

基于COMSOL仿真的高压直流换流阀悬垂绝缘子均压环的优化研究

孙小飞, 孙松松, 张立军

(国网山东省电力公司超高压公司, 山东 济南 250000)

摘要: 换流阀悬垂绝缘子是高压直流换流站的重要设备, 均压环的优化设计是实现直流高电位场区绝缘子表面电场均匀分布的关键。利用 COMSOL 多物理场仿真搭建悬垂绝缘子静电场的二维轴对称仿真模型, 以绝缘子均压环管径 d 、环径 D 和抬高距 H 为控制变量, 以高压场区绝缘子片 Z 轴切向电场强度最大值的总和为目标函数, 以目标函数的最小值为优化目标, 采用 Nelder-Mead 单纯形算法优化仿真, 分析换流阀悬垂绝缘子在有无均压环及最优尺寸情况下电动势和电场强度分布的均匀性及最大绝缘安全裕度。

关键词: COMSOL; Nelder-Mead; 换流阀; 绝缘子; 优化设计

Study on optimization of HVDC converter valve suspension insulator voltage equalization ring based on COMSOL

SUN Xiaofei, SUN Songsong, ZHANG Lijun

(State Grid Shandong Electric Power Company Ultra High Voltage Company, Jinan 250000, China)

Abstract: As an important equipment of HVDC converter station, the optimization design of voltage balance ring is the key to realize the uniform distribution of electric field on the insulator surface in DC high potential field. A two-dimensional axisymmetric simulation model of the electrostatic field of a hanging insulator is established by using COMSOL multi-physical field simulation, the objective function is the sum of the maximum values of the Z -axis tangential electric field strength of the insulators in the high voltage field, and the optimization objective is the minimum value of the objective function, the uniformity of electric potential and electric field intensity distribution and the maximum insulation safety margin of the suspension insulator with or without voltage equalization ring are analyzed.

Keywords: COMSOL; Nelder-Mead; converter valve; grading ring; optimization design

0 引言

随着直流输电的不断发展, 换流阀电压等级不断突破极限, 相对应的阀塔绝缘子的耐压和绝缘能力面临严峻考验^[1], 为绝缘子的生产和设计提供一种可靠、实用的优化仿真和计算方法是解决问题的关键。目前, 关于绝缘子的优化设计多局限于交直流输电线路的研究领域^[2], 对于直

流换流阀悬垂式绝缘子方面的研究涉及较少, 其中优化设计多借助于ANSYS有限元仿真软件实现静电场仿真^[3], 对于计算结果的验证和算法的最优性缺少对比研究。COMSOL多物理场仿真软件因多场耦合、收敛性强、计算准确等优点应用于各类研究领域^[4], 同时软件融合多种优化模型, 可在稳态及暂态仿真域下实现多种算法的对

比分析。Nelder-Mead单纯形优化算法是解决含约束条件的单目标、多参数最优化问题的实用方法，该算法具有极强的局部搜索能力，且对目标函数的可导性无限制要求^[5]。因此本文采用COMSOL多物理场仿真软件实现电场域和优化接口的耦合，同时采用Nelder-Mead单纯形优化算法以高压场区绝缘子片Z轴切向电场强度最大值的总和为目标函数，以目标函数的最小值为优化目标，实现在最小安全裕度下绝缘子的最优化设计。仿真以±500 kV直流换流阀悬垂绝缘子为例。

1 绝缘子二维仿真建模

1.1 仿真几何模型搭建

换流阀绝缘子主要采用Z轴轴对称结构，悬垂式设计，顶部由悬吊绝缘子串连接到阀厅横梁上，顶部为零电位场区，底部为高压电位场区。绝缘子物理结构对称的同时兼具电场分布对称性。为简化设计模型，加快计算速度，提高计算结果的收敛性，文中采用二维轴对称仿真建模。仿真模型按照全局参数设置、几何模型建立、物理材料的添加和设置、静电场边界条件确定、网格剖分以及研究模型的选择进行逐步搭建。

考虑到阀塔安装排列的原因，邻近阀塔的电场会相互影响，为忽略其他电场对优化计算结果的干扰，模拟无限大空气域环境，仿真采用半径为2 000 mm的半圆的空气域为边界环境，空气边界电位为0 V。仿真模型设置绝缘子芯棒电动势 V_i 、均压环管径 d 、均压环环径 D 和抬高距 H 四个全局参数，其中参数 H 以 XOY 平面为基准，二维仿真模型如图1所示。绝缘子片数为17片，大小伞裙以两小一大的间隔均匀排列，所有伞裙构成一个整体域。均压环相关参数设置分别是 d 为15 mm， D 为350 mm， H 为30 mm。

1.2 材料基本属性设定

换流阀悬垂绝缘子的结构由端部金属附件、内绝缘芯棒、大小相间的硅橡胶圆形伞裙和微正压空气域组成。端部金属附件与外部元器件连接。硅橡胶伞裙主要起到增大爬电距离、保护内

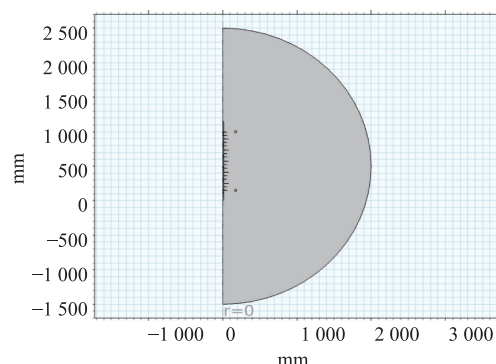


图1 绝缘子二维仿真模型

Fig. 1 Two-dimensional insulator simulation model

绝缘芯棒的作用。内绝缘芯棒是内部绝缘和主要承力部件，用于承载电气设备。目前，特高压复合绝缘子芯棒从原材料上主要分为无机陶瓷材料和有机高分子复合材料。文中不考虑材料的安装和制造工艺的影响，仅考虑材料本身的绝缘性能。据资料显示，广泛应用的有机高分子复合材料的相对介电常数在4~7之间，而伞裙应用的硅橡胶的相对介电常数在2.5~3.3之间。文中据此分别设定模型相关材料的基本属性，芯棒材料的相对介电常数设为5，伞裙的相对介电常数设为3，空气的相对介电常数设为1。

1.3 静电场控制方程

绝缘子电场仿真模型的物理场控制方程建立在静电场电荷守恒、电场强度计算及介质本构关系的基础上。具体方程为

$$\nabla \mathbf{D} = \rho \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (3)$$

将式(2)、式(3)代入式(1)中，得

$$\nabla(\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V) = -\rho \quad (4)$$

式中， $\mathbf{D}$ 为电位移矢量； ρ 为电荷密度电位移矢量的散度，即为电荷密度； $\mathbf{E}$ 为电场强度的矢量值； V 为电动势的矢量值，电场强度等于电动势的负梯度值； ε_0 为真空电导率； ε_r 为材料的相对介电常数。

为减少计算量，同时提高结果的计算准确度，根据静电场控制方程，采用物理场控制网格类型进

行剖分, 网格单元大小设为常规。忽略直流故障、启停阀组等特殊条件下电场的瞬态变化, 对直流静电场下有无均压环的绝缘子绝缘性能进行分析, 主要研究稳态条件下的电动势和电场强度沿面分布情况, 因此仿真分别建立了两个稳态求解器。

1.4 边界约束条件

为绝缘子静电场添加边界条件, 文中添加四个终端励磁, 应用于静电场相邻边界, 终端可以采用固定的电动势、固定的电流或者同外电路连接。考虑绝缘子工作在稳定的高压直流环境下, 将采用固定电动势的方式, 对底部芯棒和均压环设置电压为500 kV; 对顶部芯棒和均压环设置电压为0 V。

2 仿真结果分析

仿真结果如图2~图5所示。图2和图4为无均压环下电动势和电场强度分布图, 图3和图5为有均压环下电动势和电场强度分布图。绝缘子在无均压环情况下, 高压电动势和低压电动势主要集中于底部和顶部的芯棒上, 伞裙上承受的电动势和电场强度较小, 绝缘子的电动势和电场强度分布极不均匀, 且电场强度最大值为10.2 kV/mm。而有均压环情况下, 高低压电动势均匀分布在芯棒和伞裙上, 每片伞裙承受的电场强度相对均匀, 电场强度最大值为3.83 kV/mm, 相比无均压环情况, 电场强度降低了3倍左右, 极大地提高了绝缘子的绝缘安全裕度。

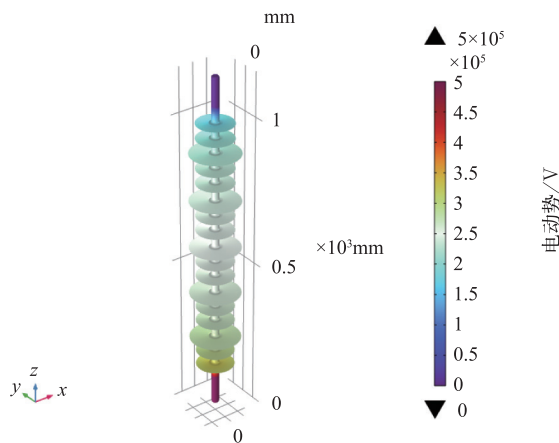


图2 无均压环电动势分布

Fig. 2 The voltage distribution without grading rings

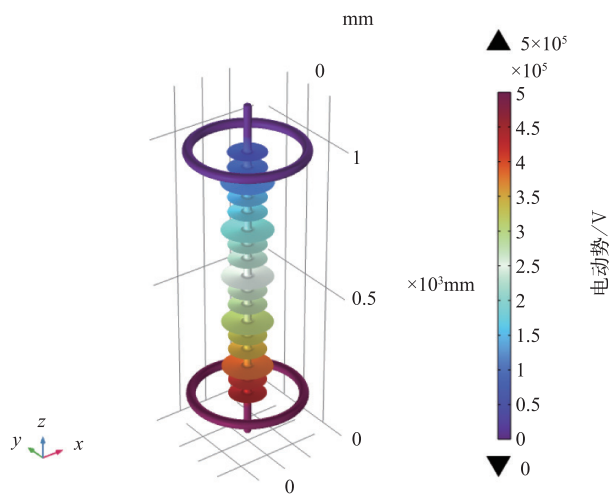


图3 有均压环电动势分布

Fig. 3 The voltage distribution with grading rings

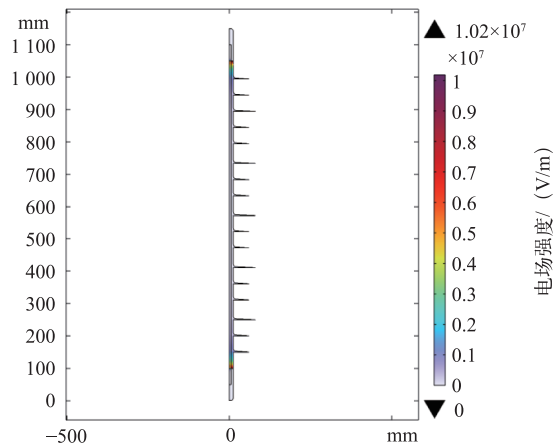


图4 无均压环电场强度分布

Fig. 4 The electric field intensity distribution without grading rings

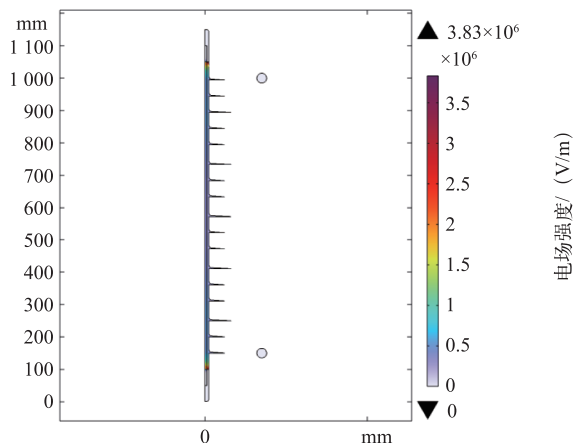


图5 有均压环电场强度分布

Fig. 5 The electric field intensity distribution with grading rings

3 绝缘子均压环优化设计

3.1 Nelder-Mead单纯形算法原理

求解均压环最优结构实际是多片绝缘子表面场强最小化的问题，Nelder-Mead单纯形算法是一种求解多参数优化问题的局部搜索方法，可广泛用于解决绝缘子最优化问题。

Nelder-Mead单纯形算法原理如图6所示，假设 N 维搜索空间中 x_1 、 x_2 、 x_3 为三个算法的初始点，分别将三个点代入目标函数式得出函数值，将三个函数值按大小依次排序 $f(x_3)<f(x_2)<f(x_1)$ ，其中 x_3 、 x_2 、 x_1 分别代表函数值优点、次优点和最差顶点， x_4 为两个优点连线的中心。首先进行反射操作，以 x_4 为反射中心，对 x_1 沿 $\overline{x_1x_4}$ 方向反射，寻找对应的反射点 x_5 ，若 $f(x_5)<f(x_1)$ ，则 $\overline{x_1x_5}$ 为较优方向，按照一定条件进行扩张操作得到扩张点 x_6 ，或进行压缩操作得到压缩点 x_7 ，将求出的一个较好点 x_8 代替 x_1 ；若在 $\overline{x_1x_5}$ 方向没有搜寻到更优替代点，则 x_1 、 x_2 两顶点向最优点 x_3 整体收缩，然后进行反射、扩张、压缩等步骤，将点反复迭代直至最终求出最优解。

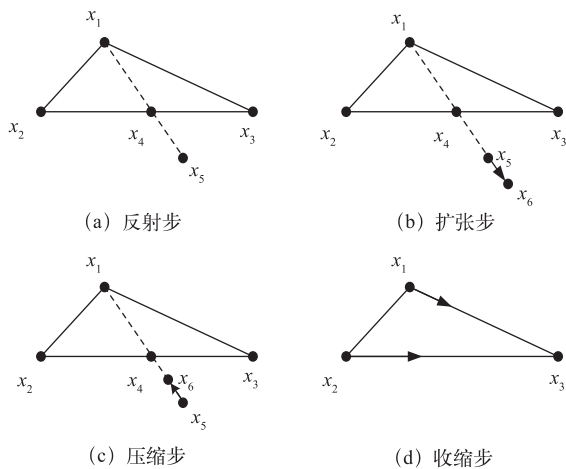


图6 Nelder-Mead单纯形算法原理示意图
Fig. 6 The schematic diagram of Nelder-Mead simplex algorithm

3.2 均压环优化模型搭建

为方便优化计算，仿真建立第三个稳态优化求解器，优化求解器选择Nelder-Mead方法，优化容差设为0.01，模型最大迭代次数设为1 000次，目标函数为多个目标函数总和，类型选择最

小化。模型选取 D 、 R 和 H 为参数变量，并设定参数取值范围的上下限、初始值和比例因子，具体数值见下表。

表 参数变量具体数值				
Tab. Specific value of parameter variable				
参数名称	初始值 / mm	比例因子	下限 / mm	上限 / mm
D	350	1	200	1000
d	150	1	10	500
H	30	1	10	50

绝缘子电场强度的不均匀性和耐压能力主要取决于底部高压场区的绝缘子片影响，因此文中只选用底部高压场区的6片绝缘子 Z 轴切面表面场强最大值的目标总和作为优化目标，并进行设计计算。目标函数的最小值即为目标函数的最优解，此时绝缘子安全裕度最高。仿真在几何模型定义下选择绝缘子和均压环表面域设置边界探针，探针以 Z 轴切面电场强度为表达式，探针类型设为最大值。目标函数为

$$E_z = \max(E_{z1}) + \max(E_{z2}) + \max(E_{z3}) + \max(E_{z4}) + \max(E_{z5}) + \max(E_{z6}) \tag{5}$$

式中， $E_{z1} \sim E_{z6}$ 分别为6片绝缘子的电场强度。

4 优化结果分析

均压环算法优化后绝缘子电动势和电场强度分布如图7和图8所示。均压环参数 D 为500 mm、 d 为150 mm、 H 为50 mm时，得到优化仿真的最优解。优化后电场强度最大值为3.79 kV/mm，较优化前的初始值降低了6.41 kV/mm。将有无均压环和优化后高压场区6片绝缘子的电场强度作对比，结果如图9所示，优化后的电场强度最大值更低，且场强分布更均匀，每片绝缘子片的绝缘性能均得到充分利用，增强了绝缘子的抗沿面放电能力和绝缘安全裕度。因此Nelder-Mead单纯形算法作为一种广泛适用性的搜索类优化算法，与COMSOL多物理场耦合仿真能够很好地解决绝缘子均压环最优化问题，为特高压直流阀塔绝缘子均压环的设计研究提供了一种有效的解决方法。

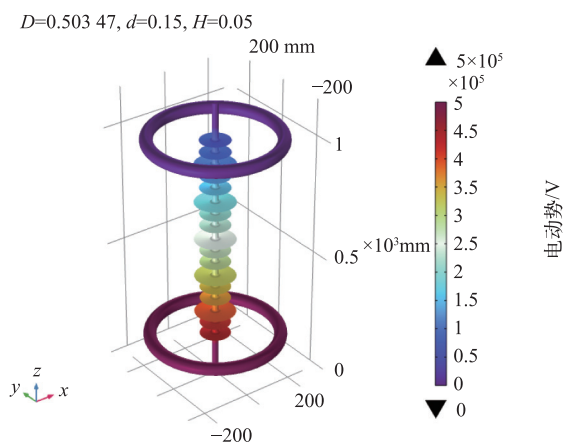


图 7 优化后绝缘子电动势分布

Fig. 7 The voltage distribution of insulator after optimization

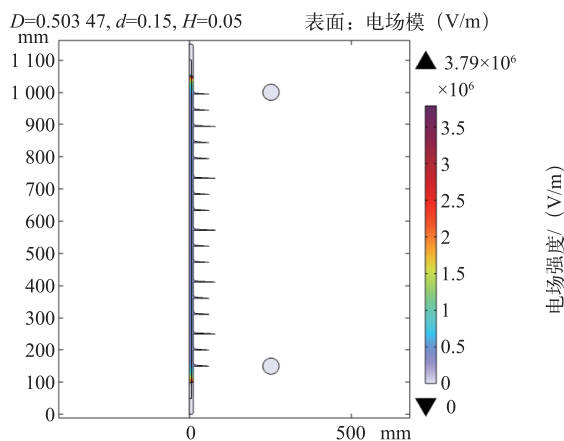


图 8 优化后绝缘子电场强度分布

Fig. 8 The electric field intensity distribution of insulator after optimization

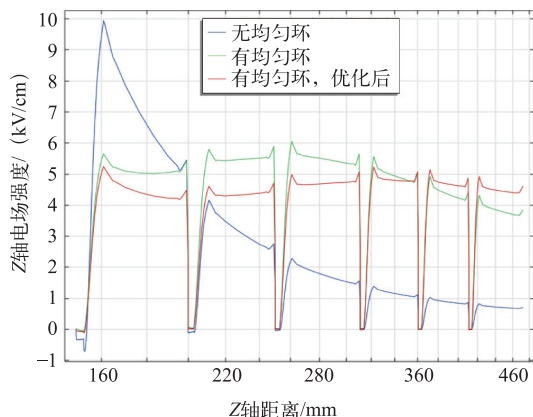


图 9 优化前后高压场区绝缘子电场强度对比图

Fig. 9 The comparison of insulator electric field intensity before and after optimization

5 结束语

本文结合COMSOL多物理场仿真软件及Nelder-Mead单纯形优化算法，为直流换流阀悬垂绝缘子电场强度计算及均压环的设计提供了一种可靠且广泛适用的计算方法。

通过仿真结果对比，发现有均压环和优化后的绝缘子表面电场强度最大值从无均压环时的10.2 kV/mm分别降为3.83 kV/mm和3.79 kV/mm。同时优化后的底部高压场区的6片绝缘子Z轴切面表面场强分布更均匀，能够极大降低绝缘子设计的绝缘等级，提高了换流阀的安全裕度。本方法为进一步发展特高压直流输电提供了有力的支撑。

参考文献

- [1] 李智勇, 张国华, 张国威, 等. 2009年国家电网公司直流输电系统可靠性分析[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 77-81.
- [2] 卞明星, 张增福, 王黎明, 等. 1 000 kV交流复合绝缘子均压环参数设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 980-986.
- [3] 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.
- [4] 陈情, 王国志. 基于COMSOL的电气化铁路接触网绝缘子电场分布仿真研究[J]. 计算机与数字工程, 2021, 49(1): 208-212.
- [5] 牛洁, 薄景山, 王福昌, 等. 基于Nelder-Mead单纯形算法的设计反应谱标定方法[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(5): 165-175.

作者简介

孙小飞 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事特高压直流输电运维检修工作。

(收稿日期: 2024-08-09)