J]. Journal of Physics. Conference Series, 2025, 3074(1): 012003.
- [24] YANG Fengli, SHAO Shuai, LI Qinghua, et al. Full-scale experiment and FEA simulation on failure mechanism of the cross-arm of a UHV strain transmission tower in icing areas[J]. Structures, 2024 (69): 107323.
- [25] 毛颖科, 张天枫, 朱正一, 等. ± 500 kV 直流换流阀用饱和电抗器温度场与电场仿真研究[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 128-135.
MAO Yingke, ZHANG Tianfeng, ZHU Zhengyi, et al. Simulation study on thermal and electric field of saturable reactor for ± 500 kV converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 128-135.
- 赵伟杰(1993—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为高压直流与柔性直流输电、电力系统自动化技术等(E-mail: zhaoweijiework@126.com)。
- 江一(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高压直流与柔性直流输电(E-mail: 18678829794@163.com)。
- 耿要强(1989—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统保护与控制技术(通信作者)(E-mail: yaoqiangg@dlwg.net)。