

DOI: 10.7652/xjtuxb201610004

叠层式介电功能梯度绝缘子的介电常数分布优化

李文栋¹, 刘哲¹, 有晓宇¹, 李晓冉¹, 张冠军¹, 董勤晓²

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 中国电力科学研究院, 100192, 北京)

摘要: 针对目前缺少介电功能梯度材料(*d*-FGM)内部介电特性分布的优化方法这一问题,提出了一种适用于交变电压下的叠层式介电常数 FGM(ϵ -FGM)绝缘子内部介电特性的优化算法。该算法以降低绝缘子沿面最大电场强度为目标,使用迭代方法,根据当前电场强度、目标电场强度及介电常数上下限等设计参数,自适应地调整每层材料的介电常数,获得优化的介电常数分布;通过改变迭代系数和缩减系数,控制算法收敛过程,降低计算时间和资源消耗。仿真结果表明:相对于匀质绝缘子, ϵ -FGM 绝缘子内部及沿面附近电场的不均匀程度得到明显改善,沿面最大场强的降幅超过 60%;绝缘子的单层厚度应当在工艺条件满足的基础上尽可能地减小;沿面最大场强会随着介电常数上限的增加而非线性降低,存在饱和现象,饱和阈值与优化前的沿面最大场强呈正相关。研究结果验证了该算法的有效性,且表明以 ϵ -FGM 为代表的 *d*-FGM 具有优异的电场分布优化效果,有望在各类高压设备的固体绝缘系统中获得广泛的应用。

关键词: 固体绝缘;功能梯度材料;电场分布

中图分类号: TM854 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)10-0019-08

Permittivity Distribution Optimization for Multi-Layer Dielectric FGM Insulator

LI Wendong¹, LIU Zhe¹, YOU Xiaoyu¹, LI Xiaoran¹, ZHANG Guanjun¹, DONG Qinxiao²

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

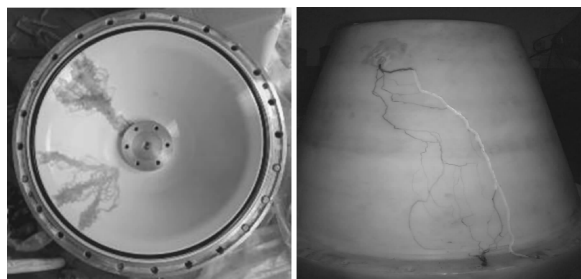
Abstract: At the present there lacks proper optimization method for internal dielectric properties of dielectric functionally-graded-material (*d*-FGM). An optimization algorithm of internal permittivity distribution for multi-layer permittivity FGM (ϵ -FGM) insulator under AC voltage is proposed, which aims at weakening the maximum electric field (e-field) strength along the insulator surface. According to design parameters, such as current e-field strength, objective e-field value and permittivity range, the permittivity value of each layer is self-adaptively updated with iterations to obtain the optimized permittivity distribution. The iterative coefficient and shrinking coefficient are adjusted to control the convergence process and shorten calculation period. Compared with uniform insulator, e-field distribution inside and along the surface of ϵ -FGM insulator is more uniform and the maximum e-field strength along surface is weakened more than 60%, and the layer thickness of the multi-layer ϵ -FGM insulator ought to be set as

收稿日期: 2016-01-04。 作者简介: 李文栋(1989—),男,博士生;张冠军(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2015CB251003);国家自然科学基金创新研究群体资助项目(51521065);国家杰出青年科学基金资助项目(51125029)。

small as possible under the allowed fabrication conditions. The maximum surface e-field strength decreases nonlinearly with the increasing permittivity upper limit and saturates as the upper limit reaches certain threshold value, which has positive correlation with the maximum e-field strength before optimization.

Keywords: solid insulation; functionally graded material; electric field distribution

近年来,随着电力系统超/特高压、大容量输电的发展需求,以及脉冲功率、激光、微波等高新技术装备向高电压、小型化、高可靠性的方向发展,电气绝缘问题日趋突出。国内气体绝缘开关设备(GIS)各类闪络击穿事故频发,严重危害电力系统的安全稳定运行^[1-2],如图 1a 所示。一些脉冲功率设备(如速调管、加速器、Z 箍缩装置等)都曾发生过真空中绝缘子击穿引起事故^[3-5],如图 1b 所示。高电压、强电场下固体绝缘沿面上的放电破坏现象已成为制约电力设备和脉冲功率装备整体性能的关键问题。



(a)GIS 盆式绝缘子 (b)脉冲功率圆台绝缘子

图 1 在沿面放电事故中损坏的高电压设备绝缘子

一般认为,电场不均匀度较高是实际绝缘设备因放电被破坏的重要原因。长期以来,为改善绝缘结构的电场分布,在材料类型固定的前提下,进行了很多优化电极和绝缘结构的工作,即控形(控制形状),常用方法包括增大电极曲率半径、增加屏蔽环等^[6-9]。控形的方法起到了一定的作用,然而使绝缘结构更加复杂,增加了设备制造和维护的难度,调控效果也较为有限^[10]。

通过调整材料的内在属性来改善电场分布,即控性(控制性质)。材料学领域中功能梯度材料(FGM)的概念就属于控性的范畴,其特征为材料特性在内部不同空间位置上呈现梯度变化,被广泛的应用于航空航天、生物工程、机械工程等领域^[11-13]。类似的,通过调控材料内部的介电特性(如介电常数 ϵ 、电导率 γ 等)的分布,完全可以有效调控绝缘结构的电场分布,且相对于传统的控形方法,FGM 这类控性方法具有绝缘结构简单、调控方式灵活等明显的优势。

国内外对介电功能梯度材料(d -FGM)绝缘子开展了初步的研究工作。文献[14-16]基于离心制造技术,制备了 d -FGM 绝缘子,在 SF_6 气体氛围下的实验表明:绝缘子的雷电冲击闪络电压相对于匀质绝缘子提高约 10%~50%。文献[17]对给定介电常数分布的 d -FGM 绝缘子进行了几何形状优化的研究。文献[18]通过计算机仿真,认为 d -FGM 材料能够将原本不均匀的电场均匀化。文献[19-20]进行了叠层式 d -FGM 绝缘子的制备,表明相对于匀质绝缘子,其在真空下的雷电冲击闪络电压得到了一定的提升。

目前,作为一种新型的功能绝缘材料和结构的 d -FGM 绝缘子的研究仍然处于探索阶段,其中介电梯度分布优化设计需要将材料特性参数控制与电场优化结合考虑,增加了设计灵活性的同时也增加了其复杂性。前人的研究大部分是在介电参数分布已经确定的情况下进行电场计算,用来验证 FGM 优化电场的效果,较少进行介电参数分布优化的研究,对算法约束条件与优化效果之间的影响关系的研究也不多见。

本文以 d -FGM 中的介电常数 FGM(ϵ -FGM)为研究对象,针对交流 GIS 及脉冲功率设备中 3 种典型的 ϵ -FGM 绝缘子模型(圆台、盘式及盆式)进行了介电常数分布的优化,并进一步分析了设计参数对优化效果的影响。沿面场强得到大幅降低,证明了本文优化方法的有效性。

1 d -FGM 调控电场分布的机理

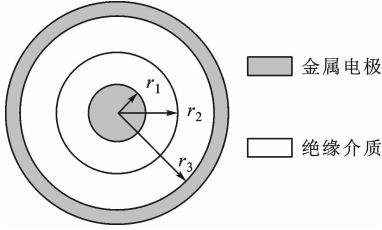
根据所调控的介电参数, d -FGM 可以进一步分为介电常数 FGM(ϵ -FGM)和电导率 FGM(γ -FGM)两类,其中 ϵ -FGM 绝缘子调控电场分布可由高斯定理等推导得到。以图 2a 中的同轴圆柱形双层介质结构为例,在实际工频及雷电冲击电压下,介质电场可采用准静态近似,若进一步忽略电导的影响,则可将介质电场等效为静电场。此时,若双层介质的介电常数分别为 ϵ_1 、 ϵ_2 ,则可以得到内、外层介质上的电压降分别为^[21]

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} \left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)^{-1} U \\ U_2 &= \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)^{-1} U \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: U_1 、 U_2 分别为内、外层介质上的电压降; $U = U_1 + U_2$ 为内外电极之间的总电势差; r 为介质中某点到轴线的距离; r_1 、 r_2 、 r_3 的定义如图 2a 所示。进一步考虑到各层中的最大场强 $E_{1\max}$ 、 $E_{2\max}$ 均在其内圆柱的外表面以及 $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, 可得

$$E_{1\max} \epsilon_1 r_1 = E_{2\max} \epsilon_2 r_2 = U \left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)^{-1} \quad (2)$$

由式(2)可知,若双层介质的介电常数相等($\epsilon_1 = \epsilon_2$),则 $E_{1\max}/E_{2\max} = r_2/r_1$, 由于 $r_2 > r_1$, 所以 $E_{1\max} > E_{2\max}$, 如图 2b 所示。若介质为不均匀介质且 $\epsilon_1 > \epsilon_2$, 则 $E_{1\max}$ 和 $E_{2\max}$ 会比较接近, 见图 2c。



(a) 结构示意图

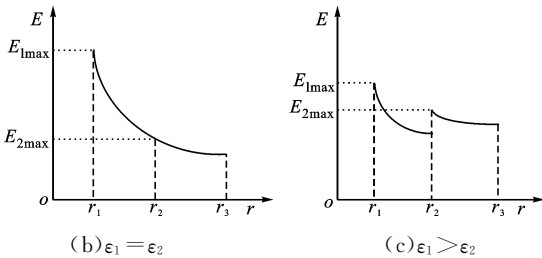


图 2 双层 ϵ -FGM 介质的结构及电场分布

类似地,用电导率 γ 代替介电常数 ϵ , 并利用分界面上的电流连续性,就可以针对双层 γ -FGM 得到类似的关系 $E_{1\max} \gamma_1 r_1 = E_{2\max} \gamma_2 r_2$ 。此时,若内层介质电导率 γ_1 大于外层介质电导率 γ_2 , 则介质电场分布也将得到优化。

由上述的讨论可以看出,对于双层介质,通过提高局部电场集中区域材料的介电常数或电导率,均可以达到均匀电场的目的。类似的结论可扩展到层数 $n > 2$ 的多层介质以及介电常数连续分布的 d -FGM 介质。实际上,此类非均匀绝缘的设想已经在高压电力电缆和电机绕组槽口等场合有所应用,并使其电晕起始电压得到提升^[21]。这进一步佐证了 d -FGM 介质在优化电场分布上的可能性。

众所周知,在交流和脉冲电压激励下的电场分布主要由介电常数 ϵ 决定,直流电压作用下的电场分布由 γ 决定(在交流及冲击电压下,流过绝缘材料的位移电流远大于传导电流,介电常数的影响较为明显,而在直流电压条件下,稳态仅有传导电流,电场分布则主要由电导率分布决定)。另一方面,相对于 ϵ 、 γ 受温度影响明显,导致可控性差。因此,采用调控 ϵ 的方法来改善电场分布更为有效。本文亦将针对 ϵ -FGM 进行研究。

2 ϵ -FGM 绝缘子介电常数分布优化

2.1 典型 ϵ -FGM 绝缘子模型

对交流 GIS 及脉冲功率设备中 3 种典型的绝缘子模型(圆台、盘式以及盆式)进行优化计算。3 种模型均为轴对称结构,其中 ϵ -FGM 绝缘子置于高压电极与地电极之间,电压 U 为 10 kV,电极间距 d 均为 10 mm,圆台与盆式绝缘子中绝缘子与介质的夹角均为 45° ,与脉冲功率设备中的经验值一致^[22]。整个模型置于气体或真空氛围中(介电常数均为 1)。模型中的绝缘子被均匀切分成了 N 个叠层,每层薄片的介电常数均可以在一定范围内变化,以此构成一维叠层式 ϵ -FGM 绝缘子结构,如图 3 所示。

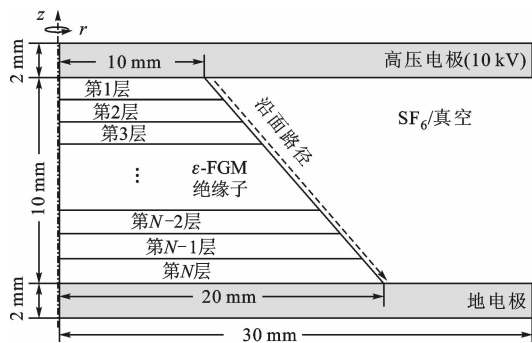
2.2 介电常数分布优化算法

本文使用迭代计算的方法进行介电常数分布的优化工作。待优化变量为叠层式 ϵ -FGM 绝缘子每层材料的介电常数(约束在一定范围内),优化目标为降低绝缘子沿面路径(见图 3)的最大电场强度 $E_{\max}$ 。算法流程如图 4 所示,其中 ϵ -FGM 绝缘子各层的初始介电常数均设为 4(接近常用的环氧树脂材料的介电常数),作为优化的初始条件。

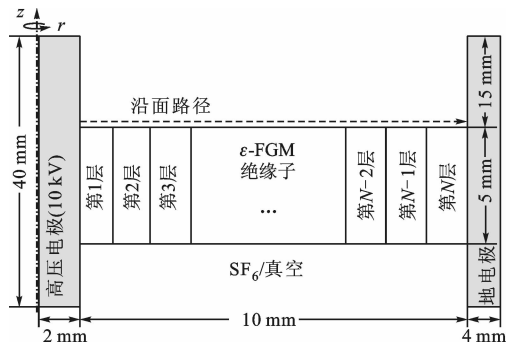
对于第 i 层($1 < i < N$)的介电常数,通过迭代方法进行优化,迭代公式为

$$\epsilon'_i = \epsilon_i \frac{E_i}{E_{\text{obj}}} \frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon_{\min}} C \quad (3)$$

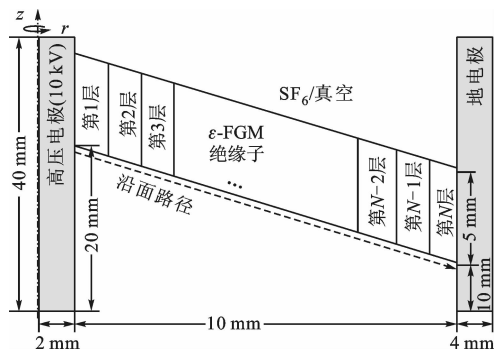
式中: ϵ_i 和 ϵ'_i 分别为第 i 层薄片迭代前、后的相对介电常数; E_i 是第 i 层薄片气-固沿面上的当前最大场强; E_{obj} 是优化目标场强, $E_{\text{obj}} = U/d$, 即平均场强; $\epsilon_{\max}$ 和 $\epsilon_{\min}$ 分别是材料介电常数的上下限; C 为迭代系数,其初值等于 E_{obj} 除以初始条件下 $E_{\max}$ 的值; K 为缩减系数,用以控制 C 减小的速度,即算法收敛的速度,其取值范围为 $0 \sim 1$ 。在迭代过程中,如果 C 小于 0.01,则终止运算以结束优化。 C 小于 0.01 意味着若继续进行优化, $E_{\max}$ 的变化范围将小于 100 V/mm^[23]。



(a) 圆台绝缘子



(b) 盘式绝缘子



(c) 盆式绝缘子

图3 叠层式 FGM 绝缘子模型结构

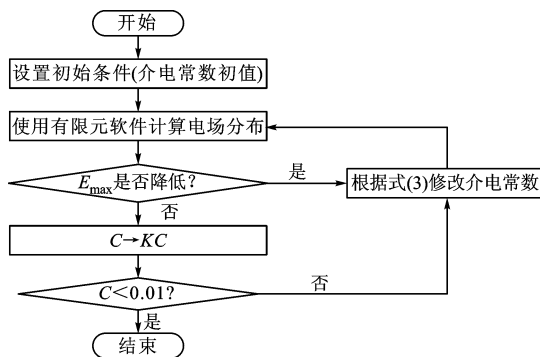


图4 介电常数优化算法流程

2.3 算法实现方式

本文优化方法是在 MATLAB 代码中调用有限元软件 ANSYS 实现,其中利用 MATLAB 进行总体的优化工作,利用 ANSYS 进行 ϵ -FGM 绝缘子电

场分布的计算,ANSYS 和 MATLAB 之间通过存储介电常数及电场强度分布的两个列表文件进行数据交换,总体流程如图 5 所示。

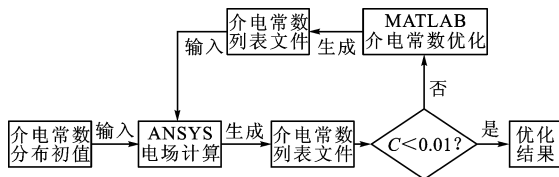


图5 优化算法软件实现

在优化过程中,首先确定优化计算所需的各项参数,如缩减系数 K 、叠层数目 N 、介电常数上下限 $\epsilon_{\max}$ 和 $\epsilon_{\min}$ 等。程序同时给出介电常数的初始分布,本文中各层材料的介电常数初值均为 $\epsilon_{\min}$ 。初始化完成之后,计算程序进行绝缘子模型介电常数分布的迭代优化,直到满足 2.2 节中的优化终止条件。优化结束后, MATLAB 将优化结果(包含基本信息、介电常数优化值、电场强度计算值等)输出至 Excel 文件,供后续分析使用。

本文使用 ANSYS v14.5 进行电场数值计算。采用 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 编写运算脚本,以绝缘子的轴向截面作为计算对象。计算过程中采用静电场等效,选取二维静电场分析单元 plane121 作为单元类型。网格剖分采用用户控制的剖分方法,网格尺寸为 0.05 mm,具有较高的解析度。后处理阶段通过 APDL 指令,实现界面电场强度及其切向、法向电场分量的求取及导出,与 MATLAB 程序配合实现介电常数分布的优化求解。

3 结果及分析

3.1 缩减系数 K 对优化的影响

在本文研究过程中,发现缩减系数 K 对 $E_{\max}$ 及迭代次数 N_{it} 均有影响。为了研究 K 的影响,针对 3 种绝缘子模型进行了优化,优化过程中 $\epsilon_{\max}$ 和 $\epsilon_{\min}$ 分别取 100 和 4,叠层数目 N 取 100, K 在 0.05~0.95 之间变化,结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,当 K 小于 0.3 时,优化后 $E_{\max}$ 随 K 的增大而降低,在 K 超过 0.3 之后,对优化后 $E_{\max}$ 的影响减小,此时沿面最大场强接近系统平均值,优化效果较好。然而,随着 K 的进一步增大,特别是当 $K > 0.7$ 时,迭代次数 N_{it} 将会随着 K 的增大而迅速增加,在 $E_{\max}$ 并没有显著变化的情况下, N_{it} 的增加意味着消耗更多的计算时间及资源,导致优化算法效率的降低。综上所述, K 应在 0.3~0.7 之间进行选取,本文选取 0.5 作为后续优化

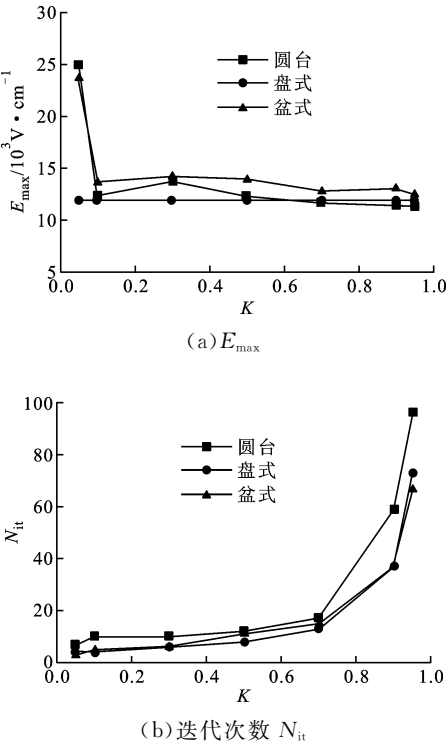


图 6 K 对优化后的 $E_{\max}$ 及迭代次数的影响

计算中的缩减系数。

3.2 电场优化效果

本文对比了 3 种叠层式 ϵ -FGM 绝缘子优化前、后整体及沿面路径上的电场强度分布,如图 7 及图 8 所示,同时给出了优化后的 ϵ -FGM 绝缘子各层介电常数分布,如图 9 所示。在优化过程中, $\epsilon_{\max}$ 、 $\epsilon_{\min}$ 及 N 取值与 3.1 节相同, K 取 0.5。

对比优化前后绝缘子内部及沿面的电场分布,可以看出,相比较于匀质绝缘子(ϵ 均匀为 4.0), ϵ -FGM 绝缘子沿面 $E_{\max}$ 从 $(2.5 \sim 6) \times 10^4 \text{ V/cm}$ 降低到了 $(1 \sim 1.5) \times 10^4 \text{ V/cm}$,降低幅度超过 60%,接近目标场强,绝缘子内部及沿面附近的电场不均匀度明显降低。这证明了本文优化方法的有效性,同时验证了 ϵ -FGM 绝缘子在电场调控上的显著潜力。

由图 9 可以看出,虽然优化算法设置的介电常数上限 $\epsilon_{\max}$ 是 100,但是最终 3 种绝缘子模型优化得到的介电常数最大值均未达到 $\epsilon_{\max}$ 。与图 7 的对比表明,介电常数的分布与初始匀质材料的电场分布较为类似。

3.3 叠层数对优化效果的影响

本节在前述优化方法的基础上,进一步研究了叠层数 N 对优化效果($E_{\max}$ 、 N_{it} 及电场均匀性)的影响,优化过程中 $\epsilon_{\max} = 100$ 、 $\epsilon_{\min} = 4$ 、 $K = 0.5$,研究结果如图 10、图 11 及表 1 所示(1 层对应匀质绝缘

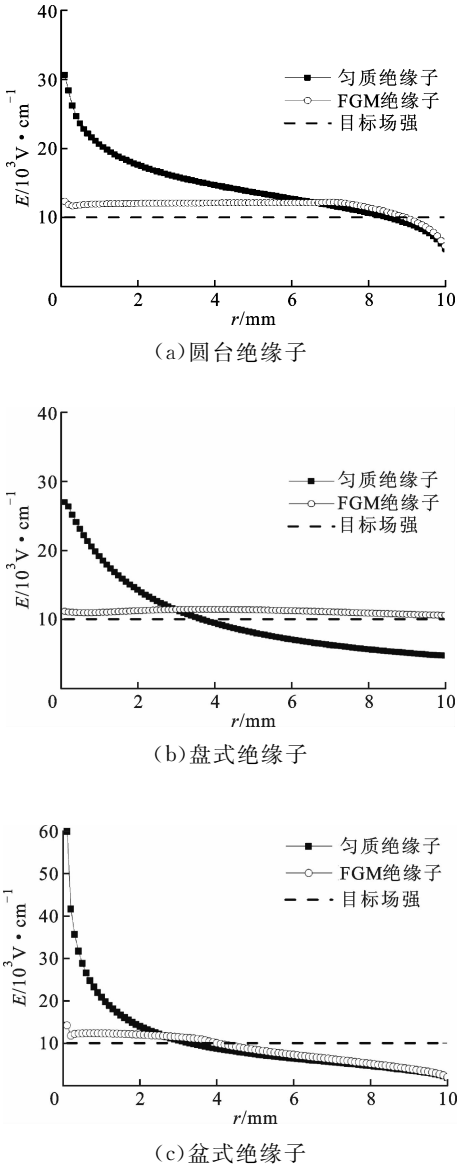


图 7 绝缘子沿面电场强度分布对比

子)。从结果可以看出,对于 3 类典型绝缘子模型,叠层数目的增加(即叠层厚度的减小)均会使 $E_{\max}$ 降低。若叠层数过少,优化后的 $E_{\max}$ 仍然较大(见图 10),层间界面上的电场集中现象较为明显(见图 11);当 $N > 10$ 时, $E_{\max}$ 的降低将趋于饱和,优化效果明显。由图 11 可以进一步看出,叠层数越大,叠层厚度越小,沿面电场分布的波动越小,分界面上的电场集中现象也将得到抑制。

因此,在叠层式 ϵ -FGM 绝缘子的制备过程中,叠层数应当在工艺条件满足的基础上尽可能的增加,即每层厚度应尽可能减薄。

由表 1 可知,迭代次数 N_{it} 的变化不明显,算法的运行时间和效率受到叠层数目的影响不明显。需要指出的是,当绝缘子层数为 1 时,不存在优化问

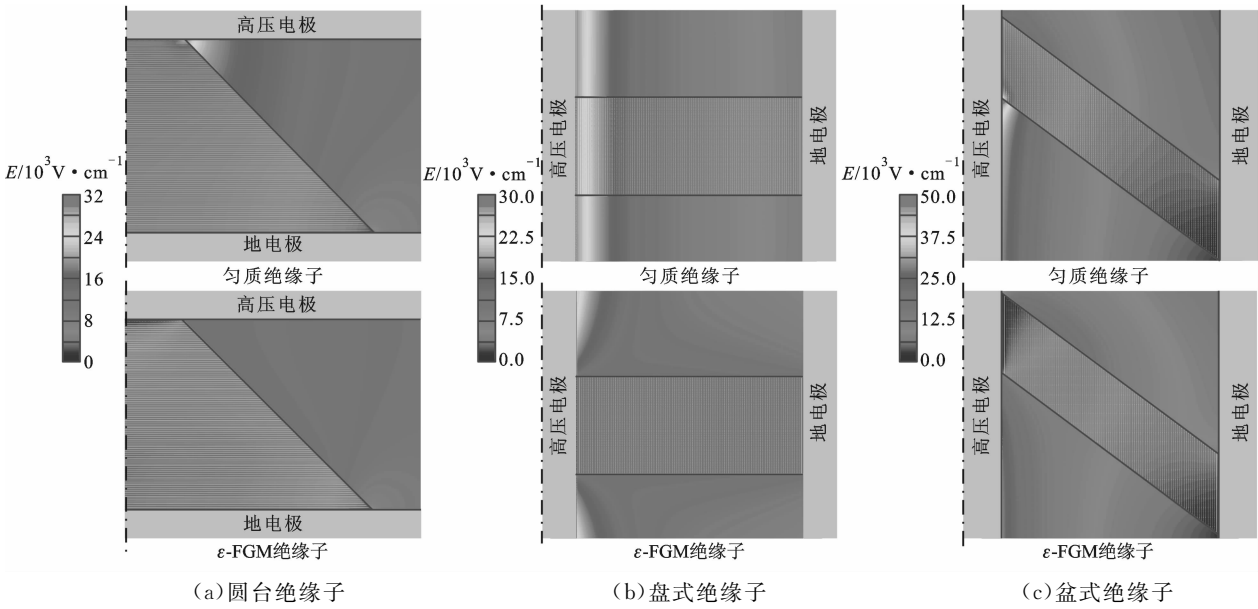


图 8 优化前后绝缘子电场分布图

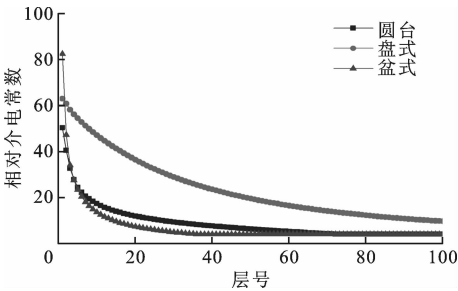


图 9 ϵ -FGM 绝缘子介电常数分布

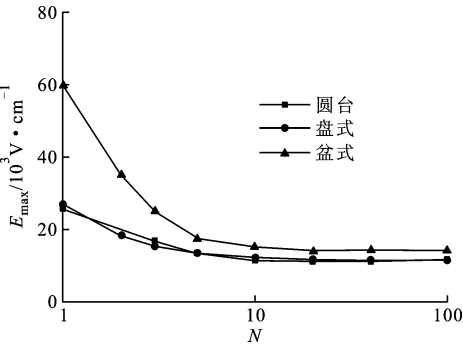


图 10 叠层数 N 对沿面最大场强的影响

的电场平均效应给抵消,则沿面最大场强 $E_{\max}$ 将无法得到降低,最终导致算法发散及优化失效。

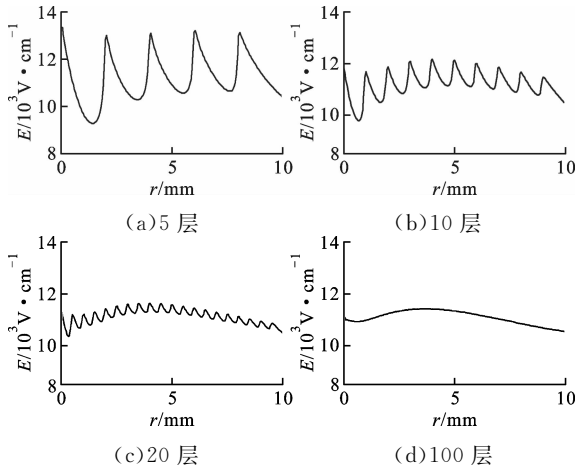


图 11 叠层数 N 对盘式绝缘子沿面电场分布的影响

表 1 叠层数 N 对迭代次数 N_{it} 的影响

N	N_{it}		
	圆台	盘式	盆式
1*	1	1	1
2		9	8
3	13	10	11
4	14	10	10
5	12	10	9
10	12	9	14
20	11	9	16
40	13	9	17
60	12	10	16
80	13	9	16
100	12	9	16

注:加“*”数据对应介电常数为 4 的匀质绝缘子。

题,因此迭代次数为 1。在仿真过程中发现,圆台绝缘子在层数 $N=2$ 时,优化计算无法收敛,而在盘式和盆式绝缘子模型中没有出现这一问题。这可能是由于在圆台式绝缘子模型中,高压电极处介质沿面与电极表面夹角小于 90° ,当介质介电常数大于真空介电常数时,沿面电极-介质-气体(真空氛围)三结合点处的电场将得到增强,且这一增强效应随着介质介电常数的增加而更加显著。因此,在优化过程中,若局部三结合点电场增强的效应无法被整体

经过进一步的计算与分析,作者初步认为,可能出现算法发散现象的条件有:①叠层数 N 较少;②初始电场不均匀度较低;③某一区域材料介电常数的增加会提升该区域的电场强度(增强效应)。在不改变绝缘子整体结构的情况下,增加叠层数 N 可以有效地避免这一问题的出现。

3.4 介电常数调整范围对优化效果的影响

针对层数为 100 的 ϵ -FGM 绝缘子模型,本文进一步研究了介电常数变化范围对优化效果的影响。令介电常数下限 $\epsilon_{\min}$ 固定为 4, $\epsilon_{\max}$ 在 10~320 范围内变化,研究 $\epsilon_{\max}$ 对优化效果的影响,结果如图 12 所示($\epsilon_{\max}=4$ 对应匀质绝缘子)。从图中可以看出,对于 3 类绝缘子模型,随着 $\epsilon_{\max}$ 的增加,沿面最大场强 $E_{\max}$ 逐渐减小,优化效果得到提升。不过, $E_{\max}$ 减小的速率将随着 $\epsilon_{\max}$ 的增加而逐渐降低,下降过程呈现非线性下降并逐渐趋于饱和的特点。对于圆台和盘式绝缘子, $E_{\max}$ 下降出现饱和的 $\epsilon_{\max}$ 阈值为 60; 对于盆式绝缘子, $\epsilon_{\max}$ 饱和阈值约为 200。

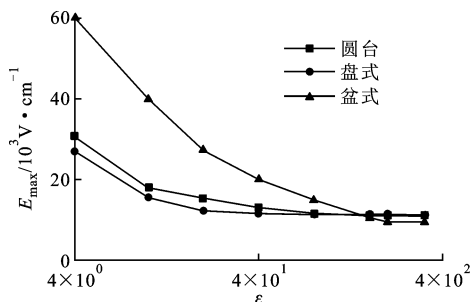


图 12 介电常数上限对优化效果的影响

对于这一饱和现象,结合 3.2 节中的匀质绝缘子的沿面电场分布,可以初步认为, $\epsilon_{\max}$ 的饱和阈值与待优化绝缘结构优化前的最大电场强度及电场不均匀度有关。由图 8 可知,对于本文的圆台及盘式绝缘子模型,优化前 $E_{\max}$ 均在 $(2.5 \sim 3.0) \times 10^3 \text{ V/cm}$ 范围之内,且两者较为接近,而对于盆式绝缘子模型,其优化前 $E_{\max}$ 均在约为 $6 \times 10^4 \text{ V/cm}$,远高于另两类绝缘子模型的值。由此可以看出,对于本文中的绝缘子模型, $\epsilon_{\max}$ 的饱和阈值与优化前最大电场强度 $E_{\max}$ 呈正相关, $E_{\max}$ 越高, $\epsilon_{\max}$ 的饱和阈值也越大。

4 结 论

本文依据电磁场理论,阐述了介电功能梯度绝缘材料通过改变材料内部介电特性(介电常数或电导率)来改善绝缘系统电场分布的机理。针对 ϵ -FGM 绝缘子,提出了一种绝缘子内部材料介电常数

分布的迭代优化算法,引入了缩减系数 K 用于控制算法的运行速度,并给出了基于 MATLAB+ANSYS 的算法实现方式。针对圆台、盘式及盆式 3 种叠层式 ϵ -FGM 绝缘子结构,本文使用提出的优化方法,进行了电场优化效果及其影响因素的仿真研究。

(1)为了保证优化效果,减少迭代次数,缩减系数 K 应在 0.3~0.7 之间进行选取。

(2)电场优化结果表明,相对于传统的匀质绝缘子, ϵ -FGM 绝缘子沿面最大场强 $E_{\max}$ 降幅超过 60%,内部及沿面附近的电场不均匀度明显降低。

(3)叠层厚度影响的研究表明,对于叠层式 ϵ -FGM 绝缘子,单层厚度应当在工艺条件满足的基础上尽可能地减小。

(4)当单层材料的介电常数下限固定时,沿面最大场强会随着叠层最大介电常数的增加而非线性降低,在其超过一定阈值后趋于饱和,饱和阈值与优化前的沿面最大场强呈正相关。

上述结论证明了本文方法的有效性,同时验证了 ϵ -FGM 绝缘子均匀电场分布的能力。可以认为,基于其优异的电场分布优化效果,以 ϵ -FGM 为代表的 d -FGM 绝缘子有望在各类高压设备中获得广泛的应用。

参考文献:

- [1] 禹化然, 蒋伟毅, 徐嵘. 一起 220 kV GIS 内部短路故障分析 [J]. 高压电器, 2013, 49(8): 115-118.
YU Huaran, JIANG Wei-yi, XU Rong. Analysis of a short circuit fault in a 220 kV gas insulated switchgear [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8): 115-118.
- [2] 汪晓明, 何萍, 刘衍, 等. 一起 500 kV HGIS 事故的分析及处理 [J]. 高压电器, 2014, 50(1): 129-132.
WANG Xiaoming, HE Ping, LIU Yan, et al. Analysis and treatment of a 500 kV hybrid gas insulated switchgear accident [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 129-132.
- [3] SAITO Y, MICHIZONO S, ANAMI S, et al. Surface flashover on alumina RF windows for high-power use [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(4): 566-573.
- [4] CRAVEY W R, DEVLIN G L, MAYBERRY C S, et al. Investigation of a high voltage vacuum insulator for the DARHT accelerator [C] // IEEE International Pulsed Power Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1997: 555-558.
- [5] SHOUP R W, LONG F, MARTIN T H, et al. Design validation of the PBFA-Z vacuum insulator stack

- [C]// IEEE International Pulsed Power Conference, Piscataway, NJ, USA; IEEE, 1997: 1608-1613.
- [6] 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.
- [7] 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 transmission lines [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6): 527-530.
- [8] 马爱清, 杨秀, 陆鑫森, 等. GIS 盘式绝缘子三维电计算及其逆问题分析 [J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1217-1221.
- MA Aiqing, YANG Xiu, LU Xinmiao, et al. 3D electric field calculation and its inverse problem analysis of disk-type insulator in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1217-1221.
- [9] 司马文霞, 施健, 袁涛, 等. 特高压复合绝缘子电场计算及基于神经网络遗传算法的均压环结构优化设计 [J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 257-265.
- SIMA Wenxia, SHI Jian, YUAN Tao, et al. Electric field calculation of ultra high voltage composite insulator and optimization design of corona ring structure based on neural network and genetic algorithm [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 257-265.
- [10] 何金良, 谢竞成, 胡军. 改善不均匀电场的非线性复合材料研究进展 [J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 637-647.
- HE Jinliang, XIE Jingcheng, HU Jun. Progress of nonlinear polymer composites for improving nonuniform electrical fields [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 637-647.
- [11] KOIZUMI M. FGM activities in Japan [J]. Composites: Part B Engineering, 1997, 28(1/2): 1-4.
- [12] 李信, 刘海昌, 滕元成, 等. 功能梯度材料的研究现状及展望 [J]. 材料导报, 2012, 26(S1): 370-373.
- LI Xin, LIU Haichang, TENG Yuancheng, et al. Research status and future directions on functionally graded materials [J]. Materials Review, 2012, 26(S1): 370-373.
- [13] 温变英. 聚合物梯度材料的制备及材料结构与性能研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2003: 1-17.
- [14] KATO K, KURIMOTO M, SHUMIYA H, et al. Application of functionally graded material for solid insulator in gaseous insulation system [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(2): 362-372.
- [15] KURIMOTO M, KATO K, HANAI M, et al. Application of functionally graded material for reducing electric field on electrode and spacer interface [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(1): 256-263.
- [16] ISHIGURO J, KURIMOTO M, KOJIMA H, et al. Electric field control in coaxial disk-type solid insulator by functionally graded materials (FGM) [C]// IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2014: 663-666.
- [17] JU H J, KO K C, KIM D K. Optimization of a grounded electrode shape in gas insulated switchgear with a reversely elliptical permittivity graded insulator [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1749-1754.
- [18] 陈维, 唐泽荣, 缪江平, 等. 过滤法制备介电梯度功能材料的介电特性的研究 [J]. 应用科学学报, 2001, 19(2): 178-181.
- CHEN Wei, TANG Zerong, MIAO Jiangping, et al. A study of dielectrical properties of functional gradient material manufactured by a filtration method [J]. Journal of Applied Sciences, 2001, 19(2): 178-181.
- [19] LI Shengtao, ZHANG Tuo, SUN Jian, et al. Improvement of surface flashover performance in vacuum by co-firing Mo/Al₂O₃ cermets and Al₂O₃ ceramics [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(6): 1931-1937.
- [20] HUANG Qifeng, LI Shengtao, ZHANG Tuo, et al. Improvement of surface flashover characteristics about 45° insulator configuration in vacuum by a new organic insulation structure [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(6): 2115-2122.
- [21] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 16-18.
- [22] MILLER H C. Flashover of insulators in vacuum: review of the phenomena and techniques to improved holdoff voltage [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(4): 512-527.
- [23] OKUBO H, SHUMIYA H, ITO M, et al. Optimization techniques on permittivity distribution in permittivity graded solid insulators [C]// IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2006: 519-522.

(编辑 杜秀杰)