

基于几何形状及表面介电分布的GIL三支柱绝缘子优化设计

陈圣¹, 徐博文², 庚振新¹, 林莘¹, 张佳³, 王永奇³, 李爽⁴, 毕海涛⁴, 田阳⁵

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 沈阳 110870; 2. 西交利物浦大学土木工程系设计学院, 江苏 苏州 215123; 3. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730070; 4. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 沈阳 110055; 5. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 针对三支柱绝缘子及嵌件表面电场集中分布的问题进行调控, 提出了基于有限元模型(finite element model, FEM)结合进化算法(evolutionary algorithm, EA)的几何-介电联合优化方法。首先建立了气体绝缘输电管道(gas insulated line, GIL)三支柱绝缘子的几何及表面介电参数化模型, 以绝缘子表面切向场强最大值 E_{t-max} 、切向场强不均匀系数 F_t 、嵌件表面法向场强最大值 E_{i-max} 为优化目标量, 应用进化算法循环调用FEM进行几何-介电优化计算。优化结果与优化前相比: E_{t-max} 从11.3 kV/mm降至9.47 kV/mm, F_t 从1.56降至1.34, E_{i-max} 从31.9 kV/mm降至13.4 kV/mm; 三支柱绝缘子优化后的几何形状具有哑铃型的特点, 增大了沿面距离, 整体轮廓呈曲率更大的圆弧形, 优化后的表面介电梯度呈“勺型曲线”分布。优化设计的结果可为后续制造三支柱绝缘子提供参考, 对于其他高压设备及部件的优化问题同样可采用该优化方法。

关键词: 气体绝缘封闭输电管道; 三支柱绝缘子; 非均匀介电涂层; 几何优化; 电场分布

Optimization Design of GIL Three-Pillar Insulators Based on Geometric Shape and Surface Dielectric Distribution

CHEN Sheng¹, XU Bowen², GENG Zhenxin¹, LIN Xin¹, ZHANG Jia³, WANG Yongqi³, LI Shuang⁴,
BI Haitao⁴, TIAN Yang⁵

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. School of Civil Engineering Design, Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou, Jiangsu 215123, China; 3. Electric Power Science Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730070, China; 4. Electric Power Research Institute, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110055, China; 5. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to control the concentrated distribution of electric field on the surface of three-pillar insulators and inserts, a geometric-dielectric optimization method based on finite element model(FEM) combined with evolutionary algorithm (EA) is proposed. Firstly, geometric and surface dielectric parametric models of gas insulated line(GIL) three-pillar insulators are established. The maximum tangential field strength of insulator surface E_{t-max} , the non-uniform coefficient of tangential field strength F_t , and the maximum normal field strength of insert surface E_{i-max} are taken as optimization targets, and geometric-dielectric optimization calculation is carried out by cyclic FEM with evolutionary algorithm. Compared with the results before optimization, E_{t-max} decreases from 11.3 kV/mm to 9.47 kV/mm, F_t decreases from 1.56 to 1.34, and E_{i-max} decreases from 31.9 kV/mm to 13.4 kV/mm. The geometric structure of the optimized three-pillar insulator has the characteristics of dumbbell type, the distance along the surface is increased, the overall profile is a circular arc with greater curvature, and the surface dielectric gradient after optimization is distributed in a "scoop curve". The results of optimization design can provide reference for the subsequent manufacture of three-pillar insulators, and the technical route of this paper can also be used for the optimization of other insulation parts.

Key words: GIL; three-pillar insulator; non-uniform dielectric coating; geometric optimization; electric field distribution

0 引言

目前我国的用电需求持续较快增长,而我国一次能源和电力负荷呈逆向分布的特殊性能源结构,因此,远距离、大容量且高可靠的电力传输及转换逐渐成为解决能源与负荷中心不均衡分布问题的最佳选择^[1-3]。气体绝缘输电管道(gas insulated line, GIL)与电缆和架空线相比,具有传输容量大、电能损耗小和环境适应能力强的特点,是解决能源与负荷分布不均的关键技术。三支柱绝缘子作为 GIL 中的关键部件具有机械支撑母线、保证外壳和导体同心度及电气绝缘等作用^[4],然而三支柱绝缘子气固界面电场分布不均匀度较高,导致沿面闪络故障频发,严重威胁高压气体绝缘设备乃至电力系统的安全稳定运行^[5],因此随着特高压 1 100 kV GIL 的发展应用,应尽可能地提升三支柱绝缘子沿面电场分布的均匀性,并总结一种普遍高效的优化方法为各类绝缘部件的优化过程提供参考^[6-7]。

国内外目前针对 GIL 中三支柱绝缘子电气性能优化的研究集中于几何优化和介电参数(介电常数/电导率)优化两方面。几何优化可以在一定程度上改善绝缘子的界面电场分布,但属于被动调控界面电场的策略,调控效果有限,且复杂的绝缘结构会增加设备制造的困难度以及制造成本^[8]。对绝缘子几何形状的优化通常以穷举的方法来实现,虽然简单但对于参数较多的模型耗时较长、操作复杂^[9],所以近年来一些学者采用人工智能算法进行结构优化取得了很好的结果^[10-13]。西安交通大学张施令以及外国学者 B M hamdi 等人利用粒子群算法对高压复合绝缘子均压环进行优化,较好地解决了大场域、多介质复杂模型的结构优化问题^[15-16]。除对绝缘子结构优化外,一些研究者应用介电功能梯度材料(dielectric FGM, d-FGM)均化绝缘子表面电场分布^[17-20]。介电参数优化一般指对三支柱绝缘子本体材料改性,但本体材料改性会影响绝缘子的机械性能^[21],并具有工艺复杂、难以工业化生产等问题。因此天津大学杜伯学团队首次提出了表面功能梯度绝缘子的设计思路^[22-23],发现非线性电导环氧复合

涂层不仅可以使空载条件下最大电场强度降低 40%,而且可以有效改善高温梯度下气-固电场分布^[24]。F. Messcrer 等学者系统研究了表面涂层对气-固界面电荷的调控作用^[25-26],发现均匀电导涂层可以有效改善绝缘子表面的电场分布,同时抑制绝缘子表面的电荷积聚。

由于三支柱绝缘子的特殊形状,现有盆式绝缘子的优化方法不能直接应用于三支柱绝缘子的界面电场调控中,并且无法简单地像圆台绝缘子仅通过提高绝缘子局部的表面电导率降低局部电场强度,而应关注三支柱绝缘子表面最大场强和电场分布的均匀性。三支柱绝缘子的形状及表面介电参数均对界面电场分布有很大影响,并且三支柱绝缘子的几何参数与表面介电参数较多,直接对初始模型同时开展几何-介电联合优化困难较大,难以取得理想的优化效果,因此有必要进一步研究三支柱绝缘子沿面电场分布的优化设计方法。本文提出了基于有限元模型(finite element model, FEM)结合进化算法(evolutionary algorithm, EA)的几何-介电联合优化方法。首先基于电场及应力场计算结果,选取绝缘子表面切向场强最大值、切向场强不均匀系数、嵌件表面法向场强最大值作为优化目标量;建立了三支柱绝缘子几何-介电参数化模型,选取合适的几何及介电参数,将 FEM 结合进化算法开展循环计算;对得到的优化结果与优化前进行对比分析并总结优化设计后绝缘子的特点。

1 建立计算模型

1.1 初始模型

首先建立 GIL 几何模型如图 1 所示。

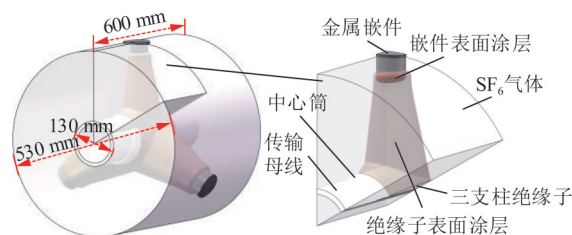


图 1 GIL 1/12 几何模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of GIL 1/12 geometric model

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0902500);国家自然科学基金资助项目(51777130)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB0902500); the National Natural Science Foundation of China(51777130).

GIL 几何模型包括传输母线、中心筒、三支柱绝缘子、金属嵌件、绝缘气体域、嵌件表面涂层及绝缘子表面涂层 7 个部分, 简化去除了不影响仿真计算的结构。由于优化设计过程中需多次循环剖分网格及有限元仿真计算, 因此为提升优化效率, 利用三支柱绝缘子对称特点, 取其 1/12 的几何模型进行后续优化计算。

绝缘子表面与金属嵌件表面设置 $200\ \mu\text{m}$ 的高电导涂层, 由于 GIL 内部场强整体分布为由导杆至外壳逐渐减小, 所以将绝缘子表面涂层电导率设置为随距中心导杆距离 r 变化的分段三次插值函数。嵌件表面积较小, 且场强分布较为均匀, 因此将嵌件表面涂层电导率设置为常量。初始模型中嵌件涂层与环氧树脂绝缘子取相同电导率 $10^{-14}\ \text{S/m}$, SF_6 电导率取 $10^{-20}\ \text{S/m}$ 。结合其他学者对常规三支柱绝缘子的电场仿真结果, 发现靠近外壳侧绝缘子支腿表面场强较高, 所以需要提高此处的表面电导率。结合文献[26]确定如图 2 所示的初始绝缘子表面涂层电导率分布, 保证后续优化设计是优中选优的过程。

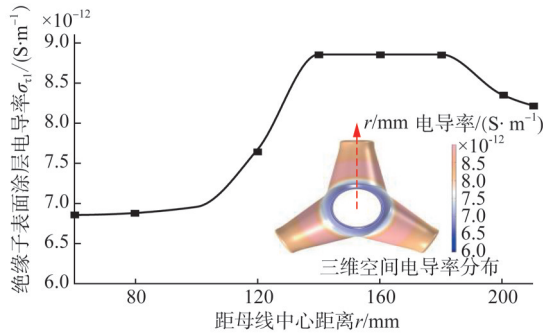


图 2 绝缘子涂层初始电导率分布

Fig. 2 Initial conductivity distribution of insulator coating

1.2 应力场及电场仿真

GIL 中关键的绝缘作用由气体介质提供, 而传输电能的母线无法依靠绝缘气体悬浮于管道中心, 所以三支柱绝缘子的首要作用是支撑传输母线, 其绝缘性能是被动引入而不得不满足的要求。首先对初始模型进行应力场仿真, 检验是否能达到机械性能的要求。GIL 在正常运行情况下, 三支柱绝缘子承受的气体压力是均匀的, 所以在应力场仿真时可以忽略气压, 仅考虑三支柱绝缘子承受的母线压力和自身重力即可。GIL 管道一般是水平放置, 所以应力场仿真分析时取 GIL 水平放置, 管道长度取 6

m, 在竖直方向上施加 $6\ \text{g}$ 加速度, 在重力方向侧的两个嵌件上施加固定约束, 计算得到初始绝缘子模型的应力场分布如图 3 所示。

由图 3 可知, 绝缘子所受最大应力 $1.21\ \text{MPa}$ 出现在与嵌件接触处, 远小于其材料环氧树脂的强度极限 $70\ \text{MPa}$, 同时传输母线所受最大应力 $36.4\ \text{MPa}$ 也远小于其金属材料的强度极限 $200\ \text{MPa}$ [27]。通过对初始模型的应力场仿真计算结果可以确定三支柱绝缘子各部分的应力极限不超过材料阈值, 并具有较大的裕度, 所以在后续优化设计中只考虑电场分布。

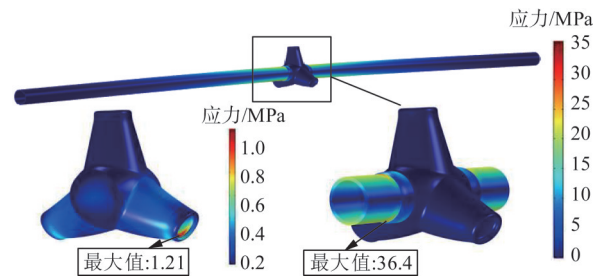
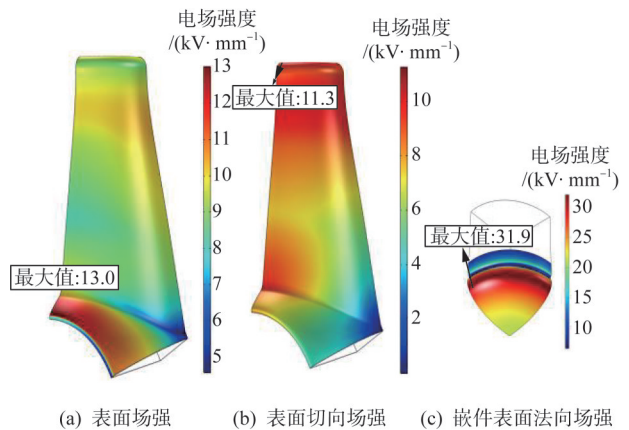


图 3 初始绝缘子模型应力场分布

Fig. 3 Distribution of stress field in initial insulator model

计算 GIL 内及三支柱绝缘子的电场分布时, 在传输母线上施加 $1\ 675\ \text{kV}$ 的雷电电压, 由于雷电冲击电压波长远大于绝缘子尺寸且作用时间较短, 故忽略时间效应和电荷积聚的影响, 与外壳接触的气体外侧接地得到初始模型中三支柱绝缘子及嵌件表面场强分布如图 4 所示。表 1 给出应力场及电场仿真中涉及的材料参数。

由图 4 可知, 初始模型中三支柱绝缘子表面场强集中在轴向腹部位置, 最大值 E_{max} 为 $13.0\ \text{kV/mm}$;



(a) 表面场强 (b) 表面切向场强 (c) 嵌件表面法向场强

图 4 初始绝缘子模型电场分布

Fig. 4 Initial insulator model electric field distribution

表面切向场强主要集中在支腿低压侧，最大值 E_{t_max} 为 11.3 kV/mm；嵌件表面法向场强集中边沿侧，最大值 E_{i_max} 为 31.9 kV/mm。三支柱表面场强、切向场强及嵌件表面法向场强的不均匀系数分别为 1.37、1.56、1.41，都属于稍不均匀电场，和绝缘子表面闪络故障密切相关的切向电场分布的不均匀性最大，应在优化设计过程中尤其关注。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

材料	铝	环氧树脂	SF ₆
泊松比	0.33	0.24	
密度/(kg·m ⁻³)	2 700	2 300	
杨氏模量/(GPa)	69	7	
电导率/(S·m ⁻¹)	3.03×10 ⁷	10 ⁻¹⁴	10 ⁻²⁰

2 参数化模型及优化方法

2.1 几何参数化模型

传统参数化方法存在着局部扰动能力差等缺陷，为了满足局部控制的需求，本文采用非均匀有理 B 样条曲线 (non-uniform rational b-splines, NURBS) 拟合重构三支柱绝缘子支腿、腹部及嵌件的轮廓，保证了光滑性及连续性，且变形空间更大。在原始结构上合理选择插值点，利用插值点坐标拟合出非均匀有理 B 样条曲线，并反求出其控制点坐标，通过控制样条曲线控制点坐标的变化，实现样条曲线的变形，从而实现三支柱绝缘子几何形状的改变。几何参数化模型如图 5 所示。

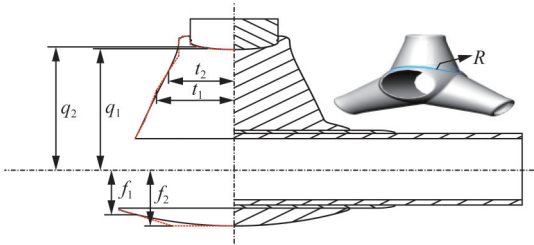


图 5 三支柱绝缘子几何参数化模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of geometric parametric model of three-pillar insulator

对三支柱绝缘子支腿、腹部及嵌件轮廓分别取 t_1 、 t_2 、 f_1 、 f_2 、 q_1 、 q_2 ，3 组变量控制其变形，另取绝缘子三维结构中支腿与腹部接触处的圆角参数 R 作为参数化变量，7 个变量即可实现三支柱绝缘子关键轮廓的几何变形，其初值及范围如表 2 所示。

表 2 几何参数范围

Tab. 2 Geometric parameter range

结构位置	参数	初值/mm	范围/mm
三支柱绝缘子支腿	t_1	67.4	[40, 70]
	t_2	57.0	[35, 60]
三支柱绝缘子腹部	f_1	82.0	[71, 95]
	f_2	102	[95, 115]
金属嵌件	q_1	217	[210, 220]
	q_2	220	[215, 225]
支腿与腹部连接处	R	10.0	[10, 200]

2.2 非均匀介电涂层参数化

本文将三支柱绝缘子表面涂层的电导率设置为以距中心导杆距离 r 为变量的分段三次插值函数，通过控制 8 个插值点的数值 c_1 — c_8 ，即绝缘子关键位置的电导率，实现表面涂层电导率的非线性分布。这种介电参数化方法相比于离散型、梯度型介电绝缘子，在实现绝缘子表面涂层电导率改变的同时可以保证每个关键位置间的连续过渡，避免了离散型表面介电梯度绝缘子由于梯度跳变引起的电场畸变，另取参数 c_i 作为嵌件表面电导率。三支柱绝缘子及嵌件表面涂层介电参数化模型示意图见图 6，介电参数的初值及范围见表 3。

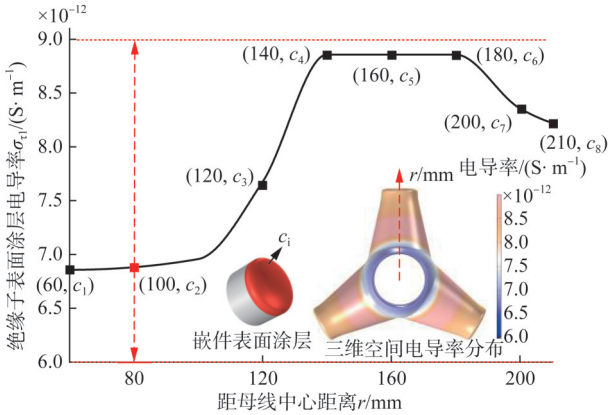


图 6 三支柱绝缘子及嵌件表面涂层介电参数化模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of dielectric parameterization model for surface coatings of three-pillar insulators and inserts

2.3 优化方法

由于三支柱绝缘子表面切向电场的分布直接关系到 GIL 运行中是否会发生绝缘子沿面闪络事故，所以应重点关注绝缘子表面切向场强最大值 E_{t_max} 和表面切向场强的不均匀系数 F_t ；同时应考虑环氧-金属界面，即嵌件表面的法向场强最大值 E_{i_max} ，以

表 3 介电参数范围

Tab. 3 Dielectric parameter range

结构位置	参数	初值/($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	范围/($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)
绝缘子表面涂层	c_1	6.86×10^{-12}	$[6 \times 10^{-12}, 9 \times 10^{-12}]$
	c_2	6.96×10^{-12}	$[6 \times 10^{-12}, 9 \times 10^{-12}]$
	c_3	7.68×10^{-12}	$[6 \times 10^{-12}, 9 \times 10^{-12}]$
	c_4	8.86×10^{-12}	$[6 \times 10^{-12}, 9 \times 10^{-12}]$
	c_5	8.86×10^{-12}	$[6 \times 10^{-12}, 9 \times 10^{-12}]$
	c_6	8.86×10^{-12}	$[6 \times 10^{-12}, 9 \times 10^{-12}]$
	c_7	8.36×10^{-12}	$[6 \times 10^{-12}, 9 \times 10^{-12}]$
	c_8	8.22×10^{-12}	$[6 \times 10^{-12}, 9 \times 10^{-12}]$
嵌件表面涂层	c_i	1.00×10^{-14}	$[6 \times 10^{-12}, 9 \times 10^{-12}]$

防止发生绝缘子本体击穿故障。

经以上分析, 优化设计以三支柱绝缘子表面切向场强最大值 $E_{t\text{-max}}$ 、切向场强分布不均匀系数 F_t 以及嵌件表面法向场强最大值 $E_{i\text{-max}}$ 3 个目标量尽可能小作为优化目标。几何形状优化阶段, 三支柱绝缘子与嵌件轮廓决策变量设为 $\mathbf{x}_1$, 其中包含 7 个参数, 如式(1)所示。

$$\mathbf{x}_1 = [t_1, t_2, f_1, f_2, q_1, q_2, R] \quad (1)$$

$\mathbf{x}_{1\text{max}}$ 、 $\mathbf{x}_{1\text{min}}$ 分别为表 2 几何参数范围中 $\mathbf{x}_1$ 的上界和下界, 此阶段优化的数学模型可用式(2)描述为:

$$\begin{aligned} \min E &= [E_{t\text{-max}}, F_t, E_{i\text{-max}}] \\ \text{s.t. } \mathbf{x}_{1\text{min}} &\leq \mathbf{x}_1 \leq \mathbf{x}_{1\text{max}} \end{aligned} \quad (2)$$

表面涂层介电分布优化阶段, 三支柱绝缘子表面涂层与嵌件表面涂层电导率分布决策变量设为 $\mathbf{x}_2$, 其中包含 9 个参数, 如式(3)所示。

$$\mathbf{x}_2 = [c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9] \quad (3)$$

$\mathbf{x}_{2\text{max}}$ 、 $\mathbf{x}_{2\text{min}}$ 分别为表 3 介电参数范围中 $\mathbf{x}_2$ 的上下界, 此阶段优化的数学模型可用式(4)描述。

$$\begin{aligned} \min E &= [E_{t\text{-max}}, F_t, E_{i\text{-max}}] \\ \text{s.t. } \mathbf{x}_{2\text{min}} &\leq \mathbf{x}_2 \leq \mathbf{x}_{2\text{max}} \end{aligned} \quad (4)$$

几何-介电联合优化阶段, 首先经敏感性分析剔除相关性弱的参数, 需要同时将几何参数及介电参数归入决策变量 $\mathbf{x}_3$, 如式(5)所示。

$$\mathbf{x}_3 = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2] \quad (5)$$

此阶段优化的数学模型可用式(6)描述。

$$\begin{aligned} \min E &= [E_{t\text{-max}}, F_t, E_{i\text{-max}}] \\ \text{s.t. } \begin{cases} \mathbf{x}_{1\text{min}} \leq \mathbf{x}_1 \leq \mathbf{x}_{1\text{max}} \\ \mathbf{x}_{2\text{min}} \leq \mathbf{x}_2 \leq \mathbf{x}_{2\text{max}} \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

3 基于 FEM-EA 优化设计

采用 EA 与 FME 结合的方法对三支柱绝缘子及

嵌件的几何形状和表面涂层介电分布进行优化设计的过程如图 7 所示。

优化过程中, EA 算法多次调用 FEM 模型进行仿真计算, 由图 7 可知, 本文的几何优化过程中 3 个优化目标量的波动较小, 但整体可看出随着循环优化次数, 优化目标量均呈减小的趋势。介电优化过程中 $E_{t\text{-max}}$ 与 F_t 的波动很大, 说明 $E_{t\text{-max}}$ 、 F_t 与绝缘子表面介电分布不是简单的线性关系, 导致寻优过程中起伏很大, 而 $E_{i\text{-max}}$ 循环优化过程中只有个别点波动较大, 整体较为平稳, 说明 $E_{i\text{-max}}$ 与嵌件表面涂层的介电参数基本满足线性关系, 使 $E_{i\text{-max}}$ 的寻优过程较为顺利。在优化设计的第 191 次取得几何优化的最优设计, 第 381 次取得介电优化的最优设计。后文对优化结果进行具体分析。

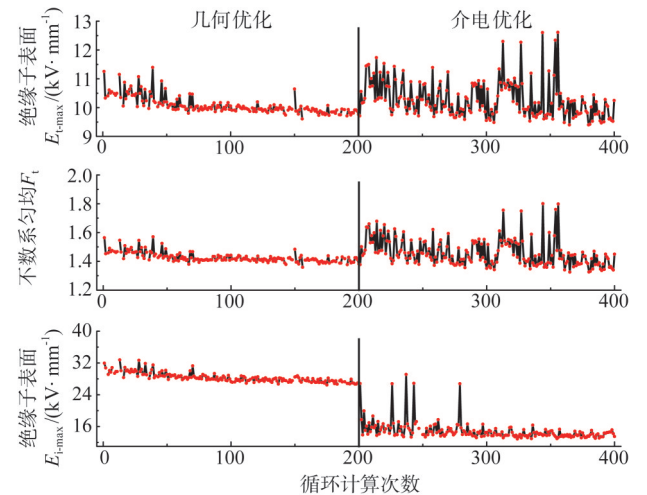


图 7 几何-介电优化过程

Fig. 7 Geometric-dielectric optimization process

3.1 几何形状优化结果

优化前后几何形状对比如图 8 所示, 基于上述几何循环优化过程得到最优设计的电场计算结果如图 9 所示, 几何参数及优化目标量见表 4。

从图 8 中轴向截面轮廓对比图可以看出, 与优

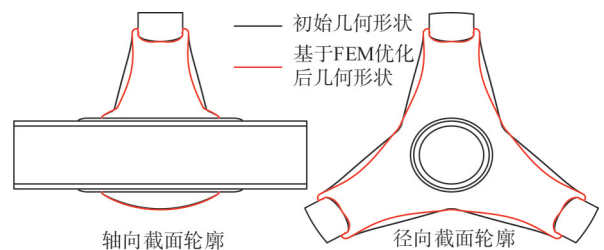


图 8 几何形状对比图

Fig. 8 Comparison of geometric shapes

化前的初始结构相比, 优化后的绝缘子轮廓呈现曲率更大的类圆弧曲线, 支腿更细, 轮廓凹向内侧, 增大了沿面距离; 腹部轮廓略微凸向外侧, 腹部厚度几乎不变; 嵌件表面轮廓更凸向绝缘子侧, 即嵌件插入绝缘子的深度变大。

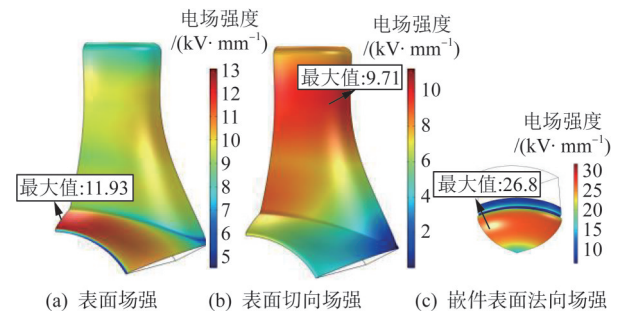


图 9 几何形状优化后电场分布
Fig. 9 Electric field distribution after geometric shape optimization

表 4 几何形状优化设计结果

Tab. 4 Geometric structure optimization design results				
优化参数	优化值/mm	优化指标	优化值	优化效果/%
t_1	42.5	$E_{t_max}/(kV \cdot mm^{-1})$	9.71	-14.1
t_2	43.5			
f_1	84.6			
f_2	104	F_t	1.38	-11.5
q_1	210			
q_2	219	$E_{i_max}/(kV \cdot mm^{-1})$	26.8	-16.0
R	10.0			

图 9 与图 4 对比发现, 几何优化后绝缘子靠近嵌件支腿处的表面场强得到较大改善, 场强最大值 E_{max} 由 13.0 kV/mm 降低至 11.9 kV/mm, 出现的位置不变, 保持在轴向截线上; 绝缘子与外壳接触面附近的切向场强得到了明显改善, 将切向场强最大值 E_{t_max} 由优化前的端面改善至支腿侧面, 从 11.3 kV/mm 降低至 9.71 kV/mm, 切向场强的均匀程度也得到提高, 不均匀系数 F_t 从 1.56 降低至 1.38; 优化后嵌件表面法向场强得到小幅降低, 分布更为均匀, 最大值 E_{i_max} 向嵌件中心靠近, 由 31.9 kV/mm 减小至 26.8 kV/mm。总之, 经基于 FEM 结合 EA 的方法对三支柱绝缘子及嵌件结构进行优化后表面场强分布更均匀, 最大场强均减小, 电气性能得到提升。

3.2 介电分布优化结果

对绝缘子表面涂层的电导率分布以及嵌件表面

涂层电导率联合进行优化设计。优化绝缘子表面涂层电导率分布时, 在初始分布的基础上调整插值点对应数值, 范围均设置为 6×10^{-12} S/m 至 9×10^{-12} S/m, 实现大范围内的介电性能自由变化。优化前后的表面涂层电导率分布情况对比见图 10, 优化后所得最优设计的电场计算结果如图 11 所示, 介电参数及优化目标量见表 5。

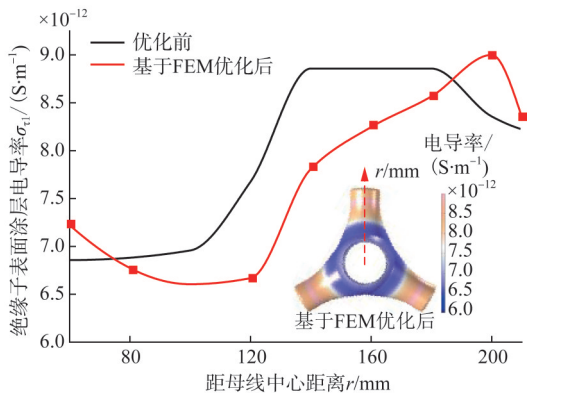


图 10 绝缘子涂层优化后电导率分布
Fig. 10 Conductivity distribution of insulator coating after optimization

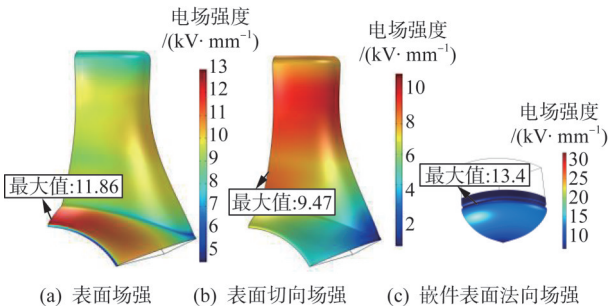


图 11 涂层介电参数优化后电场分布
Fig. 11 Electric field distribution after dielectric parameter optimization of coating

表 5 介电分布优化设计结果

Tab. 5 Dielectric distribution optimization design results				
优化参数	优化值/mm	优化指标	优化值	优化效果/%
c_1	7.22×10^{-12}	$E_{t_max}/(kV \cdot mm^{-1})$	9.47	-16.2
c_2	6.61×10^{-12}			
c_3	6.67×10^{-12}			
c_4	7.81×10^{-12}	F_t	1.34	-14.1
c_5	8.25×10^{-12}			
c_6	8.57×10^{-12}			
c_7	9.00×10^{-12}	$E_{i_max}/(kV \cdot mm^{-1})$	13.4	-58.0
c_8	8.35×10^{-12}			
c_9	1.00×10^{-12}			

从图10中介电分布优化前后的分布曲线对比发现,对绝缘子表面涂层进行分析,优化后 c_1 、 c_7 、 c_8 三个参数值大于初始值, c_2 — c_6 均小于初始值,曲线走势与优化前基本相似,但不同的是优化前绝缘子腹部与支腿部连接处表面电导率陡增,而优化后的电导率趋势变为先缓慢减小而后出现两个缓增区;优化后嵌件表面涂层的电导率 c_i 从初始的 10^{-14} S/m变化为 10^{-12} S/m,达到设置范围的上限。

图11与图4对比发现,场强最大值 $E_{\max}$ 在几何优化的基础上进一步得到改善,由11.93 kV/mm降低至11.86 kV/mm,依旧出现在轴向截线上;切向场强最大值 $E_{t\max}$ 由几何优化后的支腿侧面转移至轴向截线上,从9.71 kV/mm降低至9.47 kV/mm,切向场强分布在几何优化后的基础上变得更均匀,不均匀系数 F_t 从1.38降低至1.34;由于嵌件表面涂层电导率调整至可行域上限,所以优化后嵌件表面法向场强大幅降低,最大值 $E_{f\max}$ 重新回到边沿位置,由26.8 kV/mm减小至13.4 kV/mm。总之,经基于FEM结合EA的方法对三支柱绝缘子及嵌件表面涂层介电分布优化后,表面场强分布更均匀,最大场强进一步减小,电气性能得到提升。

4 结论

本文首先建立了GIL三支柱绝缘子几何及表面介电参数化模型,应用有限元法计算电场分布及应力场分布,采用FEM联合EA的几何-介电联合优化方法,对三支柱绝缘子表面切向场强最大值、切向场强不均匀系数、嵌件表面法向场强最大值展开优化设计。

基于FEM-EA几何-介电优化后,三支柱绝缘子表面场强最大值 $E_{\max}$ 减小了8.95%,表面切向场强最大值 $E_{t\max}$ 减小了15.9%,表面切向场强分布不均匀系数减小了14.6%,嵌件表面法向场强最大值减小了58.0%。优化后的三支柱绝缘子几何形状具有哑铃型的特点,增大了沿面距离,整体轮廓呈曲率更大的圆弧形;嵌件轮廓与优化前变化不大,其表面法向场强最大值的优化效果主要由表面介电优化提供。与优化前三支柱绝缘子表面的介电分布相比,优化后的表面电导率呈“勺形曲线”分布,表面电导率与距中心母线距离基本呈线性正相关,电导率平均值比优化前更小,但在绝缘子靠近母线和嵌件的两端,表面电导率更大。

在优化过程中电气性能较优的三支柱绝缘子都具有与上述相似的几何和表面介电分布特点,哑铃型几何形状与“勺形曲线”表面介电分布具有一定的代表性,可为后续在GIL三支柱绝缘子的生产设计提供参考,并且对于其他高压设备及部件的绝缘优化问题,也可考虑采用本文的优化方法。

参考文献

- [1] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等.中国未来电网的发展模式和关键技术[J].中国电机工程学报,2014,34(29):4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [2] 李惠玲.新型电力系统背景下西部送端直流电网及系统运行特性[J].中国电力,2023,56(8):166-174.
LI Huiling. Sending-terminal DC power grid in western China and its operation characteristics in the context of new power system[J]. Electric Power, 2023, 56(8): 166-174.
- [3] 李响,武海潮,王文雪,等.考虑大规模新能源接入的电网性能评价指标体系[J].电力系统保护与控制,2024,52(15):178-187.
LI Xiang, WU Haichao, WANG Wenxue, et al. Performance evaluation index system of a power grid considering large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 178-187.
- [4] 李鹏,颜湘莲,王浩,等.特高压交流GIL输电技术研究及应用[J].电网技术,2017,41(10):3161-3167.
LI Peng, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Research and application of UHVAC gas-insulated transmission line[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3161-3167.
- [5] DU B X, LIANG H C, LI J, et al. Electrical field distribution along SF/N filled DC-GIS/GIL epoxy spacer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1202-1210.
- [6] 陈炜,胡胜,卢铃,等.计及遮雨帽和隔音装置的空心电抗器散热性能分析及结构参数优化设计[J].南方电网技术,2022,16(9):64-74.
CHEN Wei, HU Sheng, LU Ling, et al. Heat dissipation performance analysis of the air core reactor and structure parameters optimization design of rain cover and sound arrest[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(9): 64-74.
- [7] 吕金壮,陈兵,张长虹,等.特高压直流高速开关研发关键技术研究[J].南方电网技术,2023,17(5):9-18.
LÜ Jinzhuang, CHEN Bing, ZHANG Changhong, et al. Research on key technology of ultra high voltage DC high speed switch[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 9-18.
- [8] 张博雅,张贵新.直流GIL中固-气界面电荷特性研究综述I:电荷调控及抑制策略[J].电工技术学报,2018,33(22):5145-5158.
ZHANG Boya, ZHANG Guixin. Review of charge accumulation characteristics at gas-solid interface in DC GIL, Part II: charge control and suppression strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5145-5158.
- [9] 孙西昌,彭宗仁,党镇平,等.特高压交流架空线路用复合绝

- 缘子均压特性研究[J]. 高压电器, 2008, 44(6): 527 - 530.
- SUN Xichang, PENG Zongren, DANG Zhenping, et al. Study on electrical stress grading of composite insulators for UHV transmissionlines[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6): 527 - 530.
- [10] 曹云东, 刘晓明, 刘冬, 等. 动态神经网络法及在多变量电器优化设计中的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 114 - 118.
- CAO Yundong, LIU Xiaoming, LIU Dong, et al. Investigation of adynamic neural network approach and its application of multivariable optimization to electrical apparatus[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 114 - 118.
- [11] STIH Z. High voltage insulating system design by application of electrode and insulator contour optimization [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1986, 21(4): 579 - 584.
- [12] 杜进桥, 张施令, 李乃一, 等. 特高压交流盆式绝缘子电场分布计算及屏蔽罩结构优化[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 3037 - 3043.
- DU Jinqiao, ZHANG Shiling, LI Naiyi, et al. Electric field distribution calculation and shielding electrode structure optimization of UHVAC basin-type insulator[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 3037 - 3043.
- [13] 庞金岭, 杨熙, 梁经龙. 基于子模型技术的500 kV复合杆塔横担电场分析及均压环结构参数优化[J]. 南方电网技术, 2019, 13(10): 74 - 80.
- PANG Jinling, YANG Xi, LIANG Jinglong. Electric field analysis of 500 kV composite cross-arm and structure parameters optimization of its grading rings based on submodeling technology[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(10): 74 - 80.
- [14] 张施令, 胡伟, 彭宗仁, 等. 采用有限元和粒子群算法优化特高压复合绝缘子均压环结构[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 359 - 367.
- ZHANG Shiling, HU Wei, PENG Zongren, et al. Structural optimization of grading ring for ultra high voltage composite insulator by combining finite element method and particle swarm optimization algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 359 - 367.
- [15] HAMDI B M, TEGUAR M, MEKHALDI A. Optimal design of corona ring on HV composite insulator using PSO approach with dynamic population size [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2016, 23(2): 1048 - 1057.
- [16] KATO K, KURIMOTO M, SHUMIYA H, et al. Application of functionally graded material for solid insulator in gaseous insulationsystem [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(2): 362 - 372.
- [17] 李文栋, 刘哲, 有晓宇, 等. 叠层式介电功能梯度绝缘子的介电常数分布优化[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(10): 19 - 26.
- LI Wendong, LIU Zhe, YOU Xiaoyui, et al. Permittivity distribution optimization for multi-layer dielectric fgm insulator [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(10): 19 - 26.
- [18] VOLPOV E. Dielectric strength coordination and generalized spacer design rules for HVAC/DC SF₆ gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(6): 949 - 963.
- [19] XUE J Y, CHEN J H, DONG J H, et al. Enhancing flashover performance of alumina/epoxy spacers by adaptive surface charge regulation using graded conductivity coating [J]. Nanotechnology, 2020, 31(36): 364002.
- [20] 李进, 王泽华, 陈允, 等. 高压气体绝缘输电设备用功能梯度材料研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2471 - 2477.
- LI Jin, WANG Zehua, CHEN Yun, et al. Research progress on functionally graded materials for high voltage gas insulated transmission apparatus [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2471 - 2477.
- [21] LI J, LIANG H C, DU B X, et al. Surface functional graded spacer for compact HVDC gaseous insulatedsystem [J]. IEEE Transactions on Dielectrics andElectrical Insulation, 2019, 26(2): 664 - 667.
- [22] DU B X, RAN Z Y, LI J, et al. Novel insulator with interfacial o-FGM for DC compact gaseous insulatedpipeline [J]. IEEE Transactions on Dielectrics andElectrical Insulation, 2019, 26(3): 818 - 825.
- [23] 周宏扬, 马国明, 刘姝媛, 等. 基于电-热多物理场耦合模型的直流GIL绝缘子表面电荷积聚及其对沿面电场影响的研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1251 - 1260.
- ZHOU Hongyang, MA Guoming, LIU Shubin, et al. Study on surface charges accumulation on insulator and its effects on the surface electrical field in DC-GIL with electro-thermal coupling model [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1251 - 1260.
- [24] MESSERER F, FINKEL M, BOECK W. Surface charge accumulation on HVDC-GIS-Spacer [C]// 10th IEEE International Symposium of Gaseous Dielectrics, April 07 - 10, 2002, Boston, MA, USA. New York: IEEE, 2002: 421 - 425.
- [25] MESSERER F, BOECK W. High resistance surface coating of solid insulating components for HVDC metal enclosed equipment[C]//1999 11th International Symposium on High Voltage Engineering, August 27 - 23, 1999, London, UK. New York: IEEE, 1999: 63 - 66.
- [26] 胡琦, 李庆民, 刘智鹏, 等. 基于表层梯度电导调控的直流三支柱绝缘子界面电场优化方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1856 - 1865.
- HU Qi, LI Qingmin, LIU Zhipeng, et al. Interfacial electric field optimization of DC tri-post insulator based on gradient surface conductance regulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1856 - 1865.
- [27] 黎斌. SF₆高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

收稿日期: 2023-10-30; 网络首发日期: 2024-06-25

作者简介:

陈圣(1998), 男, 博士研究生, 研究方向为现代电气设备优化设计理论与技术、高压开关设备气体放电机理, chensheng7115@163.com;

徐博文(1989), 男, 讲师, 博士, 研究方向为新型材料的开发与应用、结构优化设计及稳定性智能监测与分析, Bowen.Xu@xjtlu.edu.cn;

林莘(1961), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为高压电工装备等离子体放电理论、高压电器及其智能化技术、高压开关设备关键技术及应用, sylinxin@163.com。