

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210208

柔性直流输电换流阀塔电场分布与结构设计研究

蒋冠前¹, 吴红艳², 王帅卿³, 孙臻⁴, 仇丹丹⁵

(1. 许昌开普电气研究院有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 许昌职业技术学院, 河南 许昌 461000; 3. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 4. 国网河南省电力公司许昌供电公司, 河南 许昌 461000; 5. 濮阳职业技术学院, 河南 濮阳 457000)

摘要: 为研究高压柔性直流输电换流阀塔不同结构设计时表面电场分布情况, 采用有限元 ANSYS 对换流阀塔静电场进行仿真计算。首先分析了顶部均压环在不同管径下的电场分布情况, 各管径下顶部均压环电场分布近似, 顶部均压环拐角内侧可不添加小型均压环。然后研究了板状屏蔽罩与管状屏蔽罩的电场分布, 两种屏蔽系统下对阀塔均有良好的屏蔽能力, 板状屏蔽系统略好于管状屏蔽系统。最后分析了阀塔底部法兰电场分布, 该分布主要集中在其相连接斜拉绝缘子鼓包处。该研究为后续高压柔性直流输电换流阀塔设计提供了准确的设计思路及详细的参考方向。

关键词: 特高压柔性直流输电; 换流阀塔; 结构设计; 电场分布; 有限元 ANSYS 仿真

Electric field distribution and structural design of a converter valve tower in a VSC-HVDC transmission system

JIANG Guanqian¹, WU Hongyan², WANG Shuaiqing³, SUN Zhen⁴, QIU Danan⁵

(1. Xuchang Ketop Electrical Research Institute Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. Xuchang Vocational and Technical College, Xuchang 461000, China; 3. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 4. Xuchang Power Supply Company, State Grid Henan Power Supply Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 5. Puyang Vocational and Technical College, Puyang 457000, China)

Abstract: To study the surface electric field distribution of a converter valve tower in different structural designs in the VSC-HVDC transmission system, the electrostatic field of a converter valve tower is simulated using finite element ANSYS. First, the electric field distribution of the corona ring on the top is analyzed at different pipe diameters. It turns out to be similar under each pipe diameter, and there is no need to add a small corona ring inside the corner of the top corona ring. Then the electric field distribution of the plate and tubular shields is also studied. The two shielding systems both have good shielding ability to the valve tower, and the plate shielding system is slightly better than the tubular. Finally, the electric field distribution of the flange at the bottom of the valve tower is analyzed. The field is mainly concentrated at the bulge of the diagonal insulator connected to it. It provides accurate design ideas and detailed reference directions for the subsequent design of a converter valve tower in a VSC-HVDC transmission system.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of the State Grid Corporation of China (No. 52110417001J).

Key words: VSC-HVDC transmission; converter valve tower; structural design; electric field distribution; finite element ANSYS simulation

0 引言

柔性直流输电较传统直流输电具有紧凑化、设计模块化, 易于移动、安装、调试和维护, 成本低,

可实现远距离送电^[1-4]、交/直混联输电、扩展及多端直流输电等优点^[5-7]。特别是在风力、太阳能等新能源发电的情况下, 柔性直流输电具有动态响应快^[8-9]、潮流反转方便快捷的特点, 尤其在无源电网供电系统中功率变化时, 因不需要滤波器提供无功功率而具有较强的低电压穿越能力^[10], 优势更加明显。综上所述, 基于 VSC 技术的柔性直流输电由于

基金项目: 国家电网总部科技项目资助“柔直换流阀轻型化关键技术研究”(52110417001J)

其自身的诸多优势, 必将成为未来输配电系统中一个不可或缺的组成部分^[11-14]。

柔直换流阀塔是实现交直流变换的核心设备^[15-17], 属于高电压大电流的电气设备。在强电场的作用下, 无论是空气绝缘结构还是固体绝缘结构都将面临挑战。不同的结构设计有着不同的电场分布情况, 分析其电场分布对柔直换流阀塔结构设计有着重要的意义。

目前, 国内已有部分学者对换流阀及阀塔电场分布进行了研究, 文献[18-21]分别对换流阀绝缘子及金具表面电场进行了分析设计。文献[22-23]对柔性直流输电特高压阀塔全模型进行了电场分布计算及试验。文献[24]采用 ElecNet 仿真软件对功率模块内部电场的分布特性进行了分析, 最终得到绝缘试验电压下其内部出现较大场强的位置以及对应的最大场强值。文献[25]采用 ANSYS 和 CREO 混合建模技术, 搭建了 ± 535 kV 混合式高压直流断路器阀塔的 3 维模型, 并采用静电场求解, 为其结构设计提供了有效支撑。上述研究的主要关注点在整体阀厅及金具、屏蔽系统的电场分布, 但关于整体结构设计对电场分布影响的研究尚不够完善。

本文是从电场角度对不同类型结构设计进行对比分析, 并优化和细化阀塔的结构设计。主要研究顶部均压环拐角内侧是否添加小型均压环、屏蔽罩用板型和管型电场分布的优劣以及支撑绝缘子底部法兰是否安装均压环对电场的影响。

1 换流阀电场计算模型

换流阀塔采用双列支撑结构, 由四层组成, 每层包含 8 个组件, 阀塔间距 1493 mm。每个阀组件包含 4 个或 5 个 IGBT 压接式子模块。具体如图 1 所示。阀塔模型包括屏蔽系统、阀组件支撑横梁及绝缘结构等。

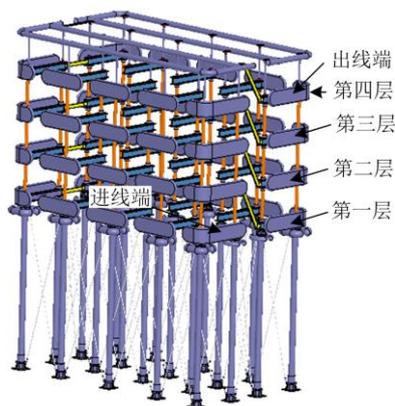


图 1 阀塔模型

Fig. 1 Model of converter valve tower

实际工程中长板型和 L 型屏蔽罩均采用壳体型, 仿真中为降低仿真资源需求, 简化为实体, 其厚度为 80 mm。长板型屏蔽罩各处倒角如图 2 所示。L 型屏蔽罩各处倒角如图 3 所示。

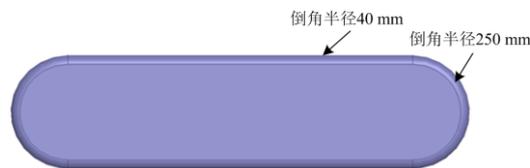


图 2 长板型屏蔽罩模型

Fig. 2 Model of long version shield

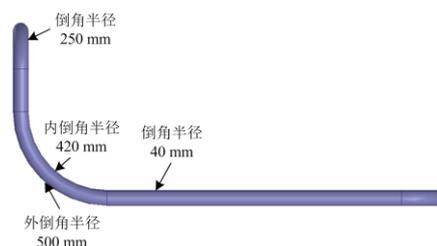


图 3 L 型屏蔽罩模型

Fig. 3 Model of L-shaped shield

阀塔中材料均通过 Maxwell 材料库选取相近材质, 对于静电场仿真, 本文材料属性主要考虑相对介电常数(Relative Permittivity)、电导率(Conductivity)主要材质参数设置如表 1 所示。

表 1 主要材质参数设置表

Table 1 Material parameter setting

位置	材质	相对介电常数	电导率/(S/m)
屏蔽罩、均压环、支撑横梁	aluminum_EC	1	36 000 000
铜排	copper	1	58 000 000
绝缘子芯棒	glass	5.5	0
绝缘子法兰	cast_iron	1	1 500 000
求解域	air	1.0006	0

采用阀支架 1 min 直流耐压试验电压来校核换流阀塔外绝缘特性, 采用阀端间 10 s 交、直流耐压试验电压校核换流阀塔内绝缘特性。

试验对象为 132 个模块的阀塔, 其中第一层组件按照 4 模块-5 模块-5 模块-4 模块-4 模块-5 模块-5 模块-4 模块方式安装, 其余三层按照 4 模块-4 模块-4 模块-4 模块-4 模块-4 模块-4 模块-4 模块-4 模块-4 模块方式安装, 对阀端间 10 s 交、直流耐压试验电压进行同比例缩放, 利用软件 ANSYS 有限元静电场进行仿真, 仿真的试验电压如下。

1) 阀支架 1 min 直流耐压试验电压为 898 kV。
根据 GB/T 33348-2016 高压直流输电用电压源

换流器阀电气试验中 7.3.1 节中的公式^[26], 有

$$U_{ids} = U_{dms1} \cdot K_3 \cdot K_t = 898 \text{ kV} \quad (1)$$

式中: U_{dms1} 为出现在阀支架上 1 s 内的平均电压最大值, 这里取 800 kV; K_3 为试验安全系数, $K_3 = 1.1$; K_t 为大气安全系数, $K_t = 1.02$ 。

2) 阀端间 10 s 交、直流耐压试验电压为 376.75 kV。

根据 GB/T 33348-2016 高压直流输电用电压源换流器阀电气试验中 9.3.1 节中的公式^[26], 有

$$U_{tv1} = (K_{e1} U_{tse1} \times \sin 2\pi ft + U_{tde1}) \cdot K_0 \cdot K_9 = 376.75 \text{ kV} \quad (2)$$

式中: K_{e1} 为电压阶跃过冲系数, 取值为 1; U_{tse1} 为阀最大暂态过电压交流分量峰值; U_{tde1} 为阀最大暂态过电压直流分量峰值; $f = 50 \text{ Hz}$, 为试验频率; K_9 为试验安全系数, 取值为 1.1; K_0 为试验比例系数。

$$K_0 = N_u (N_t - N_r) \quad (3)$$

式中: N_u 为试品中没有短路连接的串联阀级的数量; N_t 为阀中串联阀级的总数; N_r 为阀中冗余的串联阀级的总数。

2 顶部均压环电场分布

换流阀顶部两个均压环, 在不同管径下对阀屏蔽罩的电场分布影响不同^[8-9]。基于这个原因, 本文对几种典型管径进行仿真分析, 对比均压环管径对阀屏蔽罩的影响。选取的管径为 150 mm、170 mm、200 mm、220 mm、230 mm 和 250 mm。仿真条件: 顶部均压环为高电位。

由于阀组件对屏蔽系统的影响非常小, 为提升仿真速度, 仿真模型只包括最上面两层屏蔽罩, 不包含阀组件, 仿真模型如图 4 所示, 考虑同一管径下第三层屏蔽罩会受到第二层屏蔽罩的电场分布的影响, 其中第四层屏蔽罩及顶屏蔽罩的电场分布受到其他层电场分布的影响较小, 故本文仅给出第四层屏蔽罩及顶屏蔽罩不同管径下的电场分布仿真结果, 如图 5—图 10 所示。

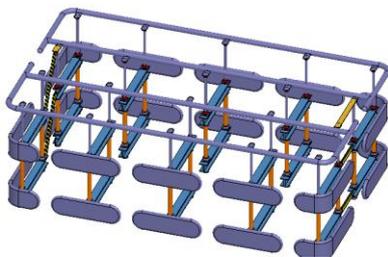


图 4 顶部均压环仿真模型

Fig. 4 Simulation model of the top corona ring

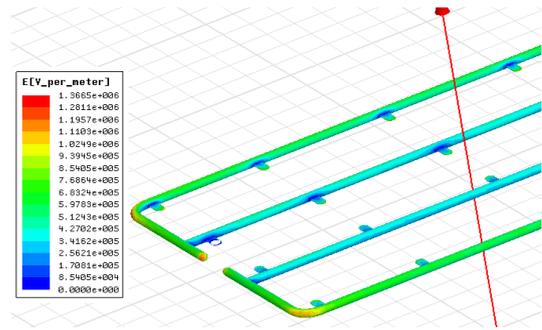


图 5 150 mm 管径下的电场分布

Fig. 5 Electric field distribution of 150 mm pipe diameter

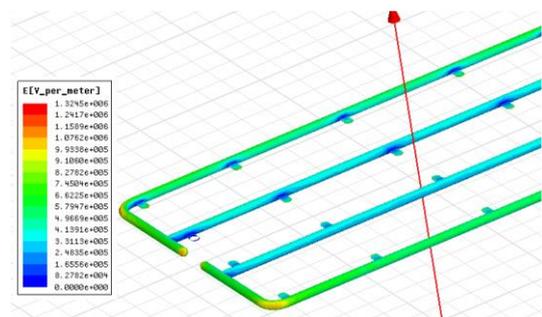


图 6 170 mm 管径下的电场分布

Fig. 6 Electric field distribution of 170 mm pipe diameter

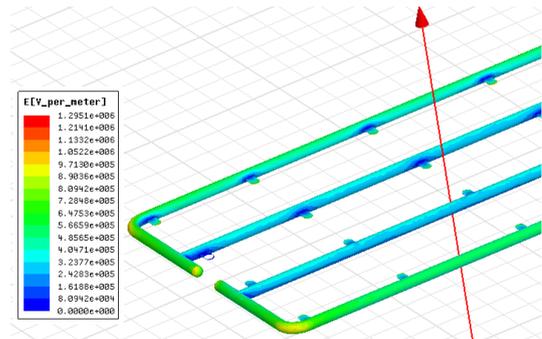


图 7 200 mm 管径下的电场分布

Fig. 7 Electric field distribution of 200 mm pipe diameter

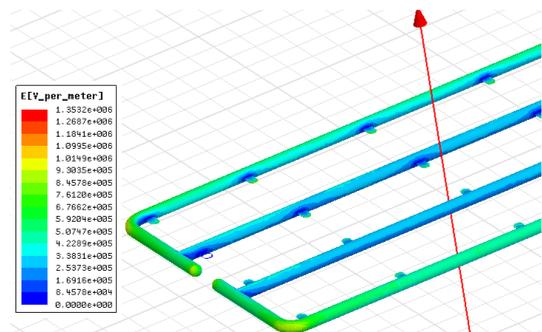


图 8 220 mm 管径下的电场分布

Fig. 8 Electric field distribution of 220 mm pipe diameter

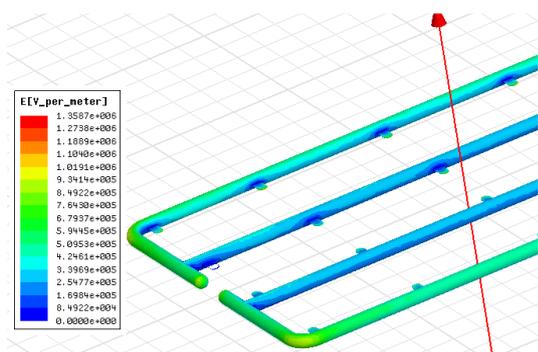


图 9 230 mm 管径下的电场分布

Fig. 9 Electric field distribution of 230 mm pipe diameter

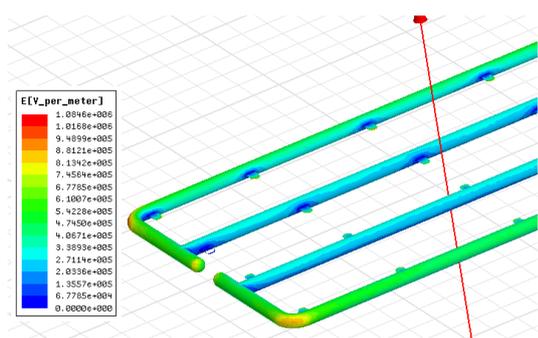


图 10 250 mm 管径下的电场分布

Fig. 10 Electric field distribution of 250 mm pipe diameter

汇总各管径下顶部均压环的电场最大值, 如表 2 所示。

表 2 各管径下顶部均压环的电场最大值

Table 2 Maximum electric intensity of the top corona ring of each pipe diameter

管径/mm	150	170	200	220	230	250
最大电场强度/(kV/mm)	1.367	1.327	1.295	1.353	1.359	1.085

通过上述仿真结果可见, 在各管径下顶部均压环电场分布近似, 其中最大差值仅为 0.282 kV/mm, 因此表格中所述管径均可。

在 220 mm 和 230 mm 管径下, 电场值有所抬升, 这是因为保持了下方绝缘子安装位置不变, 管径变粗之后, 导致顶部均压环安装板的倒角处电场变强, 当管径较大超过 250 mm 时, 则因管径太大相当于平面, 反而降低其电场强度。

经分析, 因为在较小的管径下(如 150 mm、170 mm), 均压环管和安装板交界处与安装板倒角处相距较远, 如图 11 所示, 未对倒角处形成影响。随着管径的增大, 导致整体电场强度降低, 均压环管和安装板交界处形成类似于三角结构, 因而对安

装板倒角处的电场形成较大影响, 导致整体电场强度升高; 但随着管径的增大(如 250 mm), 均压环管和安装板交界处构成类似于平面结构, 对安装板倒角处的电场影响减小, 导致在 250 mm 管径下电场强度变小。

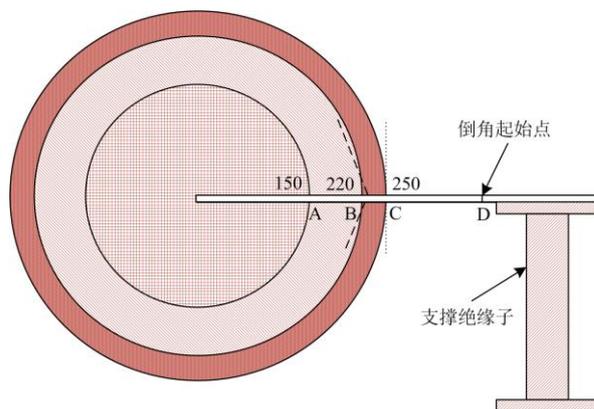


图 11 不同管径与均压环安装板倒角处相对位置

Fig. 11 Relative position of different pipe diameters and the chamfers of the corona ring

此外, 均压环圆直角处内侧电场均较小, 因此, 其内侧无需安装小型均压环。安装均压环的目的是对连接均压环的支撑绝缘子端部进行屏蔽, 当顶部均压环焊接有安装板时, 在一定程度上起到了均压作用, 小型均压环的安装就没有必要了。具体如图 12、图 13 所示。

仿真结果表明, 不同管径下电场能够满足使用要求。顶部均压环圆直角处内侧的电场分布较小。均压环内侧加小均压环作用是能够增强其连接的绝缘子端部的场强, 而均压环处采用支撑板, 其自身具备一定改善电场分布的能力。



图 12 柔直阀塔顶部小型均压环

Fig. 12 Small corona ring on top of the converter valve tower in VSC-HVDC

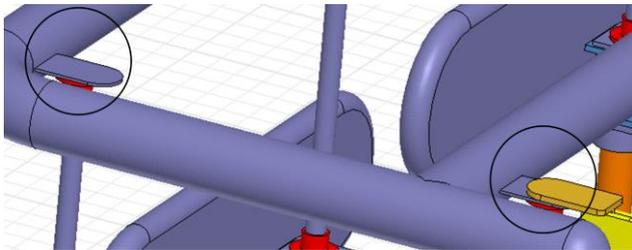


图 13 柔性阀塔顶部均压环安装板

Fig. 13 Mounting plate of corona ring on top of the converter valve tower in VSC-HVDC

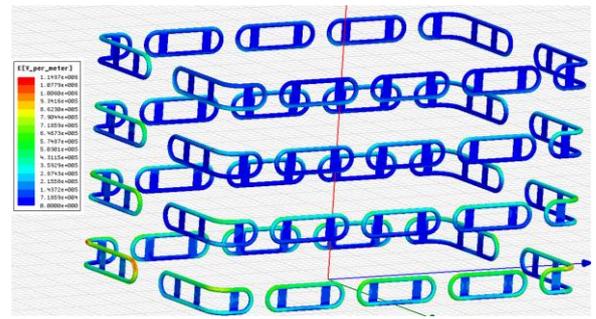


图 16 管状屏蔽系统的电场分布

Fig. 16 Electric field distribution of tubular shield

3 板状与管状屏蔽罩的电场分布

对板状屏蔽罩与管状屏蔽罩就阀端间交直流耐压试验和阀支架直流耐压试验电压进行仿真计算，为反映对组件的电场屏蔽能力，分析电容表面电场分布能够反映组件的表面电场分布，具体如下。

1) 阀端间 10 s 交直流耐压试验

试验电压进线端电压为 376.75 kV，出线端电压为 0 kV，图 14—图 17 所示为阀端间交直流耐压试验电压下两种屏蔽罩的电场分布仿真结果。

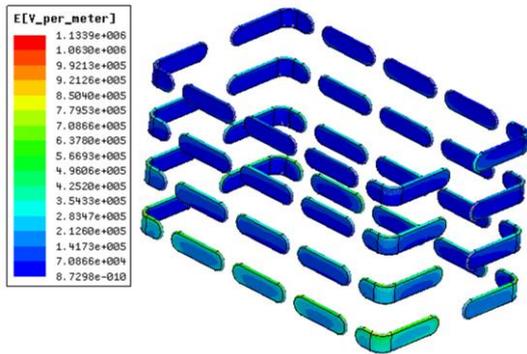


图 14 板状屏蔽罩电场分布

Fig. 14 Electric field distribution of plate shield

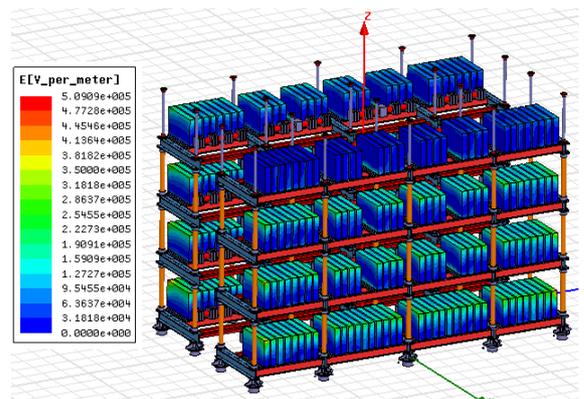


图 17 管状屏蔽系统下组件中电容表面电场分布

Fig. 17 Surface electric field distribution of the capacitor in the components of the tubular shield system

从图 14—图 17 可以发现，两种屏蔽罩的表面电场分布近似，板状屏蔽系统的电场强度最大值为 1.1339 kV/mm，管状屏蔽系统的电场强度最大值为 1.1497 kV/mm；两种屏蔽系统下电容表面的电场分布也十分接近，板状屏蔽系统电容表面电场分布最大值为 0.507 86 kV/mm，管状屏蔽系统电容表面电场分布最大值为 0.509 09 kV/mm。

2) 阀支架 1 min 直流耐压试验电压仿真

仿真电压为 898 kV，图 18—图 21 为阀支架直流试验电压下两种屏蔽罩的电场分布仿真结果。

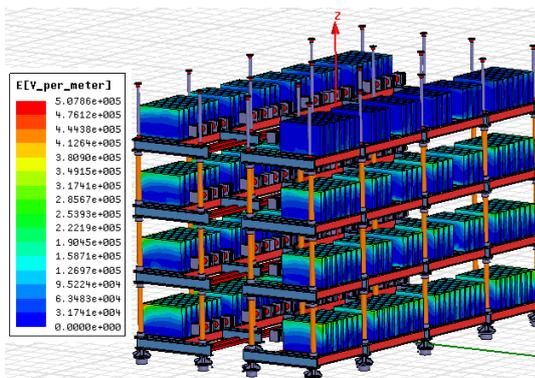


图 15 板状屏蔽系统下组件中电容表面电场分布

Fig. 15 Surface electric field distribution of the capacitor in the components of the plate shield system

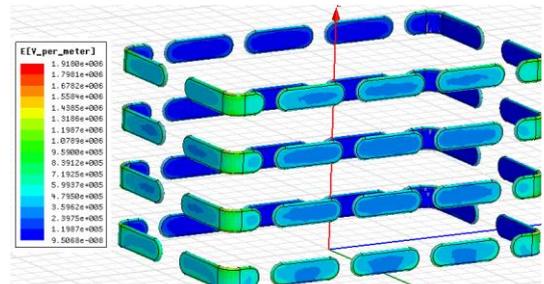


图 18 板状屏蔽系统的电场分布

Fig. 18 Electric field distribution of plate shield system

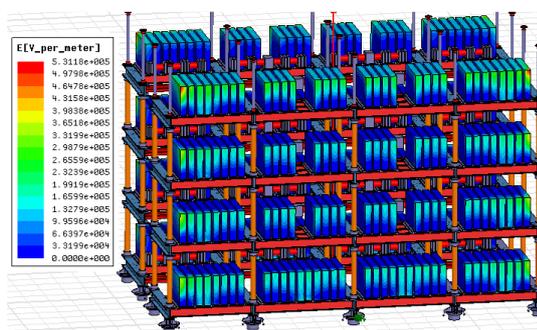


图 19 管状屏蔽系统下组件中电容表面电场分布

Fig. 19 Surface electric field distribution of the capacitor in the components of the tubular shield system

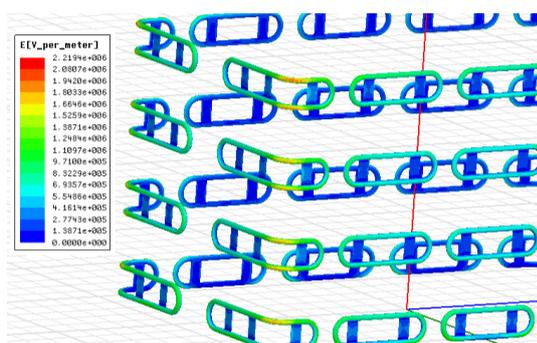


图 20 管状屏蔽系统的电场分布

Fig. 20 Electric field distribution of the tubular shield system

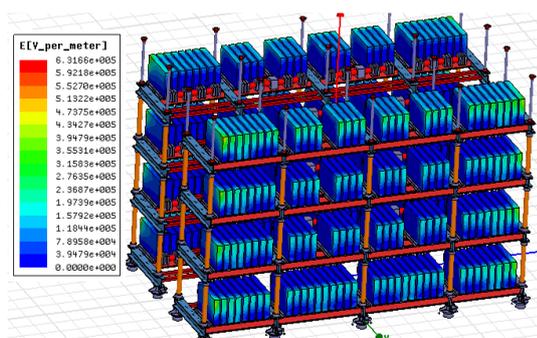


图 21 管状屏蔽系统下组件中电容表面电场分布

Fig. 21 Surface electric field distribution of the capacitor in the components of the tubular shield system

通过图 18—图 21 可以发现, 在阀支架直流耐压试验电压下, 两种屏蔽系统的电场分布相差不大, 其中板状屏蔽系统的最大电场强度为 1.9180 kV/mm, 管状屏蔽系统的最大电场强度为 2.2194 kV/mm; 电容表面电场分布方面, 板状屏蔽系统下电容表面的最大电场强度为 0.531 18 kV/mm, 管状屏蔽系统下电容表面的最大电场强度为 0.631 66 kV/mm。

根据上述仿真图可知, 不同屏蔽系统、不同仿

真工况下的电场强度最大值如表 3 所示。

表 3 不同屏蔽系统、不同仿真工况下的电场强度最大值

Table 3 Maximum electric intensity under different shield systems and different simulation conditions

kV/mm			
阀端间 10 s 交直流耐压试验电压			
板状屏蔽系统		管状屏蔽系统	
屏蔽系统	电容	屏蔽系统	电容
1.1339	0.5079	1.1497	0.5091
阀支架 1 min 直流耐压试验电压			
板状屏蔽系统		管状屏蔽系统	
屏蔽系统	电容	屏蔽系统	电容
1.9180	0.5312	2.2194	0.6317

根据上述分析可得, 板状屏蔽系统的屏蔽能力优于管状屏蔽系统。

4 阀塔底部法兰周围电场分布

对阀塔底部法兰处电场分布进行仿真研究, 仿真条件为阀支架直流耐压试验电压, 通过仿真结果发现, 阀塔底部法兰周围电场强度主要集中在其附近的斜拉绝缘子鼓包处。工程应用的斜拉绝缘子鼓包内部为金属构件, 外层包裹有绝缘材料。本文分别针对 3 种情况进行仿真分析: 鼓包为金属材料、鼓包内部为金属材料外部包裹 3 mm 厚的绝缘材料、鼓包为绝缘材料。具体仿真结果如图 22—图 26 所示。

1) 鼓包均为金属材料时的仿真结果。

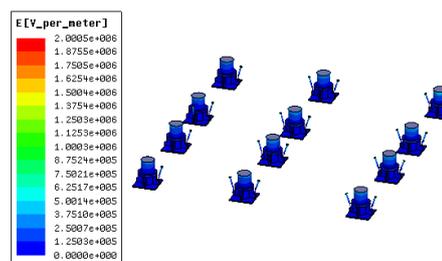


图 22 包括鼓包在内的底部法兰的表面电场分布

Fig. 22 Surface electric field distribution of the bottom flange including the bulge

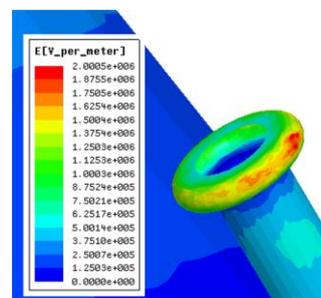


图 23 鼓包处的电场分布

Fig. 23 Electric field distribution at the bulge

2) 鼓包处为金属材料外层包裹 3 mm 厚的绝缘材料的仿真结果。仿真模型及电场分布如图 24、图 25 所示。

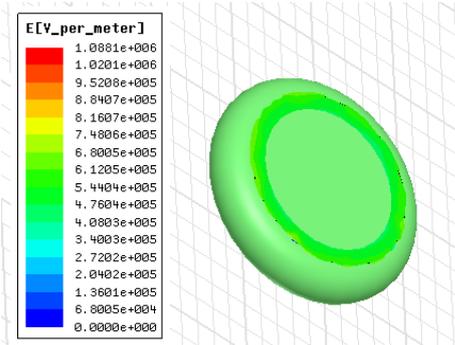


图 24 鼓包的绝缘材料表面电场分布

Fig. 24 Surface electric field distribution of bulged insulating materials

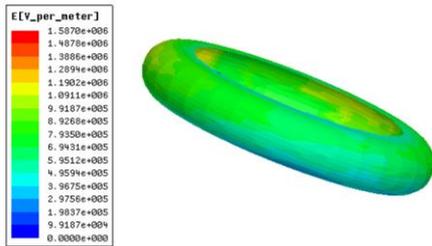


图 25 金属材料的表面电场分布

Fig. 25 Surface electric field distribution of metallic materials

3) 鼓包为绝缘材料时，仿真结果如图 26 所示。

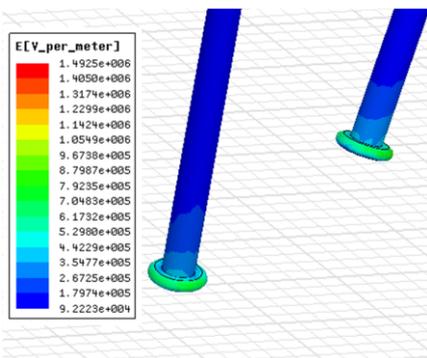


图 26 鼓包为绝缘材料时的电场分布

Fig. 26 Electric field distribution of the bulge made of insulating material

根据上述仿真计算，可得 3 种类型下鼓包的电场强度最大值，具体如表 4 所示。

根据上述分析可知，鼓包表面的电场分布随着鼓包材料的变化逐步降低。在“鼓包内部为金属材料外部包裹一层绝缘材料”和“鼓包为绝缘材料”这两种仿真条件下，绝缘部分电场分布十分接近，

并低于鼓包为金属材料的部分。在实际工程中，采用“鼓包内部为金属材料外部包裹一层绝缘材料”和“鼓包为绝缘材料”，鼓包在 1 min 直流耐压试验中，表面的电场强度介于 1.4925~1.5870 kV/mm 之间。由于该处的鼓包靠近地表面，不会产生放电现象。

表 4 3 种类型下鼓包表面的电场强度最大值

Table 4 Maximum electric intensity on the surface of the bulge with three types

鼓包为金属材料	鼓包内部为金属材料外部包裹一层绝缘材料		鼓包为绝缘材料
	绝缘部分	金属部分	
2.0005 kV/mm	1.5870 kV/mm	1.0881 kV/mm	1.4925kV/mm

5 结论

通过仿真计算 132 个模块换流阀阀塔的电场分布特性，以阀端间 10 s 交、直流耐压试验电压和阀支架 1 min 直流耐压试验电压作为换流阀外绝缘特性分析的电场求解条件，以阀端间交直流耐压试验电压峰值作为换流阀内绝缘特性分析的电场求解条件，进行仿真得出如下结论。

1) 顶部均压环不同管径下电场分布

仿真结果表明，不同管径下电场均能够满足要求，但增加管径的同时，需要考虑安装支撑板的长度。此外，顶部均压环圆直角处内侧的电场分布较弱，增加小均压环作用是增强其连接的绝缘子端部的场强，而连接处使用支撑板，其自身具备改善电场分布的能力。

2) 板状与管状屏蔽系统的电场分布

通过对比目前工程中常用的板状与管状两种屏蔽系统的电场分布均衡性可以发现，两者电场分布相近，板状屏蔽系统的电场分布略优于管状屏蔽系统，其结构形式选取需结合生产制造成本与美观性进行取舍。

3) 阀塔底部法兰周围电场分布

在阀塔底部法兰周围电场强度较强处主要集中在其相连接斜拉绝缘子鼓包处。通过仿真对比发现，通过给金属鼓包涂覆绝缘层或采用绝缘材料替代，可有效降低其电场强度。

本文通过研究给出了柔直换流阀阀塔顶部均压环管径设计方法，并对比分析了两种工程常见屏蔽系统的优劣，提出了阀塔底部绝缘子鼓包电场分布特性改进方案，通过在张北柔性直流电网工程稳定运行，充分验证了上述分析及结构设计的合理性，并可指导后续工程阀塔结构设计，为后续工程设计提供了可靠支撑。

参考文献

- [1] 林湘宁, 胡仙清, 童宁, 等. 具备高灵敏性与速动性的柔性直流输电系统纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 130-139.
LIN Xiangning, HU Xianqing, TONG Ning, et al. A pilot protection scheme for an VSC-MTDC system with high sensitivity and rapidity[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 130-139.
- [2] 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.
- [3] 童宁, 林湘宁, 张雪松, 等. 不依赖于边界元件的架空型多端柔直电网就地测距式接地保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 2049-2060.
TONG Ning, LIN Xiangning, ZHANG Xuesong, et al. Fault location based single-ended protection strategy for overhead VSC-MTDC independent on boundary component[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 2049-2060.
- [4] 李卫丰, 王超, 薛永端, 等. 基于暂态功率方向的柔性直流配电网线路单极接地保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 1-10.
LI Weifeng, WANG Chao, XUE Yongduan, et al. A flexible DC distribution network line unipolar grounding protection method based on transient power direction[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 1-10.
- [5] 张爽, 李宏强, 王峰, 等. 基于电压源换流器的多端柔性直流输电系统拟交流最优潮流[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 31-37.
ZHANG Shuang, LI Hongqiang, WANG Feng, et al. Quasi-AC optimal power flow for voltage source converter-based multi-terminal DC system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 31-37.
- [6] 马为民, 吴方劫, 杨一鸣, 等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2429-2439.
MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439.
- [7] 崔嘉奇. 海外柔性直流输电工程项目质量管理体系及成熟度评价[J]. 发电技术, 2020, 41(4): 361-368.
CUI Jiaqi. Quality management system and maturity evaluation of overseas flexible HVDC transmission project[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(4): 361-368.
- [8] 王岩, 魏林君, 高峰, 等. 光伏电站经柔性直流集电送出系统的低电压穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 70-78.
WANG Yan, WEI Linjun, GAO Feng, et al. Coordinated control strategy between large-scale photovoltaic power station and VSC-HVDC for low voltage ride-through operation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 70-78.
- [9] 付东, 陈冰, 张勇军. 柔性直流配电网的连接方式与建模综述[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 1-8.
FU Dong, CHEN Bing, ZHANG Yongjun. Review on connection mode and modeling of flexible DC power distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 1-8.
- [10] 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.
- [11] 刘振亚, 张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-10.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of national power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10.
- [12] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [13] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [14] 张悻宁, 罗易萍, 洪妍妍. 基于多端口混合直流断路器的 LCC-VSC 混合多端直流输电系统故障清除方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 146-153.
ZHANG Yining, LUO Yiping, HONG Yanyan. Multi-port DC circuit breaker-based fault clearing scheme for LCC-VSC hybrid multi-terminal HVDC systems[J]. Power

- System Protection and Control, 2021, 49(4): 146-153.
- [15] 娄彦涛, 袁妮, 刘琦. 高压直流输电晶闸管换流阀损耗仿真计算方法研究[J]. 高压电器, 2021, 57(1): 116-122, 128. LOU Yantao, YUAN Ni, LIU Qi. Study on simulation calculation method of power losses for HVDC thyristor valve[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 116-122, 128.
- [16] 王振, 任孟干, 国建宝, 等. 直流输电换流阀晶闸管过电压保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 182-187. WANG Zhen, REN Menggan, GUO Jianbao, et al. Research on overvoltage protection of a thyristor on DC converter valves[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 182-187.
- [17] 乔丽, 谢剑, 李云鹏, 等. 高压柔性直流换流阀工业设计[J]. 中国电力, 2020, 53(12): 198-205, 222. QIAO Li, XIE Jian, LI Yunpeng, et al. Industrial design of high voltage flexible DC converter valve[J]. Electric Power, 2020, 53(12): 198-205, 222.
- [18] 刘士利, 魏晓光, 曹均正, 等. 应用混合权函数边界元法的特高压换流阀屏蔽罩表面电场计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 180-186. LIU Shili, WEI Xiaoguang, CAO Junzheng, et al. UHVDC converter valve shielding case surface electric field calculation using hybrid-weight-function boundary element method[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 180-186.
- [19] 王星星, 罗潇, 齐磊, 等. 高压直流换流阀用绝缘子表面电场计算及均压环设计[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 289-296. WANG Xingxing, LUO Xiao, QI Lei, et al. Calculation of electric field distribution along composite insulator and design of grading ring of HVDC converter valve[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 289-296.
- [20] 潘晓彤, 王泽忠, 方舟, 等. 直流输电换流阀系统表面电场分析与均压环设计[J]. 现代电力, 2014, 31(1): 68-73. PAN Xiaotong, WANG Zezong, FANG Zhou, et al. Surface electric field intensity analysis of converter valve system and the design of grading ring for DC transmission[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(1): 68-73.
- [21] 金硕, 甘艳, 阮江军, 等. 特高压直流输电系统阀厅金具表面电场精细求解[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1299-1305. JIN Shuo, GAN Yan, RUAN Jiangjun, et al. Accurate calculation method of electric field on the surface of converter valve fittings in UHVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1299-1305.
- [22] 齐磊, 王星星, 李超, 等. ± 1100 kV 特高压直流换流阀绝缘型式试验下的电场仿真及优化[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1262-1271. QI Lei, WANG Xingxing, LI Chao, et al. Electric field simulation and optimization of ± 1100 kV HVDC converter valve in insulation type test[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1262-1271.
- [23] 董意锋, 常忠廷, 胡永雄, 等. 锡盟-泰州 ± 800 kV/6250 A 特高压直流输电换流阀优化设计及型式试验[J]. 电气应用, 2019, 38(4): 110-119. DONG Yifeng, CHANG Zhongting, HU Yongxiong, et al. Ximeng-Taizhou ± 800 kV/6250 A UHVDC converter valve optimization design and type testing[J]. Electrotechnical Application, 2019, 38(4): 110-119.
- [24] 杨晓平, 张艳梅, 赵朝伟. 柔性直流换流阀功率模块绝缘试验下的电场仿真分析[J]. 高压电器, 2017, 53(11): 63-70. YANG Xiaoping, ZHANG Yanmei, ZHAO Chaowei. Electric field simulation under the insulation test for flexible HVDC converter valve power module[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11): 63-70.
- [25] 胡秋玲, 范彩云, 韩坤, 等. 混合式高压直流断路器空间电场分布[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 424-431. HU Qiuling, FAN Caiyun, HAN Kun, et al. Space electric field for hybrid high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 424-431.
- [26] 西安西电电力系统有限公司. 高压直流输电用电压源换流器阀电气试验: GB/T 33348—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. Xi'an XD Power Systems Co., Ltd. Voltage sourced converter valves for high-voltage direct current power transmission-electrical testing: GB/T 33348—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

收稿日期: 2021-10-01; 修回日期: 2022-04-25

作者简介:

蒋冠前(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统控制保护技术研究和标准研究工作; E-mail: guanqianj@dlwg.net

吴红艳(1980—), 女, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 从事特高压直流输电技术研究工作; E-mail: wuhongyanxjgc@163.com

王帅卿(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事高压直流输电电磁均衡设计技术研究工作。E-mail: yucitongshi@126.com

(编辑 许威)