

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2026.01.008

基于弱式有限元法直流支撑电容器套管电场分析与优化设计

程杉¹, 陈正奇¹, 张海龙², 胡今昶², 王嘉成¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074)

摘要: 干式直流支撑电容器套管在长期承受直流偏置与高频纹波电压作用下, 易在伞裙内缘及衬圈界面等区域产生电场集中, 引发局部绝缘老化, 从而影响设备的长期运行可靠性。尽管其工频耐压裕度较高, 但电场分布的不均匀性仍是国产化设计中的关键问题。为提高套管电场分析的精度, 本文采用加权余量法弱化与有限元离散相结合的弱式求解框架, 构建适用于复杂几何和多介质结构的三维静电场模型, 并在高梯度区域采用局部网格加密以提升计算准确性。模型经工频耐压试验验证后用于结构优化分析。基于仿真结果提出的伞裙加深至 8 mm、衬圈下部厚度增至 15 mm 的方案, 可显著抑制局部场强并改善电场均匀性。研究结果为国产干式直流支撑电容器套管的结构设计、绝缘性能提升及工程应用提供了有效参考。

关键词: 直流支撑电容器; 套管; 有限元法; 静电场; 加权余量法; 有限元离散化

Electric Field Analysis and Optimization Design of DC-link Capacitor Bushings Based on the Weakform Finite Element Method

CHENG Shan¹, CHEN Zhengqi¹, ZHANG Hailong², HU Jinchang², WANG Jiacheng¹

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: The dry DC-link capacitor bushing, under the effect of long-term DC bias and high-frequency ripple voltages, is prone to electric-field concentration at such areas as inner edge of sheds and the interface of gasket rings, causes partial insulation aging and thus effects long term operation reliability of the equipment. Although the margin of its power frequency withstand voltage is higher, yet the non-uniformity of electric field distribution is still a key issue in localization design. For improving the accuracy of electric field analysis of bushing, a weak form framework combining the weighted residual method for weakening and finite element discretization is adopted, thereby constructing a three - dimensional electrostatic field model suitable for complete geometries and multi-medium structures, and the local mesh refinement is used in the high-gradient regions to enhance calculation accuracy. The model is used for structure optimization analysis after power frequency withstand voltage test verification. Based on the simulation result, a scheme is proposed to deepen the sheds to 8 mm and increase the thickness of the lower part of the gasket ring to 15 mm, which can significantly suppressure partial field intensity and improve electric field uniformity. The study results in this paper have provided effective guidance for structural optimization and insulation performance enhancement of localized dry DC-link capacitor bushing.

Keywords: DC-link capacitor; bushing; finite element method; electrostatic field; weighted residual method; finite element discretization

收稿日期:2025-11-18; 修回日期:2026-01-02

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5500-202058455A-0-0-00)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5500-202058455A-0-0-00)。

0 引言

柔性直流输电因具备独立的功率调节能力^[1-2]、低谐波特性和无需站间通信等优势,成为现代电网的重要发展方向^[3-4]。直流支撑电容器作为柔直系统的关键组成部分,承担电压支撑与滤波功能^[5-6],其套管需要在直流偏置以及高频纹波电压的长期作用下保持可靠绝缘性能,其运行稳定性对系统运行的可靠性具有直接影响^[7-8]。然而,目前国产高压直流支撑电容器在套管等核心组件的设计和制造技术上尚存在不足,亟需通过优化设计提升其绝缘性能和工程适用性,以实现国产化替代^[9-10]。

在电容器套管的设计过程中,固体绝缘作为绝缘系统中的薄弱环节^[11-13],易在高电场集中区域发生沿面闪络和击穿等故障,威胁设备长期运行的可靠性^[14]。为此,有必要建立高精度的三维静电场模型,对套管场强分布趋势进行模拟和分析^[15],对其结构优化提供理论依据和设计指导。

由于传统有限元法直接基于控制方程(强式形式)求解,要求解函数在整个区域具备较高的连续性和光滑性,且在场强梯度突变处容易产生数值不稳定或精度下降,为解决套管因其几何复杂性与介质多样性导致的电场分布难以精确模拟,本文采用加权余量法弱化与有限元离散构建三维静电场仿真框架^[16-17]。通过将二阶偏微分方程弱化为积分形式,降低了解函数在连续性和光滑性上的要求,显著提升了对复杂几何和多介质结构的适应性。结合精细化建模与局部网格加密策略^[18],模型能够准确捕捉伞裙内缘、衬圈界面等典型高场强区域的电场集中现象,为后续结构优化提供可靠依据。

值得注意的是,尽管现有套管在耐压方面通常具有一定裕度,但其局部电场分布仍存在明显不均匀性,尤其在伞裙内缘以及衬圈-绝缘子界面等区域存在场强突增。此类局部高梯度区域虽可能在标准耐压试验中不直接导致击穿,但会显著加速绝缘老化,降低长期运行可靠性,并增加局部放电与电痕发展的风险。因此,有必要在满足耐压水平的基础上进一步优化套管结构,以改善电场分布均匀性并提升运行寿命。

随后,通过绝缘子耐压击穿试验验证了仿真的准确性,基于仿真分析及对进口套管的对比,提出了针对伞裙和衬圈结构的优化方案,优化后的套管显著改善了电场分布,同时保证了长期运行的可靠性。

1 套管静电场控制方程及建模

1.1 套管结构分析

国产干式直流支撑电容器 D60/H40 型套管由绝缘子(套管)、中心导杆、衬圈、不锈钢盖板、纸板以及绝缘垫片等部分组成。考虑到电容器整体构造较为复杂,为了更清晰地研究 D60/H40 型套管,本文对电容器内部进行了适当简化,仅提取了如图 1 所示的套管剖面图,其中,标号 1 代表电容器外部箱体,在该视图中可视为一块不锈钢盖板,其下方平行部分为一层纸板,更下部则为电容的组成部分。在分析套管电气性能时,可将箱体内部电容部分忽略,只保留外壳本体,并集中对纸板以上部分进行精细化模型构建。

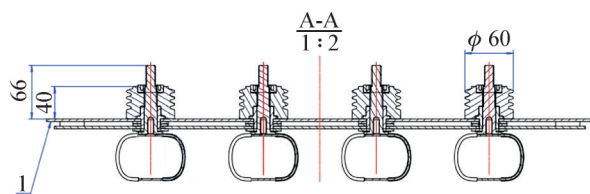


图1 电容器盖板部件剖面图
Fig. 1 Cross-sectional view of capacitor cover plate assembly

1.2 套管静电场控制方程

为准确反映套管在运行状态下的静电场分布,在建立包含导杆、绝缘子套管及衬圈在内的三维几何模型的基础上对各部分材料特性及边界条件进行定义。同时,采用弱式有限元求解框架对静电场控制方程进行离散化处理,以便在复杂几何与多介质界面条件下保持计算稳定性。

为提高外部绝缘子伞裙以及内部衬圈交界面区域的求解精度,模型中引入了局部网格加密策略,重点加强伞裙边缘和衬圈界面等电场集中区域的网格细化。剖分后的套管外表面及其内部整体网格如图 2 所示。基于该模型,可自然适配混合边界条件和多种材料特性,兼顾全局计算效率与局部模拟精度。

为建立干式直流支撑电容器套管的三维静电场分析模型,首先需要推导描述静电场分布的基本控制方程。推导过程参考了经典电磁场与有限元方法文献^[19-20]。根据麦克斯韦方程组中静态场条件,电位移矢量 $\vec{D}$ 满足高斯定律,即:

$$\nabla \times \vec{D} = \rho_{\text{free}} \quad (1)$$

式中: ρ_{free} 自由电荷密度, C/m^3 ; ∇ 为梯度算子,表示空间方向导数。

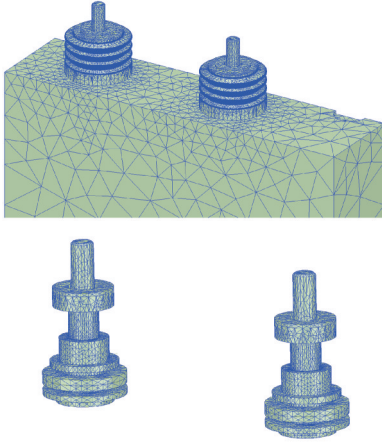


图2 电容器套管外部网格剖分图
Fig. 2 External mesh subdivision diagram of capacitor bushing

考虑套管无自由电荷分布,式(1)可变为

$$\nabla \times \vec{D} = 0 \quad (2)$$

$\vec{D}$ 与电场强度矢量 $\vec{E}$ 之间满足关系

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3)$$

式中, ε 为介质的绝对介电常数, F/m。

静电场中, $\vec{E}$ 与电势函数 φ 满足负梯度关系为

$$\vec{E} = -\nabla \varphi \quad (4)$$

通过式(4)可得出各点电场强度大小及方向。在后续处理中,可生成电场矢量分布图、电场等值线图以及电场强度云图,以识别电场集中的高风险区域,为后续结构优化提供依据。

将式(4)代入式(3)中,电位移矢量可以表达为

$$\vec{D} = -\varepsilon \nabla \varphi \quad (5)$$

再将式(5)代回控制方程式(2)中,可推导得到静电场基本控制方程为

$$\nabla \times (\varepsilon \nabla \varphi) = 0 \quad (6)$$

为便于式(6)的数值求解,采用加权余量法对控制方程弱化处理。引入一组测试函数 ω , 将控制方程乘以 ω 后在区域积分,得:

$$\int_{\Omega} \omega \nabla \times (\varepsilon \nabla \varphi) d\Omega = 0 \quad (7)$$

式中, ω 为测试函数,与电势函数属于同一函数空间。

为了降低对式(7)求解的连续性要求以便于有限元离散,通过高斯散度定理进行展开,得:

$$\int_{\Omega} \omega \nabla \times (\varepsilon \nabla \varphi) d\Omega = \int_{\partial\Omega} \omega \varepsilon \nabla \varphi \times \vec{n} dS - \int_{\Omega} \varepsilon \nabla \omega \times \nabla \varphi d\Omega \quad (8)$$

式中: $\partial\Omega$ 为求解区域边界; $\vec{n}$ 为外法向量矢量, dS 表示边界面积元素。

若 ω 在 Dirichlet 边界上为零,则边界项消失,式(7)可最终简化为

$$\int_{\Omega} \varepsilon \nabla \varphi \nabla \omega d\Omega = 0 \quad (9)$$

此式为静电场有限元法求解的基本弱式表达式。

为了离散化处理, φ 在区域内采用节点 i 的形函数 N_i 行插值表示为

$$\varphi^h(x, y, z) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) \varphi_i \quad (10)$$

式中: φ_i 为节点上的自由度电位值; n 为单元节点总数。

同理, ω 同样采用 i 的形函数插值为

$$\omega^h(x, y, z) = \sum_{j=1}^n N_j(x, y, z) \omega_j \quad (11)$$

代入式(9)并展开,最终得到全局离散代数方程组为

$$[K]\{\varphi\} = \{0\} \quad (12)$$

式中: $[K]$ 为整体刚度矩阵; $\{\varphi\}$ 为节点自由度电位向量。

单个刚度矩阵元素定义为

$$K_{ij} = \int_{\Omega} \varepsilon \nabla N_i \times \nabla N_j d\Omega \quad (13)$$

式中, K_{ij} 表示第 i 个节点与第 j 个节点之间的相互作用刚度。

1.3 边界条件设定以及模型简化

由于电容器套管的结构参数完全一致,且模型整体呈对称分布,但套管总体细节呈现上并非严格旋转对称结构,为了提升仿真效率并降低冗余计算量,因此可以利用适当的边界条件进行简化,本文基于电容器套管的结构对称性,建立了如图3所示的1/4三维有限元模型。在边界条件设置方面,导杆与螺母施加 Dirichlet 边界条件,导杆与圆螺母表面施加等效电压 7 071.07 V (对应交流 5 000 V 有效值的峰值电压);不锈钢外壳及空气远场边界赋零电位,以模拟接地条件。Dirichlet 边界条件直接规定电势数值,确保内部形成正确的电场分布,体现高压端与接地端之间的实际工作状态。

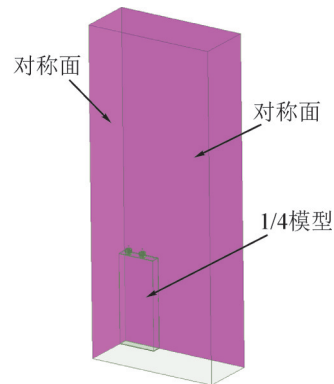


图3 有限元模型示意图
Fig. 3 Schematic diagram of finite element model

在模型对称面上施加偶对称边界条件,即施加 Neumann 边界(法向电势梯度为零),以模拟镜像对称特性。同时,空气域远端施加零电位,近似模拟开域无限空间。

此外,各组成部件的相对介电常数根据材料实际属性分别设定,如表 1 所示。其中,导体部件(导杆、螺母、外壳)作为理想等势体处理,内部无需指定介电参数,直接赋固定电位值进行建模。

表 1 材料参数
Table 1 Material parameters

结构	材料类型	相对介电常数
空气域	空气	1
绝缘子	SMC	3.7
中心导杆、圆螺母	H62	—
绝缘垫片	环氧树脂	3.68
绝缘环片	环氧树脂	3.68
衬圈	硅橡胶	3
环氧隔板	环氧树脂	3.68
不锈钢铁板	304 不锈钢	—

通过上述合理的边界条件设置与结构简化,不仅保障了仿真模型的物理真实性,在计算效率和求解稳定性方面也有明显提升。

仿真求解完成电势分布后,可进一步提取电场强度,套管局部静电能量密度 W 可以表示为

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon |E|^2 \quad (14)$$

2 仿真计算与分析

2.1 电容器套管整体电场仿真结果分析

根据式(6)得出绝缘导杆的电位分布规律后,通过式(7)–(12)进行加权余量法弱化和有限元离散,得到数值求解形式,对式(12)进行求解节点电位分布 φ ,再基于式(14)得到静电场分布,绘制电容器套管整体电位分布与电场分布如图 4 所示。从图 4 可见,中心导杆电位云图呈红色,电位仿真施加的激励电位一致,绝缘子表面电位沿面逐渐下降,而不锈钢外壳上的电位则为 0。整体来看,模型的电位云图过渡均匀,分布趋势与仿真激励和边界条件吻合,说明计算结果和精度均满足工程要求。

电场云图中显示的最大场强为 2.31×10^6 V/m,但该数值未在图中直接标注,故推测最大电场位于套管内部。基于此,绘制电容器电位与电场分布的剖面图,同时,对套管附近区域的电场分布进行了放大展示,如图 5 所示。

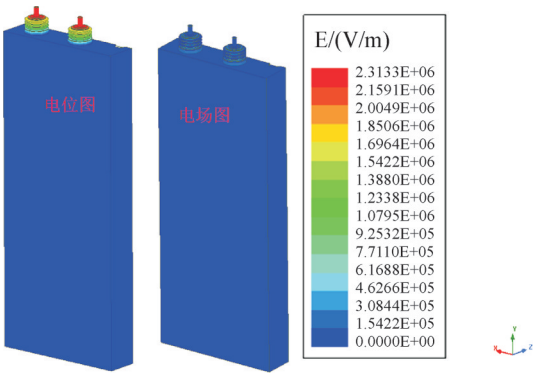


图 4 电容器整体仿真结果分布云图
Fig. 4 Overall simulation result contour plot of capacitor

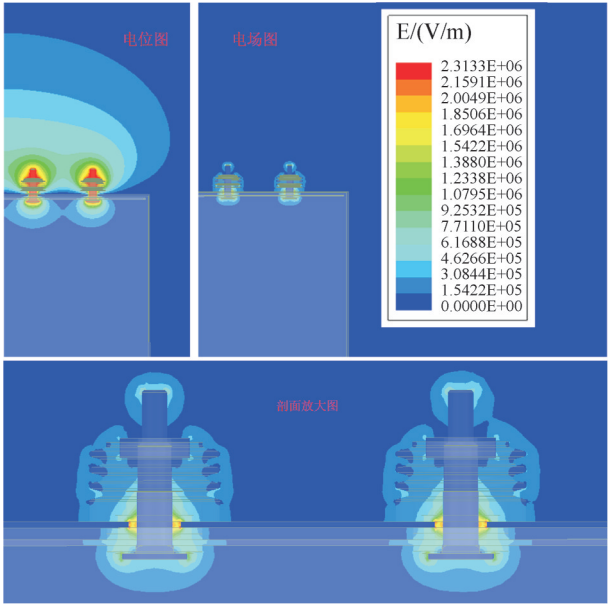


图 5 电容器整体及放大剖面结果分布云图
Fig. 5 Overall and enlarged cross-sectional simulation result contour plots of capacitor

通过剖面图分析可知,最大电场强度位于衬圈与不锈钢外壳的交界处。衬圈内侧毗邻高电位的导杆,而外侧则接近 0 电位的不锈钢外壳,再加上衬圈本身较薄,使得此处出现最大电场强度既合理又与理论分析保持一致。但由于该区域电场强度较高,因而使得整个场域其他位置的云图色差不明显。

2.2 场强分布趋势剖析

2.2.1 绝缘子电场

电容器套管绝缘子内外表面电场分布图见图 6。从图 6 可知,绝缘子外表面的最大电场强度主要位于绝缘子最下方伞裙的凹陷处,最大值约为 3.70×10^5 V/m,原因是最下方伞裙距离不锈钢外壳比较近,且凹陷处的局部模型曲率较大,因此该处场强较大。因为两个套管所处的位置不同,故其绝缘子电场强度分布是不同的,且单个套管绝缘子沿着轴向

上的电场强度也是不同的,同时绝缘子内部电场强度的最大值出现在绝缘子内表面与衬圈的交界处,约为 6.16×10^5 V/m。该现象主要是由于该区域为拐角结构,同时距离中心导杆和不锈钢外壳较近,导致电位差显著,从而使得电场强度明显增大。

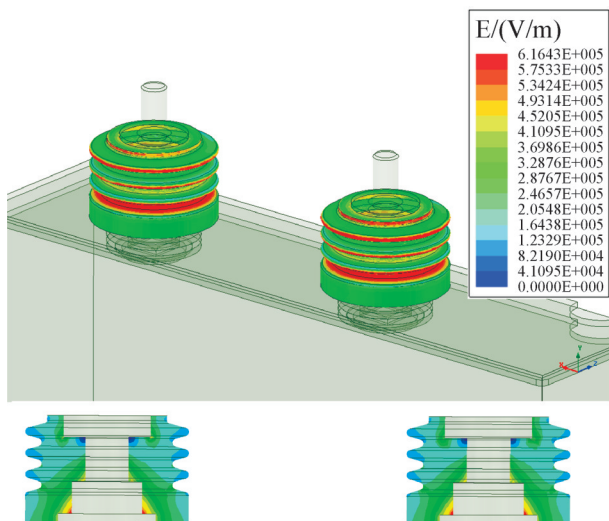


图6 电容器套管绝缘子内外表面电场分布图

Fig. 6 Electric field distribution on the inner and outer surfaces of capacitor bushing insulator

为了便于结果分析,将两侧绝缘子外表面与内表面的电场强度绘制成线图。考虑到绝缘子闪络主要受外表面电场竖直分量的影响,因此在绘制外表面电场时,除了绘制电场模值,还同时绘制了竖直分量。

电容器套管绝缘子外表面路径上的电场强度分布如图7所示。

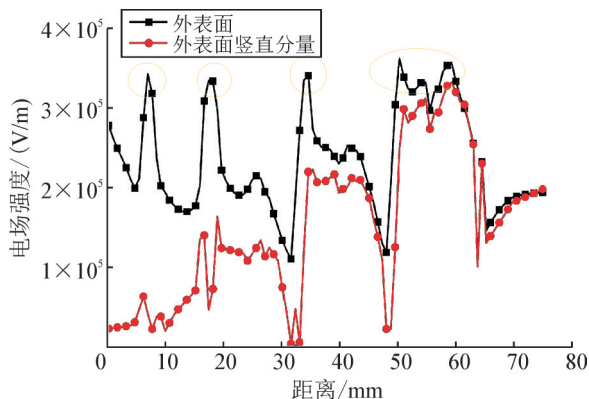


图7 绝缘子外表面路径上的电场强度分布图

Fig. 7 Electric field intensity distribution diagram along the outer surface path of insulator

本文关注于分析路径上电场最大值的出现位置与取值。观察图7的黑色线条可知,路径上出现电场较大值的位置可以分为4个区域。这4个区域从左至右分别对应:绝缘子顶部的拐角、绝缘子第1个伞裙的凸起处、第2个伞裙的凸起处以及第3个伞

裙的凹陷处。其中,第3个伞裙凹陷附近的电场强度略高于其他区域,最大值约为 3.7×10^5 V/m。

进一步观察图7所示的红色线条可以发现,绝缘子外表面电场强度的竖直分量整体随距离增加而逐渐增强,并在60 mm处达到最大值,约 3.4×10^5 V/m^[21]。该位置同样对应绝缘子最下层伞裙凹陷处。原因在于,绝缘子越往下,其与不锈钢外壳的距离越近,电场强度的方向就越趋向于竖直,对比60 mm处之后的两条曲线数据基本一致,表明此时电场强度几乎完全呈现竖直分布。

内表面路径上的电场强度如图8所示。

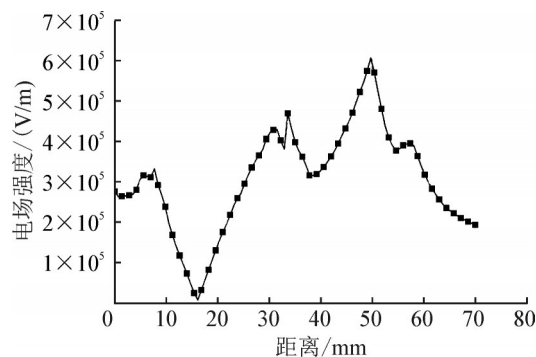


图8 绝缘子内表面电场分布图

Fig. 8 Electric field distribution on the inner surface of insulator

由于内表面路径整体较为规则,且紧贴导体,受其周围其他套管的影响很小,此时电场强度最大值位于50 mm处,对应绝缘子内表面和衬圈的交界处,与图6所示的剖面图保持一致,最大场强约为 6.2×10^5 V/m。

2.2.2 衬圈电场

由于整体结构中电场强度最大处出现于衬圈处,因此绘制出衬圈表面电场强度分布图,如图9所示。

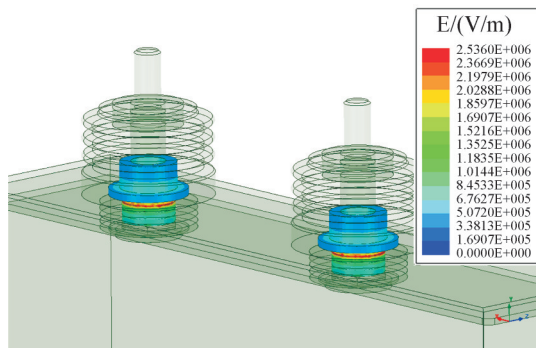


图9 衬圈表面电场强度云图

Fig. 9 Electric field intensity contour plot on the surface of the gasket ring

从细节图可以发现,衬圈的最大电场强度集中在一个环状区域内,此区域对应衬圈与不锈钢铁板

交界面,最大电场强度约为 2.3×10^6 V/m。原因在于衬圈内侧紧邻高电位的导杆,外侧与 0 电位的不锈钢外壳接触,而衬圈的厚度又很小,因此场强较高。

在衬圈内外表面从上到下各取一条路径,画出外表面的电场与竖直分量电场分布如图 10 所示。

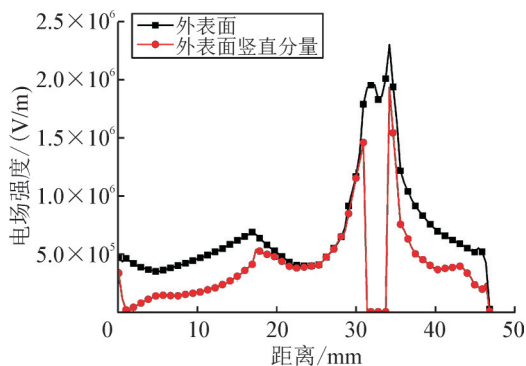


图 10 衬圈外表面路径电场强度分布图
Fig. 10 Electric field intensity distribution on the outer surface path of the gasket ring

由图 10 可得,衬圈外表面路径上的电场强度最大值位于 30~35 mm 处,对应于衬圈外表面与不锈钢外壳接触的位置,由于与导体接触,电场沿着与导体接触面的法向分布,因此该处的竖直分量为 0。

衬圈内表面路径上的电场强度分布如图 11 所示。

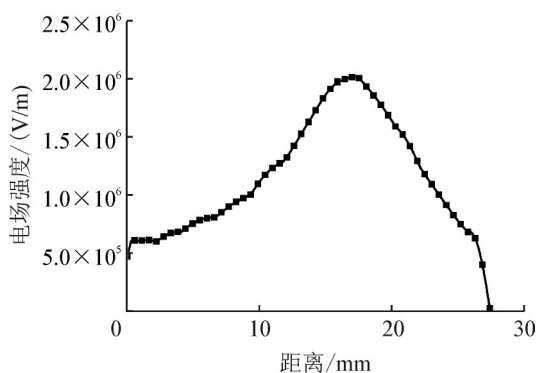


图 11 衬圈内表面路径电场强度分布图
Fig. 11 Electric field intensity distribution on the inner surface path of the gasket ring

对比图 10 与图 11,可以发现,衬圈外表面电场最大值大于内表面,因此在校验电场时,以外表面为主。

理论上,衬圈位于套管内部,若密封完好,没有空气侵入,可以耐受的极限电场强度为其本体材料的绝缘强度,约为 3.5×10^7 V/m,本文仿真得到的衬圈最大电场为 2.3×10^6 V/m,小于材料的耐受场强。

需要注意的是,本文的仿真实验中,电容器整体模型均基于理想情况构建,不同材料之间假设为

紧密相连。然而在实际应用中,各种材料间总会存在一定的配合间隙,在其界面上可能形成空气层。因此,在实际试验验证过程中,仿真结果总会与实际现象出现部分偏差。

2.3 耐压试验验证

为验证有限元静电场仿真结果的可靠性,本文根据 GB/T 1001.1—2021^[22]开展了工频击穿试验。试验样品选用工频击穿场强较低的电木材料,以便于在较低电压下观察结构薄弱区域的绝缘性能。在工频击穿试验中,如图 12 所示,首次击穿发生在绝缘子最上方伞裙凹陷处,击穿电压为 57.0 kV;同时在衬圈与绝缘子交界面出现明显气隙击穿。



图 12 套管击穿点展示
Fig. 12 Breakdown point display of bushing

仿真结果显示,外部电场在 3 个伞裙内缘均存在集中效应,最下端略高于中上部分,由于衬圈的存在提高了中下端伞裙的实际耐压水平,导致击穿点上移,但同时衬圈与绝缘子交界面也出现了明显的气隙击穿现象

综合耐压试验结果,击穿位置与仿真高场区域一致(伞裙内缘)。虽然耐压裕度大,但试验无法反映纹波电压、局部热-场耦合等长期工况,因此结构优化仍具有必要性。

3 套管结构优化

在前述静电场仿真分析基础上,本章围绕干式直流支撑电容器套管关键结构参数对电场分布的影响开展结构优化研究。仿真结果表明,套管电场在伞裙内缘及衬圈—绝缘子界面等区域存在明显集中现象,其分布特征与导杆几何尺寸及相关结构参数的相对位置关系密切相关。

鉴于导杆作为高电位电极,其直径和结构形式受电流容量及装配条件等工程因素约束,难以在优化过程中调整,本文在结构优化分析中保持导杆尺寸不变,重点对伞裙深度及衬圈结构参数进行优化,以改善局部电场分布并兼顾工程兼容性。

为清晰说明各结构参数的几何定义方式及其与导杆之间的相对位置关系,图 13 给出了套管关键结构参数及导杆—衬圈装配关系示意图。图中左侧为套管剖面结构及伞裙、衬圈尺寸标注,右侧为导杆结构及其与衬圈的装配示意。通过该图可以直观反映伞裙深度、衬圈尺寸与导杆直径之间的几何约束关系,为后续结构参数优化及电场机理分析提供结构基础。

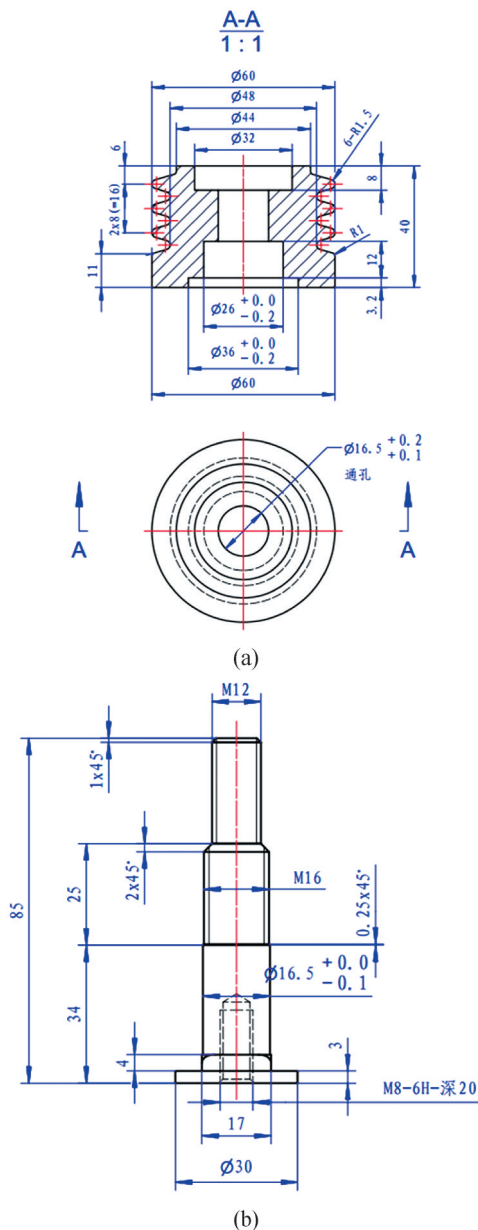


图 13 套管绝缘子与中心导杆的具体结构参数图
Fig. 13 Detailed structural parameters diagram of the bushing insulator and central conductive rod

3.1 对绝缘子爬电距离的优化

如图 13 所示,伞裙深度定义为伞裙内缘沿轴向的有效绝缘长度,其变化直接影响套管外表面的爬电路径及局部电场分布特性。本章在保持导杆及衬圈结构参数不变的前提下,对伞裙深度进行参数化优化分析。

原始电容器套管的伞裙深度为 6 mm,现给出逐步深化的 3 种方案,分别为:加深到 7 mm、加深到 8 mm、加深到 9 mm。对优化后的电容套管进行同样的静电场计算,不同优化方案与原模型的绝缘子外表面路径电场强度竖直分量对比如图 14 所示。

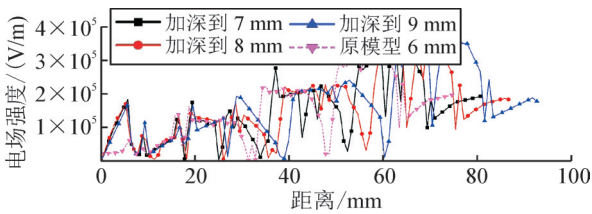


图 14 不同优化方案与原模型绝缘子外表面电场强度竖直分量分布图
Fig. 14 Distribution diagram of the vertical component of electric field intensity on the outer surface of the insulator for different optimization schemes and the original model

可以看到,由于伞裙加深使得最大电场强度发生了变化,同时爬电距离也发生了变化,因此 4 条曲线的终点都不一样。将优化前后绝缘子在最大竖直分量、爬电距离、爬电比距进行对比,结果见表 2。

表 2 绝缘子不同优化方案数据对比
Table 2 Data comparison of different optimization schemes for insulator

方案	最大电场强度 竖直分量/(kV/cm)	爬电距离 /mm	爬电比距 /(mm/kV)
原模型 6 mm	3.40	74.66	14.93
加深到 7 mm	3.52	80.72	16.14
加深到 8 mm	3.68	86.76	17.35
加深到 9 mm	3.84	92.79	18.56

对比表 2 中的数据可知:

- 1) 优化前后的绝缘子电场强度竖直分量都低于闪络电场,表明都在安全裕度之内。
- 2) 优化后,绝缘子的爬电距离和爬电比距都明显增大。
- 3) 加深伞裙深度后可以显著提升爬电距离,但相应的最大场强也略微增大。

综合考虑各项因素,选择加深 8 mm 比较合适,爬电距离比优化前增加了 16.2%,但最大电场强度仅上升 8.2%。

3.2 对电容套管衬圈的优化

在伞裙结构优化的基础上,进一步对衬圈结构参数进行优化分析。由图 13 可知,衬圈与导杆之间形成的径向间隙是影响底部界面电场分布的关键几何因素。本节在导杆直径保持不变的条件下,通过调整衬圈厚度,研究其对局部电场强度的调节作用,故此本文提出 3 种衬圈优化方案:将衬圈下部厚度依次加至 14 mm、15 mm 和 16 mm,在伞裙深度加深至 8 mm 情况下对各方案进行静电场仿真计算。不同优化方案与原模型的衬圈外表面路径电场强度竖直分量对比如图 15 所示。

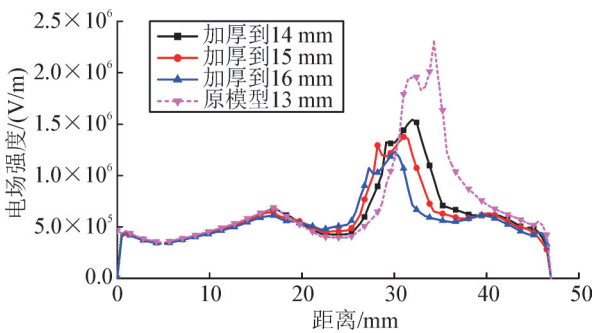


图 15 衬圈不同优化方案外表面路径电场强度分布图
Fig. 15 Electric field intensity distribution on the outer surface path of the gasket ring for different optimization schemes

由图 15 可知,按照不同方案优化后的衬圈电场强度均低于优化前,优化效果显著。将优化前后的衬圈仿真结果进行最大电场强度对比,结果见表 3。

表 3 衬圈不同优化方案数据对比
Table 3 Data comparison of different optimization schemes for the gasket ring

方案	最大电场强度/ (竖直分量 kV/cm)	变化率/ (场强/mm)
原模型 12 mm	23.0	—
加厚到 14 mm	15.4	-3.8
加厚到 15 mm	13.7	-1.7
加厚到 16 mm	12.5	-1.2

由表 3 可以看出:

1) 优化后的衬圈外表面最大电场强度不但低于优化前,且均不超过材料本身的击穿场强,表明都在安全裕度之内。

2) 随着衬圈外半径厚度的增加,最大电场强度逐渐减小,但减小的幅度越来越低,综合考虑,建议将衬圈的厚度增加至 15 mm。

4 结语

本文构建了基于弱式有限元与局部网格加密

的三维电场建模方法,可准确识别套管结构中的高场区域。基于电场分布特点提出了伞裙深度和衬圈厚度的优化方案,优化后局部场强显著降低,且未出现新增的放电风险。研究结果可为国产干式直流支撑电容器绝缘端子的设计优化及长期运行可靠性提升提供工程参考。

鉴于本文模型主要关注静电场分布,尚未涵盖纹波电压引起的电-热耦合效应及绝缘老化等长期过程。未来将结合实际运行特性开展多物理场耦合分析,为进一步完善国产化绝缘端子结构的设计体系和性能评估方法提供支撑。

参考文献

[1] 董旭柱,华祝虎,尚磊,等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术,2021,47(9):3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.

[2] 高磊,张慧媛,许军,等. 海上柔性直流输电系统的宽频带振荡非同时性研究[J]. 电测与仪表,2024,61(7):50-56.
GAO Lei, ZHANG Huiyuan, XU Jun, et al. Asynchronous characteristics research of wideband oscillation in offshore windfarms connected to MMC-HVDC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 50-56.

[3] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.

[4] 曹玉石,张慧媛,许军,等. 基于行波相位特征的海上风电柔直电缆故障保护方法的研究[J]. 电测与仪表,2024, 61(7):81-87.
CAO Yushi, ZHANG Huiyuan, XU Jun, et al. Research on fault protection method of offshore wind power flexible direct cablebased on traveling wave phase characteristics[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 81-87.

[5] 孙晓武. 环境温度对直流支撑电容器温升影响的研究[J]. 电工电气,2020(2):51-53.
SUN Xiaowu. Study on influence of ambient temperature on temperature rise of DC link capacitor[J]. Electrotechnics Electric (Jiangsu Electrical Apparatus), 2020(2):51-53, 61.

[6] 李维维,高琪,芦锋. 柔性直流输电工程用直流支撑电容器的开发探讨[J]. 电力电容器与无功补偿,2017,38(3):95-98.
LI Weiwei, GAO Qi, LU Feng. Discussion on the development of DC-link capacitor for flexible HVDC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(3): 95-98.

[7] 孙晓武,李印达,曹崇峰. 空气湿度对直流支撑电容器元件性能影响的研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2020, 41(4):51-56.
SUN Xiaowu, LI Yinda, CAO Chongfeng. Study on the in-

- fluence of air humidity on DC link capacitor element[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 51-56.
- [8] 杨惠兰,侯涛,刘淳. 金属膜电容老化特性及寿命模型研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2020, 10(8): 20-22.
YANG Huilan, HOU Tao, LIU Zhun. Volume characteristics and life model of metal film capacitance[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2020, 10(8): 20-22.
- [9] 刘刚,姚成,贾磊. 温湿度联合作用下金属化膜电容器的寿命预测[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 35-39.
LIU Gang, YAO Cheng, JIA Lei. Life prediction of metalized film capacitor under the combined action of temperature and humidity[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 35-39.
- [10] 雷万钧,刘进军,吕高泰,等. 大容量电力电子装备关键器件及系统可靠性综合分析与评估方法综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3353-3361.
LEI Wanjun, LIU Jinjun, LYU Gaotai, et al. Review of reliability comprehensive analysis and evaluation methods for key components and system of large capacity power electronic equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3353-3361.
- [11] 金硕,阮江军,朱琳,等. 基于臭氧检测法的电晕起始电压测量方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 4020-4025.
JIN Shuo, RUAN Jiangjun, ZHU Lin, et al. Measurement method of corona onset voltage based on ozone detection technology[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 4020-4025.
- [12] 杜志叶,田雨,金硕,等. 大规模复杂模型电场计算的快速精细化有限元数值建模[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7166-7173.
DU Zhiye, TIAN Yu, JIN Shuo, et al. A fast finite element numerical modeling method for the calculation of electric field in large scale complex model[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7166-7173.
- [13] 侯智剑,徐梦蕾,王荀,等. 超级电容器内部静电场仿真及其影响因素分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(1): 84-89.
HOU Zhijian, XU Menglei, WANG Xun, et al. Analysis on internal electrostatic field simulation and influencing factors of super capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(1): 84-89.
- [14] 张文凯,吴小钊,郑亚利,等. 基于静电场分析的固封极柱局部放电研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3858-3865.
ZHANG Wenkai, WU Xiaozhao, ZHENG Yali, et al. Research on embedded pole partial discharge based on electrostatic field analysis[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3858-3865.
- [15] 郑劲,孔巾娇,梁红胜,等. 特高压换流变压器阀侧出线绝缘结构电场分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3526-3532.
ZHENG Jin, KONG Jinjiao, LIANG Hongsheng, et al. Electric field analysis for valve-side lead-out insulation structure of UHVDC converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3526-3532.
- [16] 张维凯,孙强,葛延鹏,等. 基于NSGA-II算法的GIS隔离开关盆式绝缘子电场分布和机械性能综合优化[J]. 高电压技术, 2025, 51(1): 336-345.
ZHANG Weikai, SUN Qiang, GE Yanpeng, et al. Integrated optimization of electrical field distribution and mechanical performance of basin-type insulator in GIS disconnector based on NSGA-II[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 336-345.
- [17] 刘招成,崔翔,李学宝,等. 高压大功率IGBT器件绝缘结构的电场计算研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(1): 214-230.
LIU Zhaocheng, CUI Xiang, LI Xuebao, et al. Review on the electric field calculation of insulation structure of high-voltage and high-power IGBT device[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 214-230.
- [18] 杨新生,张云鹏,徐桂芝,等. 基于T- ψ 有限元法的多目标函数变压器优化设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(z1): 75-83.
YANG Xinsheng, ZHANG Yunpeng, XU Guizhi, et al. Multi-objective optimization design of transformer base on T- ψ finite element method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(z1): 75-83.
- [19] 萨迪库. 电磁学[M]. 纽约: 牛津大学出版社, 2018.
- [20] 拉奥 S S. 工程有限元方法[M]. 阿姆斯特丹: 爱思唯尔出版社, 2017.
- [21] 郝震,江长明,李欢,等. 基于变压器套管升高座处电流互感器的高频局部放电监测技术[J]. 高电压技术, 2025, 51(3): 1126-1134.
HAO Zhen, JIANG Changming, LI Huan, et al. High-frequency partial discharge monitoring technology based on TAs in transformer bushing risers[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1126-1134.
- [22] 交流电气装置的绝缘配合 第1部分: 定义、原则和规则: GB/T 1001.1—2021[S]. 2021.
Insulation coordination for AC electrical installations—Part 1: Definitions, principles and rules: GB/T 1001.1—2021[S]. 2021.

作者简介:

程杉(1981—),男,教授,主要研究方向为电动汽车、新能源并网、电力电子器件与绝缘技术。E-mail:hpucquyzu@ctgu.edu.cn。