第 49 卷 第 1 期：179-187　　高电压技术　　Vol.49, No.1: 179-187
2023 年 1 月 31 日　　High Voltage Engineering　　January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211368

含有非线性电场均化层的高压套管电场分布特性

何金良，孙　岗，袁之康，黄智文，胡　军
（清华大学电机工程与应用电子技术系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室，北京 100084）

摘　要：直流套管是制约我国直流输变电技术发展和安全可靠运行的主要因素之一。该文提出了含有非线性电场均化层的高压套管技术路线，仿真研究了接地屏位置、长度以及非线性电场均化层几何尺寸、材料参数对高压套管电场分布的影响规律。分析表明：接地屏的位置和长度主要影响导杆表面电场值及其电场集中区域范围；电场均化层的长度、非线性参数、位置会对套管内部及表面电场分布产生显著影响；更长的电场均化层、较低的非线性材料阈值场强以及更远的电场均化层到导杆表面的距离均能有效均化套管电场。直流电场下含有非线性电场均化层的高压套管电场分布与交流电场下存在较大差异，具有高阈值场强的非线性电场均化层均场效果更优。非线性均压层能够有效改善高压套管的电场分布，无需采用电容均压结构。该工作将为非线性复合材料在高压套管中的应用提供参考。

关键词：非线性复合材料；高压套管；电场均化层；电场分布；阈值电场

Electric Field Distribution Characteristics of High-voltage Bushing with Nonlinear Electric Field Grading Layer

HE Jinliang, SUN Gang, YUAN Zhikang, HUANG Zhiwen, HU Jun
(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: DC bushing is one of the main factors that restrict the development and safe operation of DC power transmission and transformation technology in China. This paper presents a technical route of high-voltage (HV) bushing with nonlinear electric field grading layer. The influence of the position and length of grounding plate, geometric size and nonlinear parameters of electric field grading layer on electric field distribution of HV bushing is studied by simulation. The analysis reveals that the position and length of grounding plate mainly affect the value and concentration area of electric field on the conducting rod surface. The length, nonlinear parameters and position of electric field grading layer have significant influence on the electric field distribution inside and on the surface of the bushing. The longer electric field grading layer, lower threshold electric field of nonlinear material and longer distance from the electric field grading layer to the surface of the conducting rod will lead to a good electric field grading effect. The electric field distribution of HV bushing with nonlinear electric field grading layer under DC differs significantly from that under AC. The electric field grading layer with higher threshold electric field shows better electric field grading effect. This work shows that the nonlinear electric field grading layer will effectively grading the electric field distribution in HV bushing without capacitive electric field grading structure. It will provide reference for the application of nonlinear material in HV bushing.

Key words: nonlinear composites; high-voltage bushing; electric field grading layer; electric distribution; threshold electric field

0　引言

在电力系统中，当高压载体需要穿过与其电位不同的墙体或金属壳体时，需要高压套管[1]。套管是一种典型的“插入式”结构电气设备，即由高压电极导杆插入地电极法兰的中心构成，是具有强垂直电场分量的极不均匀电场。法兰处局部场强过大，容易造成绝缘材料的老化，甚至发生击穿，影响绝缘性能。同时，套管表面轴向场强分布不均，电场主要集中在靠近法兰一侧，因此容易导致沿面闪络的发生[2-3]。

目前，超特高压变压器/换流变、穿墙套管主绝

基金资助项目：国家电网有限公司总部科技项目 (SGTYHT/17-JS-199)；国家自然科学基金智能电网联合基金 (51921005；U1766221)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (SGTYHT/17-JS-199), Smart Grid Joint Funds of National Natural Science Foundation of China (51921005, U1766221).

缘采用电容式结构进行均压，该结构对生产工艺、产品质量提出了极高的要求[4-5]。国产超特高压直流套管尽管在技术上取得了一定的突破，但至今仍然未在实际直流工程中进行现场应用，尚未改变我国超特高压直流套管长期由国外供货商完全垄断的困境[6-7]。即使是国外供应商供货的高端直流套管产品，在实际工程中也存在不少问题[8-10]。目前，直流套管已经是制约我国直流输变电技术发展和安全可靠运行的主要因素之一。

近年来，非线性复合材料因其电导或介电特性对空间电场数值的依赖性，能够实现材料性能参数与空间电场大小的自适应匹配，具有在非均匀电场下自适应均化电场分布的功能而受到广泛关注。已有报道对使用非线性复合材料均匀电力电子器件[11]、绝缘子[12]、电缆终端[13]等高压设备中的场强进行了讨论。文献[14]在此基础上提出了将非线性复合材料应用于高压套管，均匀其空间电场分布的设想。然而，目前尚缺乏非线性材料几何尺寸、材料属性等对高压套管电场分布影响规律的研究。

本文将利用仿真手段研究含有非线性电场均化层的高压套管电场分布特性，参考现有套管几何尺寸，建立含非线性电场均化层的高压套管模型，研究非线性均压层长度、非线性参数、位置等对套管电场分布的影响规律，并研究交流和直流下套管电场分布的差异。本工作将为非线性复合材料在高压套管中的应用提供参考。

1 套管结构及仿真模型

1.1 含有电场均化层的高压套管结构

本文提出了含有电场均化层的高压套管结构，包括导杆、主绝缘层、接地屏、电场均化层，其剖面如图 1 所示。高电压施加于金属导杆。主绝缘层由具有高耐电强度的绝缘材料制成。电场均化层由非线性复合材料组装而成，位于主绝缘层内部。接地屏通过金属引线与地相连，被电场均化层包覆。法兰位于主绝缘层外侧，法兰与电场均化层被主绝缘层隔开。

1.2 高压套管电场仿真模型

参考某交流 126 kV/630 A 套管的几何尺寸，选取外直径为 50 mm 铜导杆，法兰两侧的绝缘长度分别为 1140 mm 和 885 mm，法兰长度 130 mm，法兰盘外直径 400 mm，芯体直径为 150 mm。在 COMSOL Multiphysics 中建立套管芯体的二维轴对称模型，将模型设置于高 10 m，半径 2 m 的圆柱形空气域内。

表 1 列出了仿真模型中套管各部件材料以及空气的介电常数和电导率。其中，非线性材料的电导率为指数函数[15]，σ_0 为复合物在绝缘状态下的电导率，单位为 S/m，A 为电场系数，E 为材料所承受的电场强度。σ_0 和 A 由材料配方决定。本文选取了具有不同配方的 3 种非线性复合材料 S1、S2 和 S3，表 2 列出了 3 种材料的电导率参数，其非线性电导(电流密度–电场强度)曲线如图 2 所示，3 种材料分别在不同电场下进入非绝缘态，其阈值电场 S1>S2>S3。

2 接地屏设置对电场分布的影响

首先，在不考虑电场均化层设置的情况下研究接地屏对高压套管电场分布的影响。套管芯体结构如图 3 所示，导杆与主绝缘长度均为 2155 mm。为了便于后续位置描述，在图 3 中建立直角坐标系，原点位于导杆与主绝缘的交界处，沿导体表面向右

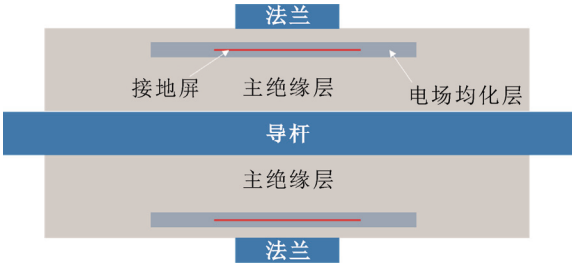


图 1 含有电场均化层的高压套管芯体结构

Fig.1 Structure of high voltage bushing core with electric field grading layer

表 1 模型各部分材料及参数

Table 1 Materials and electric parameters of different parts in the model

部件	相对介电常数	电导率/(S·m^{-1})
接地屏、导杆、法兰	10^5	6×10^7
主绝缘层	4	1×10^{-14}
电场均化层	30	$\sigma_0 e^{AE}$
空气	1	1×10^{-15}

表 2 非线性复合材料电导参数

Table 2 Conductance parameters of nonlinear composites

材料	σ_0 /(S·m^{-1})	A
S1	3.64×10^{-12}	7.34×10^{-6}
S2	1.47×10^{-10}	9.11×10^{-6}
S3	8.19×10^{-10}	1.32×10^{-5}

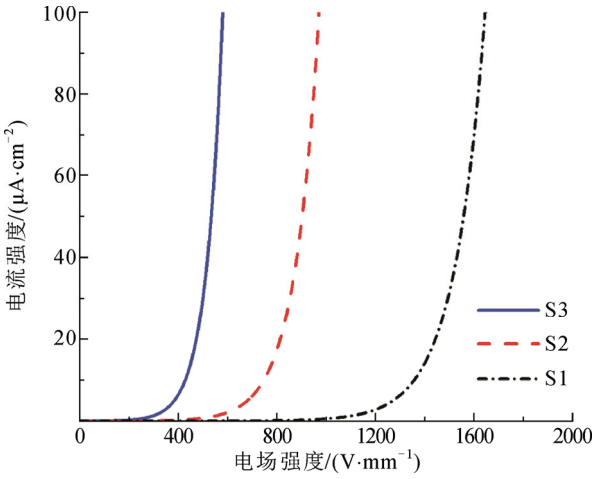


图 2　不同非线性复合材料电导曲线

Fig.2　Conductivity curves of nonlinear composites

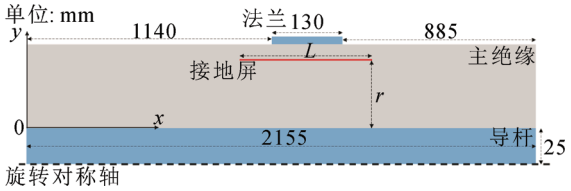


图 3　无电场均化层的套管芯体结构图

Fig.3　Structure of the bushing core with no electric field grading layer

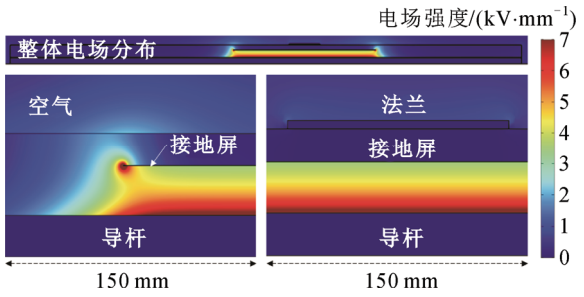


图 4　无电场均化层的套管电场分布

Fig.4　Electric field distribution of bushing with no electric field grading layer

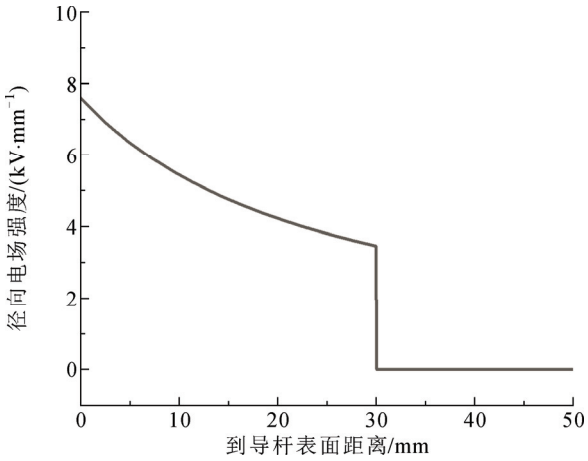


图 5　绝缘芯中径向电场分布

Fig.5　Radial distribution of electric field in bushing core

为 x 轴正方向，沿导杆表面向主绝缘表面方向为 y 轴正方向。接地屏水平中心与法兰水平中心具有相同的横坐标 x=1205 mm，令接地屏长度为 L，到导杆表面的距离为 r。

当对导杆施加交流 150 kV，r=30 mm，L=600 mm 时，套管电场分布如图 4 所示。考虑到套管结构细长，图 4 在给出套管整体电场分布的同时，也提供了接地屏端部附近 150 mm 以及接地屏中心附近 150 mm 的局部电场分布图。

图 5 为 x=1205 mm 位置处，套管导杆表面到套管芯体表面的径向电场分布。由套管整体电场分布可知，高场区主要分布于接地屏与导杆之间区域，其中导杆表面最高场强达到 7.6 kV/mm，分布区域正是接地屏在导杆表面的投影区域。随着到导杆表面距离的增大，径向场强逐渐下降，在接地屏表面已降至 3.5 kV/mm。在距离导杆大于 30 mm 的位置，径向电场降为 0。接地屏端部的场强则高达 55 kV/mm，目前常用的油浸纸、胶浸纸等绝缘体系均无法避免在该电场强度下出现局部放电。套管表面电场在接地屏端部对应位置出现集中，最高场强为 2.2 kV/mm。考虑到后续将利用电场均化层对接地屏端部电场进行均化处理，本节将重点考虑接地屏位置及长度设置对套管导杆表面电场分布的影响。

采用控制变量法，当 L=300 mm 时，r 分别取 20、25、30、35、40 和 45 mm 时，导杆表面电场如图 6 所示。图 6 结果显示，导杆表面的高场区主要集中在接地屏在导杆表面的投影区域，且该区域内电场强度保持一致。随着接地屏到导杆距离的不断增大该区域电场强度逐渐减小。当 r 为 20 mm，导杆表面的最高电场值已经达到 10.2 kV/mm，而当 r 达到 25 mm 及以上时，导杆表面最高电场值降至 8.6 kV/mm 及以下。

当 r=30 mm 时，研究不同接地屏长度对导杆表面电场分布的影响。需要注意的是，接地屏不能过长，其表面还将包覆更长的电场均化层，也不能过短，否则无法对法兰实现屏蔽而导致法兰表面放电。分别设置 L=300、400、500、600 和 700 mm，导杆表面电场分布结果如图 7 所示。导杆表面高场区的

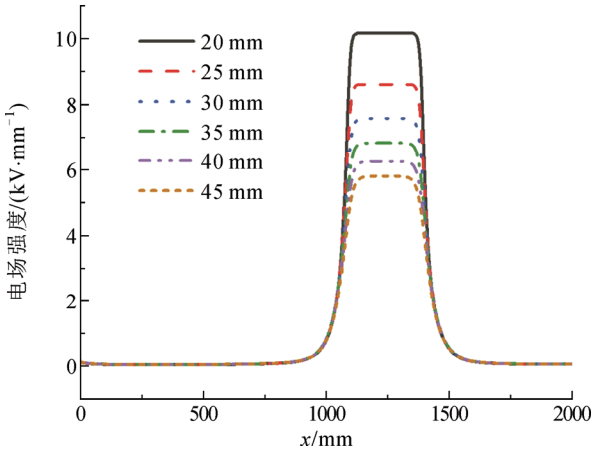


图 6 导杆表面电场随接地屏位置变化的分布特征

Fig.6 Electric field distribution on the conducting rod surface with the position of grounding plate

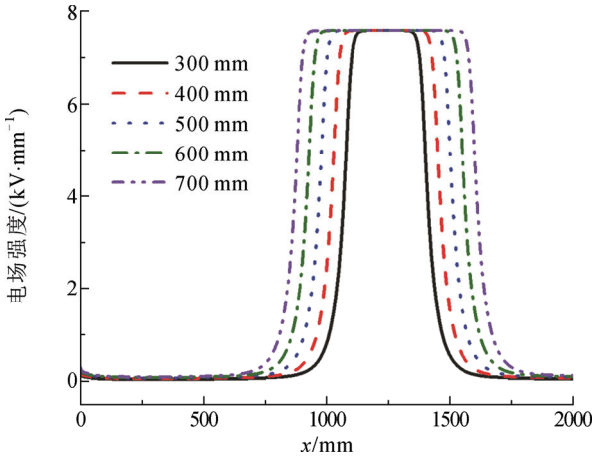


图 7 导杆表面电场随接地屏长度变化的分布特征

Fig.7 Electric field distribution on the conducting rod surface with the length of grounding plate

范围随着接地屏的增长而增大，但其最大值始终保持在 7.6 kV/mm，说明改变接地屏长度仅影响导杆表面的高场范围，而对最高电场值无影响。

法兰处的高场强区出现在法兰端部的空气侧，获得该区域电场强度随接地屏长度变化规律如图 8 所示。随着接地屏长度的增大，电场值逐渐下降，说明接地屏越长，其对法兰的屏蔽效果越好。当接地屏长度在 600 mm 及以上时，法兰端部电场降至 1.5 kV/mm 以下。

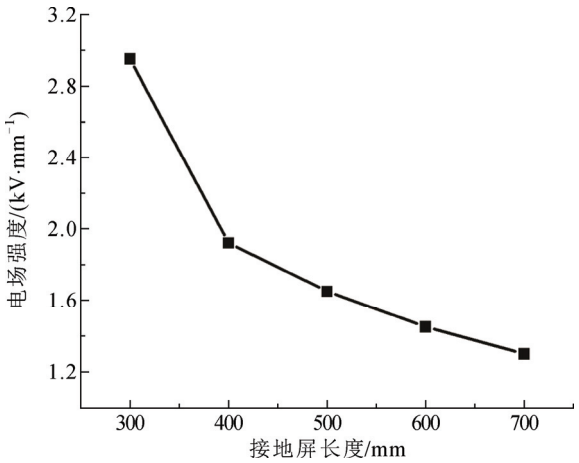


图 8 法兰端部电场强度随接地屏长度变化规律

Fig.8 Electric field intensity at the point of flange with the length of grounding plate

3 电场均化层设置对电场分布的影响

本章将在接地屏 r=30 mm，L=600 mm 的基础上，研究电场均化层长度、非线性参数、位置等对套管电场分布的影响规律。含电场均化层的套管芯体结构如图 9 所示，电场均化层长度为 H，厚度为 D，接地屏到电场均化层下表面的距离为 d。

3.1 电场均化层长度对电场分布的影响

首先研究电场均化层长度对套管电场分布的影响。拟定电场均化层厚度 D 为 10 mm，接地屏位于电场均化层几何中心，接地屏到电场均化层下表面的距离 d=5 mm，电场均化层下表面到导杆表面的距离为 25 mm，将表 2 中 S3 样品的非线性电导代入电场均化层，设置电场均化层的长度 H 分别为 1000、1100、1200、1300、1400、1500 和 1600 mm。获得不同电场均化层长度下套管的电场分布如图 10 所示，图 10(a)、(b)、(c)和(d)分别为电场均化层长度为 1000、1200、1400 和 1600 mm 时的电场分布图。图 10 在给出套管整体电场分布的同时，还

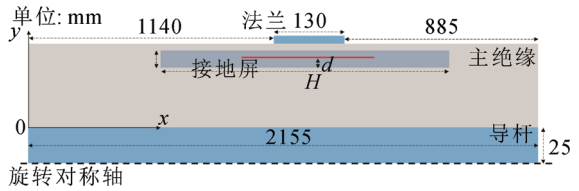


图 9 含电场均化层的套管芯体结构图

Fig.9 Structure of the bushing core with electric field grading layer

展示了电场均化层端部、接地屏端部和接地屏中心附近的局部电场分布图，选取的 3 个部位长度均为 150 mm。随着电场均化层长度的增大，其端部的电场强度逐渐减小，其对应的空气侧场强也逐渐减

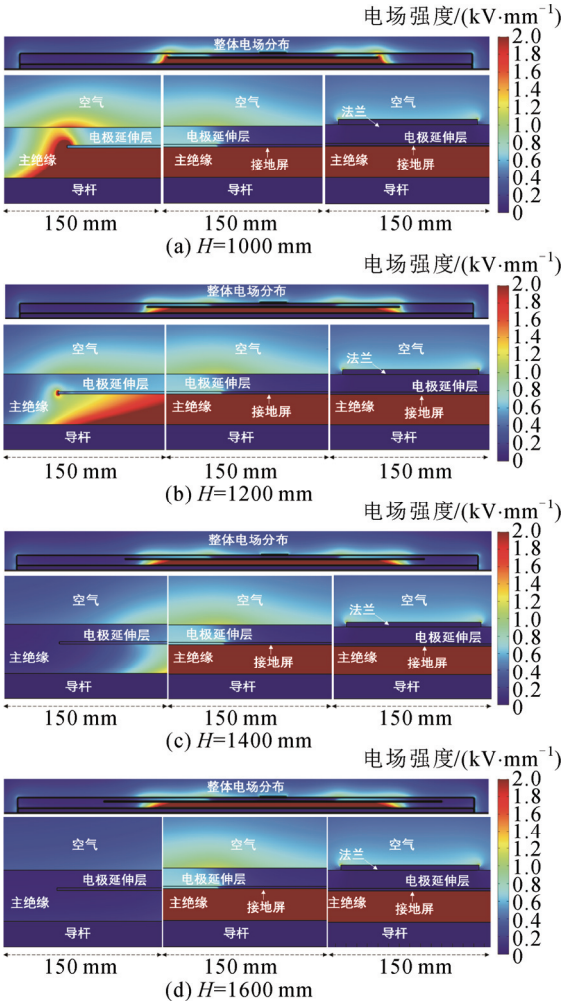


图 10　不同电场均化层长度下绝缘芯电场分布

Fig.10　Electric field distribution in bushing core with different lengths of electric field grading layer

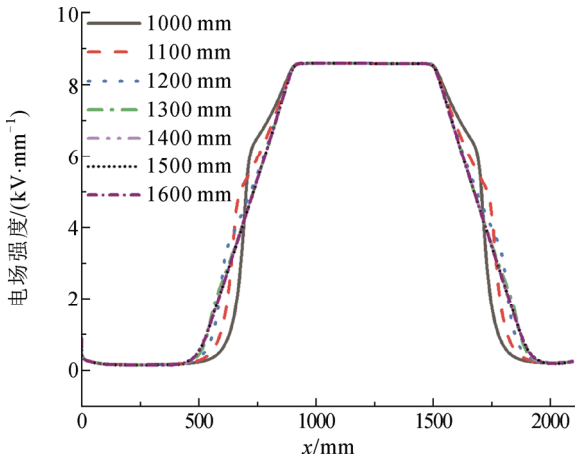


图 11　导杆表面电场随电场均化层长度变化分布特征

Fig.11　Electric field distribution on the conducting rod surface with the length of electric field grading layer

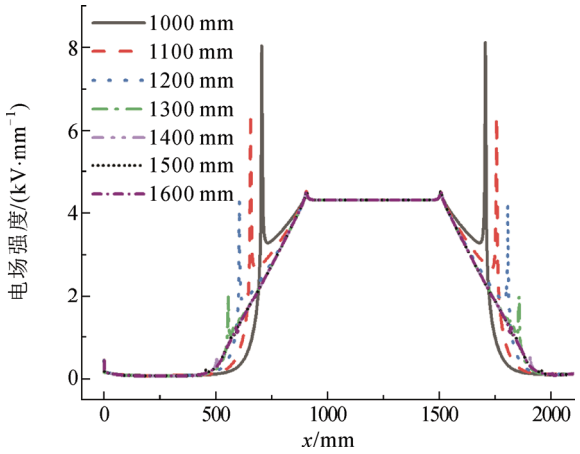


图 12　电场均化层表面电场随其长度变化分布特征

Fig.12　Electric field distribution on the surface of electric field grading layer with its length

小。电场均化层长度对接地屏末端以及接地屏中心部位的电场分布影响并不显著。

获得导杆表面(y=0，0≤x≤2155 mm)电场分布随电场均化层长度的变化如图 11 所示。电场强度最高区域依然集中在接地屏在导杆表面的投影区域，但其最高电场值达 8.5 kV/mm，大于图 7 中无电场均化层包覆接地屏时的情况。这是由于靠近导杆侧的电场均化层材料承受的电场远低于主绝缘材料，等效于将接地屏向导杆侧延伸了 5 mm，导致导杆表面电场更接近 r=25 mm 时的电场值。此外，在电场均化层的作用下，导杆表面的电场强度随着离接地屏距离的增大而缓慢下降，电场均化层越长，随接地屏距离下降越缓，电场均化层长度大于 1300 mm 后，电场强度下降曲线几乎重合。

获得电场均化层靠近导杆侧表面(y=25 mm，0≤x≤2155 mm)的电场分布如图 12 所示，图中 2 个间距为 600 mm 且电场值为 4.5 kV/mm 的尖端对应的正是接地屏两端，其电场值不随电场均化层长度的变化而变化。当电场均化层长度为 1000 mm 时，其端部出现电场尖峰，随着电场均化层长度增大，其两端的电场尖峰逐渐减小，且向两侧推移。当电场均化层长度为 1200 mm 及以上时，其端部场强已经降至 4.5 kV/mm 以下。

获得芯体表面(y=50 mm，0≤x≤2 155 mm)空气侧电场分布如图 13 所示，在 x=900 mm 和 1500 mm 附近出现的 1.1 kV/mm 的电场集中区同样由接地屏端部引起。在电场均化层两端对应的芯体表面也出现场强集中区，当电场均化层为 1000 mm 时，其场强达 1.75 kV/mm，随电场均化层长度增大，高场区

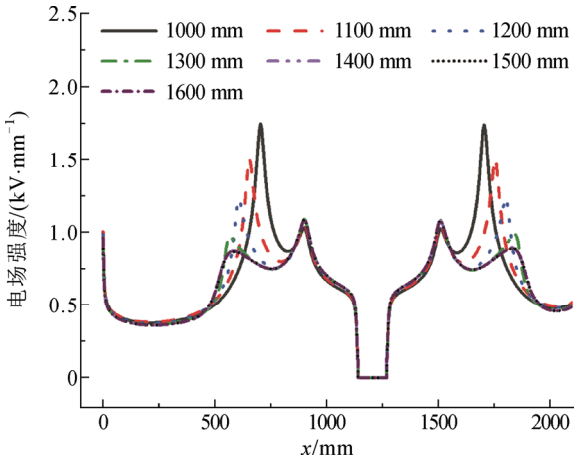


图 13 芯体表面电场随电场均化层长度变化分布特征

Fig.13 Electric field distribution on the core surface with the length of electric field grading layer

逐渐向两侧推移，且峰值逐渐减小。当电场均化层长度达到 1100 mm 及以上时，电场均化层端部电场降至 1.5 kV/mm 以下。当电场均化层长度达到 1400 mm 及以上时，电场均化层端部电场由尖端变成圆润的弧形，其值降至 0.88 kV/mm 左右。

3.2 电场均化层非线性参数对电场分布的影响

研究电场均化层非线性参数对套管芯体电场分布的影响。拟定电场均化层长度 H=1200 mm，其他参数与 3.1 节一致，分别将表 2 中 S1、S2、S3 的非线性电导代入电场均化层，获得交流 150 kV 下接地屏端部附近电场均化层的电导分布如图 14 所示。非线性材料阈值电场越低，在相同电压下，电场均化层中电导梯度越低，高电导区分布范围越广。

获得不同非线性参数下，套管电场均化层表面以及芯体表面空气侧电场分布分别如图 15 和图 16 所示。图 15 显示，对于 S1 和 S2，电场均化层表面电场集中区仅出现在接地屏端部，电场均化层端部并未出现电场集中。随着非线性材料阈值电场降低，接地屏末端的电场逐渐降低。图 15 中接地屏端部空气侧依然出现电场集中，随着非线性材料阈值电场的降低，高场区域被逐渐“分摊”到芯体表面，非线性材料阈值电场越低，其“分摊”范围越广。对于 S1、S2 和 S3，空气侧电场强度均低于 2.0 kV/mm，其中采用 S2 和 S3 的非线性电导，空气侧电场强度可降至 1.5 kV/mm 以下。

3.3 电场均化层位置对电场分布的影响

研究电场均化层位置对套管芯体电场分布的影响。拟定电场均化层长度 H=1200 mm，其他参

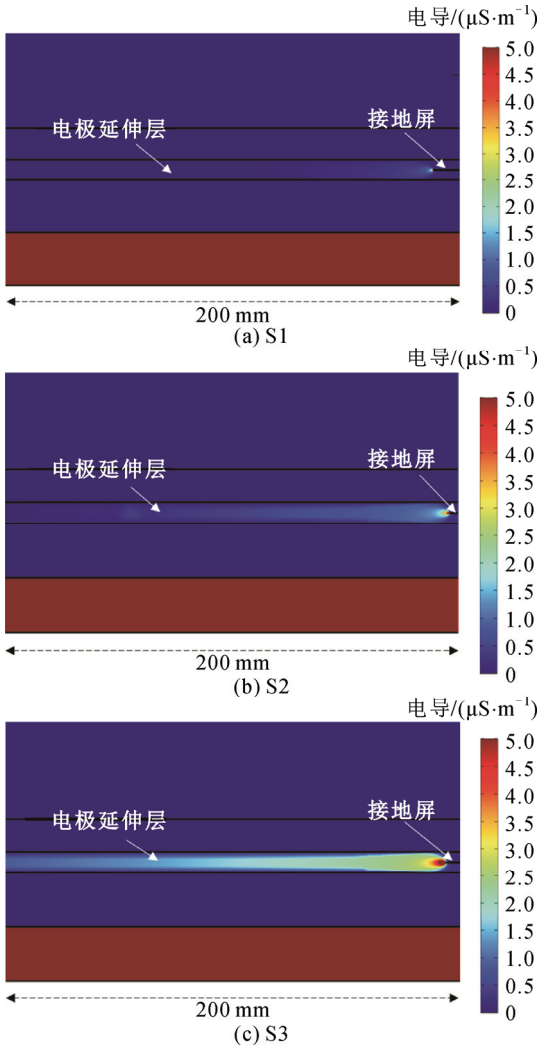


图 14 具有不同非线性参数的电场均化层的电导分布

Fig.14 The conductivity distribution in electric field grading layer with different nonlinear parameters

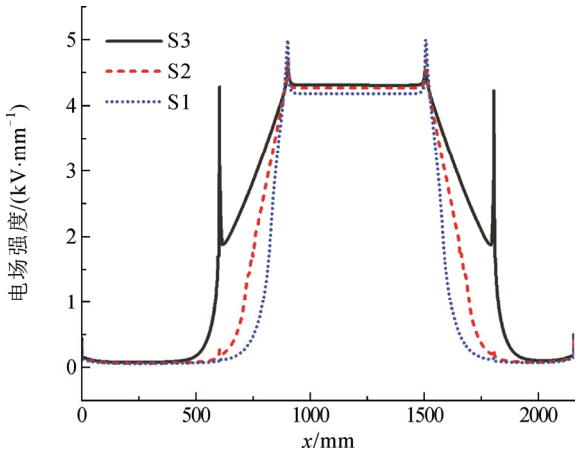


图 15 电场均化层非线性参数对其表面电场分布的影响

Fig.15 Effect of nonlinear parameters of electric field grading layer on the electric field distribution on its surface

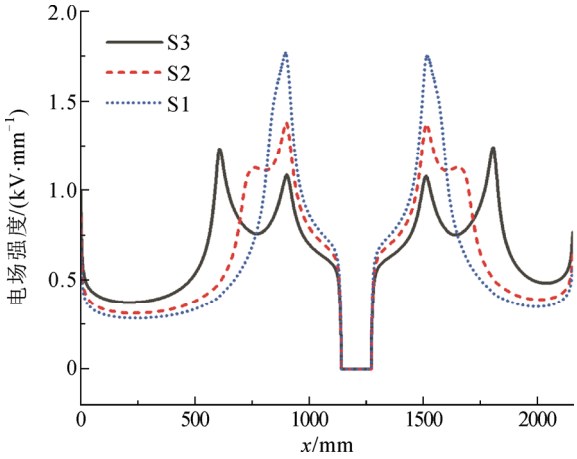


图 16　电场均化层非线性参数对芯体表面电场分布的影响

Fig.16　Effect of nonlinear parameters of electric field grading layer on the electric field distribution on the surface of bushing core

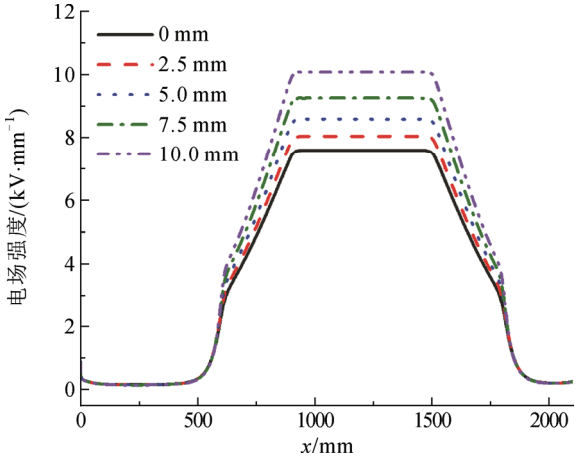


图 17　电场均化层位置对导杆表面电场分布的影响

Fig.17　Effect of electric field grading layer position on the electric field distribution of conducting rod surface

数与 3.1 节一致，当 d 分别取 0、2.5、5.0、7.5 和 10 mm 时，获得套管芯体导杆表面、电场均化层表面以及空气侧电场如图 17 和图 18 所示。

图 17 显示，随着电场均化层下表面与接地屏的距离 d 从 10 mm 减小至 0，导杆表面最大电场值由 9.4 kV/mm 单调递减至 7.6 kV/mm，这是因为接地屏与导杆之间的电场均化层因为高电场的作用而处于高电导状态，d 越大则牺牲的等效绝缘距离越大，因此在 d=0 时，导杆表面与电场均化层表面表面的电场强度都达到最低。图 18 显示 d 的取值对接地屏两端空气侧电场分布影响不大，而电场均化层两端空气侧电场则随着 d 的增大而减小。

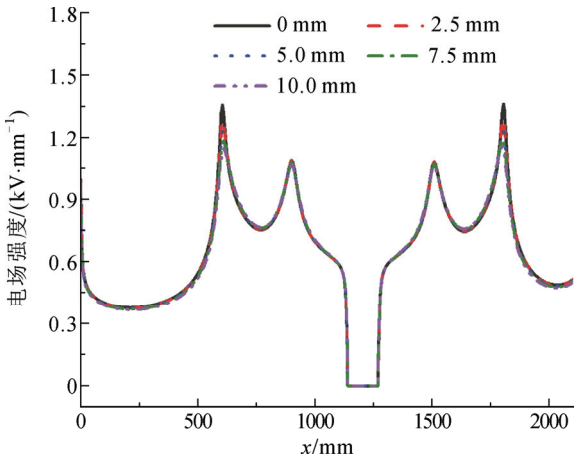


图 18　电场均化层位置对芯体表面电场分布的影响

Fig.18　Effect of electric field grading layer position on the electric field distribution of core surface

4　直流电场下套管电场分布特性

取接地屏 L=600 mm，r=30 mm，电场均化层 H=1200 mm，d=0，D=2.5 mm 的套管芯体结构，分别将 S1、S2 和 S3 的非线性电导参数代入电场均化层，获得+150 kV 电压下套管导杆表面、电场均化层表面以及芯体表面的电场分布如图 19(a)、(b)和(c)所示。图 19(a)显示导杆表面电场最大值依然在 7.6 kV/mm，与交流场中一致，但是当电场均化层取 S2 和 S3 非线性电导时，导杆表面最高电场区域明显较取 S1 时更广。图 19(b)和(c)中，当电场均化层取 S2 和 S3 非线性电导时，均出现电场均化层端部电场显著集中的情况，电场均化层表面电场集中区的场强高达 13.2 kV/mm，空气侧电场集中区的场强在 2.2 kV/mm 左右。对于直流场，当电场均化层非线性电导取 S2 和 S3 时，材料的阈值电场过低，电场均化层表现出的电导相对较高，高电场由接地屏端部逐渐“传递”到电场均化层端部。考虑到直流电场下，套管电场分布仅由电导决定，而交流电场下套管的电场分布由电导和介电常数共同决定。上述结果显示，套管在交流和直流电场下存在较大的电场分布差异。

进一步分析电场均化层电导率对套管电场分布的影响。假设电场均化层为固定电导材料，当电场均化层具有如金属般的高电导率时，等效于增大了接地屏的尺寸，导致电场均化层所对应的导杆表面区域均为高电场区，电场均化层表面和空气侧电场集中于电场均化层端部；当电场均化层为绝缘态，

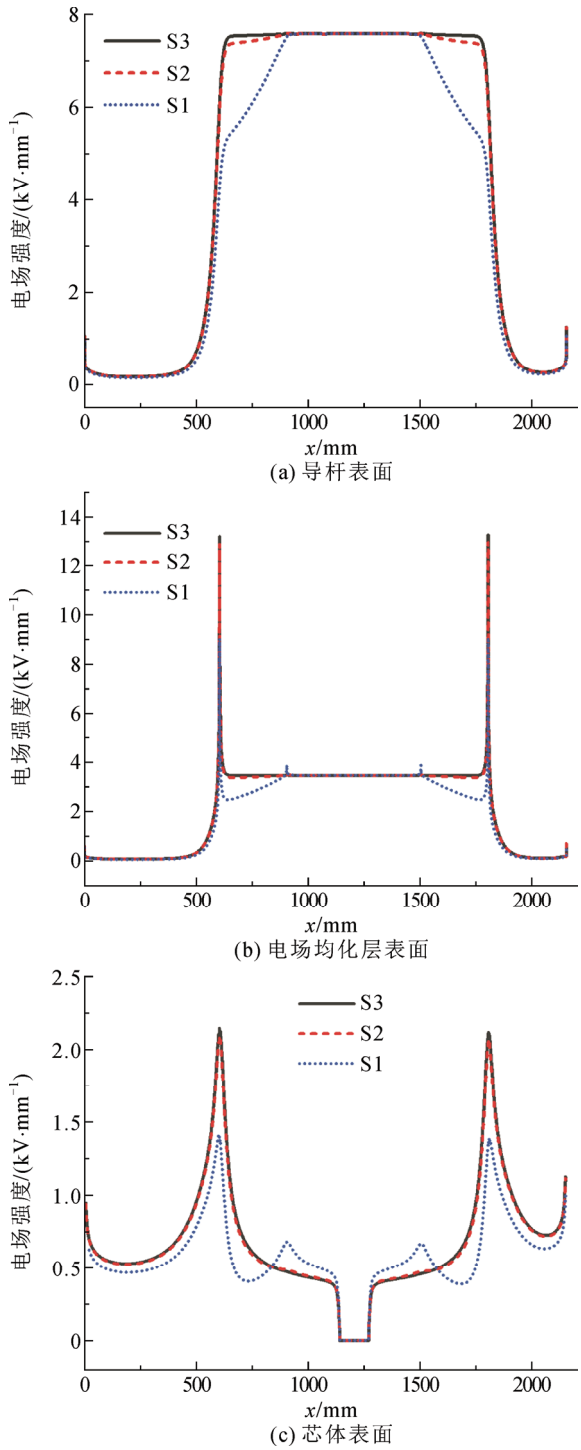


图 19 直流电场下套管各部分电场分布

Fig.19 Electric field distribution of different in bushing under DC

可将其视为主绝缘材料，高场区仅出现在接地屏对应的导杆表面，电场均化层表面和空气侧电场集中于接地屏端部。当电场均化层为半导体时，在接地屏和电场均化层端部均会出现电场集中，但其幅值较前两种情况更低。而当电场均化层表现为非线性电导时，在相同电压下，其表面及空气侧电场的电场集中区将随着材料非线性阈值电场的降低而向电场均化层端部推移；当电场均化层具有固定非线性电导时，其表面及空气侧电场的电场集中区将随着电压的提升而向电场均化层端部推移，从而表现出电场自适应调控特性。这也是非线性材料相较固定电导材料的优势所在。

5 结论

本文提出了含有非线性电场均化层的高压套管技术路线，仿真研究了接地屏位置、长度，非线性电场均化层几何尺寸、材料参数对高压套管电场分布的影响规律，分析对比了交、直流下含有非线性电场均化层的高压套管电场分布差异，总结了非线性电场均化层在均匀高压套管电场方面的优势，获得如下结论：

1）接地屏的位置和长度主要影响导杆表面电场值及电场集中区域范围。接地屏到导杆表面距离对导杆表面电场影响显著，随着接地屏到导杆表面距离的增大，该区域电场强度逐渐减小；接地屏长度主要影响导杆表面高场区的分布范围，高场区将随着接地屏的增长而增大。适当增长接地屏长度还能有效削减法兰端部场强。

2）电场均化层的长度、非线性参数、位置均会对套管电场分布产生显著影响。随着电场均化层长度增大，其端部以及芯体表面电场值将逐渐减小，且高场区向套管两端推移。不同的非线性材料将在套管中表现出不同的电导分布特性，进一步影响高压套管的电场分布。具有较低阈值场强的 S3 对于套管电场均化层表面以及芯体表面的电场均匀效果较 S1、S2 更优。电场均化层的位置将会对导杆表面电场产生影响，随着电场均化层下表面与导杆表面距离的减小，导杆表面电场将逐渐增大。

3）直流电场下含有非线性电场均化层的高压套管电场分布与交流电场下存在较大差异。具有较高阈值场强的非线性材料 S1 在直流电场下对于高压套管的电场均化效果更优。具有非线性电导的电场均化层能够有效削减接地屏端部高电场，电场均化层表面及芯体表面的电场集中区将随着电压的提升而向电场均化层端部推移，从而表现出电场自适应调控特性。本文工作将为非线性复合材料在高压套管中的应用提供参考。

参考文献 References

[1] 刘其昶. 电气绝缘结构设计原理[M]. 北京：机械工业出版社，

1981：115-147.
LIU Qichang. Design principle for electric insulation structure[M]. Beijing, China: China Machine Press, 1981: 115-147.

[2] 陈　忠，伍　衡，黄和燕，等. ±800 kV 直流穿墙套管耐压试验发生外闪原因分析及改进措施[J]. 高电压技术，2011，37(9)：2133-2139.
CHEN Zhong, WU Heng, HUANG Heyan, et al. Cause analysis and improvement measure of ±800 kV DC wall bushing occurring flashover during overvoltage withstand test[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2133-2139.

[3] MONGA S, GORUR R S, HANSEN P, et al. Design optimization of high voltage bushing using electric field computations[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(6): 1217-1224.

[4] 傅明利，梁虎成，杜伯学，等. 非线性电导环氧树脂复合材料在±600 kV 换流变压器套管中的应用仿真研究[J]. 高电压技术，2019，45(5)：1476-1482.
FU Mingli, LIANG Hucheng, DU Boxue, et al. Simulation research on the application of epoxy resin with nonlinear conductivity in the ±600 kV converter transformer bushing[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1476-1482.

[5] 张施令，彭宗仁. 有限元数值计算技术应用于特高压穿墙套管三维电场模拟分析[J]. 高电压技术，2020，46(3)：782-789.
ZHANG Shiling, PENG Zongren. Application of finite element method in three-dimensional electric field simulation of UHVDC wall bushing[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 782-789.

[6] 深圳供电局有限公司. 输变电设备典型缺陷及故障案例分析[M]. 北京：中国电力出版社，2016：36-41.
Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd. Analysis of typical defects and failure cases of electric transmission and transformation equipment[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2016: 36-41.

[7] HOPKINSON P, DEL RIO A, WAGENAAR L, et al. Progress report on failures of high voltage bushings with draw leads[C]// IEEE PES General Meeting. Minneapolis, USA: IEEE, 2010: 1-15.

[8] Working Group. Transformer bushing reliability[R]. Paris, UK: CIGRE, 2019.

[9] 项　敏，袁　媛，何　潇，等. 套管中铝箔的油硫腐蚀现象及其对油纸绝缘性能的影响试验探究[J]. 高电压技术，2019，45(2)：484-491.
XIANG Min, YUAN Yuan, HE Xiao, et al. Investigation of oil-sulfur corrosion on aluminum foil in bushings and its effect on oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 484-491.

[10] 刘　杉，宋胜利，卢理成，等. ±800 kV 特高压直流穿墙套管故障分析及设计改进[J]. 高电压技术，2019，45(9)：2928-2935.
LIU Shan, SONG Shengli, LU Licheng, et al. Failure analysis and design improvement of ±800 kV HUVDC wall bushings[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2928-2935.

[11] DONZEL L, GREUTER F, CHRISTEN T. Nonlinear resistive electric field grading. part 2: materials and applications[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(2): 18-29.

[12] YANG X, ZHAO X L, HU J, et al. Grading electric field in high voltage insulation using composite materials[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2018, 34(1): 15-25.

[13] 胡　军，赵孝磊，杨　霄，等. 非线性电导材料应力锥改善电缆终端电场强度分布[J]. 高电压技术，2017，43(2)：398-404.
HU Jun, ZHAO Xiaolei, YANG Xiao, et al. Improving the electric field strength distribution of cable terminals by stress cone of nonlinear conductivity material[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 398-404.

[14] ZHAO X L, HU J, YUAN Z K, et al. Design of adaptive bushing based on field grading materials[J]. High Voltage, 2021, 6(4): 625-636.

[15] YANG X, MENG P F, ZHAO X L, et al. How nonlinear V-I characteristics of single ZnO microvaristor influences the performance of its silicone rubber composite[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(2): 623-630.



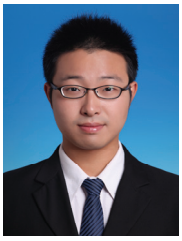
何金良
1966—，男，博士，教授，博导
主要从事输变电技术、电磁环境技术及电介质材料等方面的研究工作
E-mail: hejl@tsinghua.edu.cn

HE Jinliang
Ph.D., Professor
IEEE Fellow



孙　岗
1974—，男，博士生
主要从事高电压与绝缘技术方面的研究工作
E-mail: g-sun@sgcc.com.cn

SUN Gang
Ph.D. candidate



袁之康(通信作者)
1992—，男，博士，助理研究员
主要从事高电压与绝缘技术方面的研究工作
E-mail: yuanzk21@163.com

YUAN Zhikang
Ph.D.
Corresponding author



黄智文
1998—，男，博士生
主要从事高电压与绝缘技术方面的研究工作
E-mail: huangzw20@mails.tsinghua.edu.cn

HUANG Zhiwen
Ph.D. candidate



胡　军
1976—，男，博士，副教授
主要从事电力系统过电压与绝缘配合、电介质材料方面的研究工作
E-mail: hjun@tsinghua.edu.cn

HU Jun
Ph.D.
Associate professor

收稿日期　2021-08-17　在线出版日期　2022-03-28　　编辑　卫李静