

# 非线性介电材料改善电缆内部场强分布研究

詹威鹏,陈腾彪,罗智奕,胡力广,徐曙

(深圳供电局有限公司,广东 深圳 518010)

**摘要:**随着输电线路的发展,运行电缆逐渐向高电压等级发展,电缆接头安装流程复杂,施工条件影响大,以上工艺流程问题需要解决。本文以 500kV 交流电缆为例,提出通过采用非线性复合材料替代现有的固定电导材料,实现材料参数关于空间的自适应,进而实现对电缆高场强的抑制作用。为获取最佳非线性参数,建立电缆 COMSOL&MATLAB 联合仿真模型,从而分析高压电缆绝缘部分的电场强度及电场分布情况。电路计算和仿真结果表明,选取合适的非线性电导材料对于均匀电缆内部场强有较好效果,为发展高等级电缆提供了思路。

**关键词:**非线性复合材料;均匀电场;联合仿真;遗传算法

中图分类号:TM21

文献标识码:A

文章编号:1004-7344(2022)35-0028-03

## 0 引言

在高压输变电系统中,随着目前城市管网建设及用电量提升,输电线路的电压等级越来越高,绝缘故障问题突出,也由此带来一系列设计和制造的难题<sup>[1-3]</sup>。

绝缘所造成的故障一般是由于电场分布不均导致,绝缘设备和部件的改善,对电场均匀分布及局部高电场强度的缓解,都会有很大帮助,同时可以降低设备设计及制造技术难度,减小运营成本<sup>[4-6]</sup>。早期研究者主要从电缆主绝缘的结构入手,通过改变电极形状、在介质内部添加多层极板、添加均压环等措施,从而控制电力设备内部和表面的电场强度分布,但这些方法在缓和主绝缘设备或绝缘部件局部的高电场强度的同时也增加了设备制造的复杂度和困难度,效果往往也不够明显。研究者转而查找可以随着外部电场改变的非线性电导材料,即采用聚合物基非线性绝缘材料。聚合物非线性绝缘材料是指以聚合物为基体填充非线性无机填料或弱离子导电高分子有机填料所制成的、且具有介电常数或电导率随电场强度及温度变化而变化的聚合物基复合材料<sup>[7-9]</sup>。介电特性与电导特性对空间电场具有很强的依赖性,复合材料的电导特性在非均匀电场作用下,具有自适应均化电场分布的功能,基于此功能,可以有效提升绝缘材料介质空间电场分布均匀,提高绝缘材料结构的绝缘利用系数,因此又被称为智能绝缘材料。非线性复合材料在弱电场作用下,介电常数和电导率保持很低水平,相当于绝缘体。非线性复合材料在高电场作用下,电导率会呈现很大的变化,对空间电场具有调节作用,在电场分布极不均匀情况下,非线性复合材料对高电场具有很强的抑制效果。

本文以 500kV 交流电缆为例,基于非线性介电材料建立了 COMSOL&MATLAB 联合仿真模型,详细分析了非线性介电材料对电缆内部场强分布的改善作用和机理。

## 1 电缆结构和非线性绝缘材料

500kV 交流电缆结构如图 1 所示。电缆本体结构由导体、导体屏蔽、XLPE 绝缘、绝缘屏蔽、阻水层、金属护套及外护套组成。

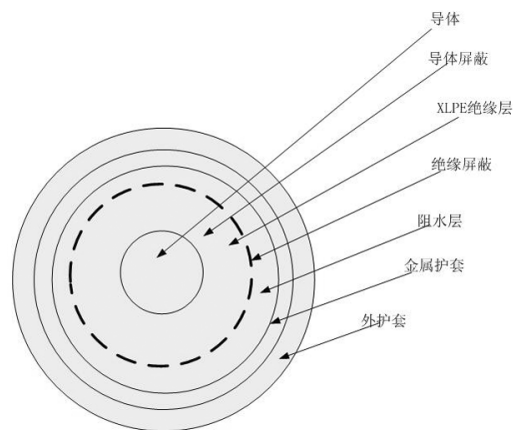


图 1 510kV 交流电缆结构

各结构几何参数表 1 所示。电缆内部各材料性能参数如表 1 所示,导体因不存在相对介电常数,其相对介电常数设为 10000。

相关研究表明,采用场致增强型非线性介电材料可以有效均匀场强,选用三种非线性材料作为绝缘件,系列 1 非线性材料  $\alpha=e^{-12}$ ,  $\beta=e^{-6}$ , 系列 2 非线性材料  $\alpha=2e^{-12}$ ,  $\beta=e^{-6}$ , 系列 3 非线性材料  $\alpha=e^{-12}$ ,  $\beta=2e^{-6}$ , 其非线性特性如图 2 所示。

表 1 500kV 交流电缆几何结构参数

结构参数	厚度	相对介电常数
铜导体	sqrt(3000)/pi	10000
导体屏蔽	2	50
XLPE 绝缘	30	2.3
非线性介电材料	30	$\epsilon=f(E)$
绝缘屏蔽	2	4.3
阻水带	5.5	—
金属护套	6	10000
绝缘外护套	9	—

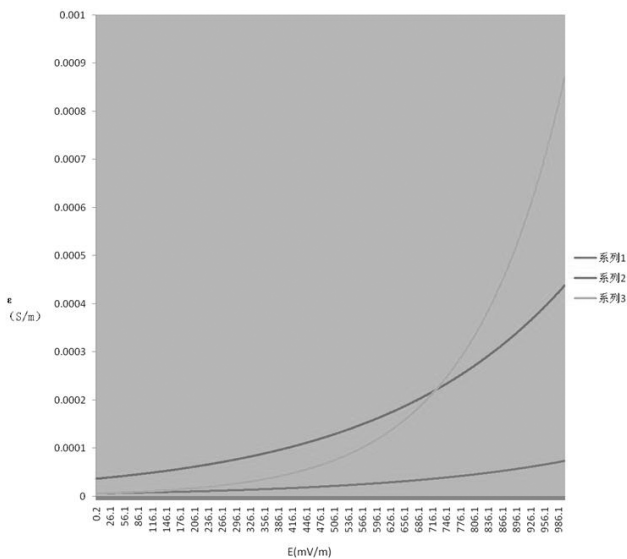


图 2 非线性电导特性

非线性介电材料相对介电常数可用以下公式表示。

$$\epsilon = e^{-\beta E^\alpha} \quad (1)$$

式中： $\epsilon$ ——电导率； $E$ ——电场强度； $\alpha$ 、 $\beta$ ——非线性系数。

## 2 非线性有限元仿真分析

为选取合适的非线性系数，采用 Comsol&Matlab 联合仿真方法，结合遗传算法进行求解。为了更清晰反映电场分布均匀程度，定义场强畸变因子  $F$  如式(2)所示。

$$F = \frac{E_{\max} - \frac{U}{d}}{\frac{U}{d}} \times 100\% \quad (2)$$

式中： $E_{\max}$ ——绝缘层中出现的最大场强值； $U$ ——外加电压幅值； $d$ ——绝缘层厚度。

优化目标是使畸变因子  $F$  最小，以非线性系数  $\alpha$ 、 $\beta$  为优化自变量，设立隶属度函数如式(3)所示。

$$\begin{aligned} \text{Min } E_{\max}(a, b, c, r); \\ \text{S.t. } a+c < M; \\ b+r < H. \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $E_{\max}(\alpha, \beta)$  表示当  $XX$  取特定数值时，电缆内部场强最大值。

(1) 遗传算法优化非线性系数流程图如图 3 所示，

打开仿真模型软件 COMSOL Multiphysics with MATLAB，创建静电场仿真模型。将要优化的静电场 COMSOL 仿真模型文件另存为 MATLAB 可以识别的 .m 文件，将 .m 文件保存在一个固定的仿真命名的文件夹中。model.m 文件的作用是计算电缆本体内部绝缘处的最大场强。

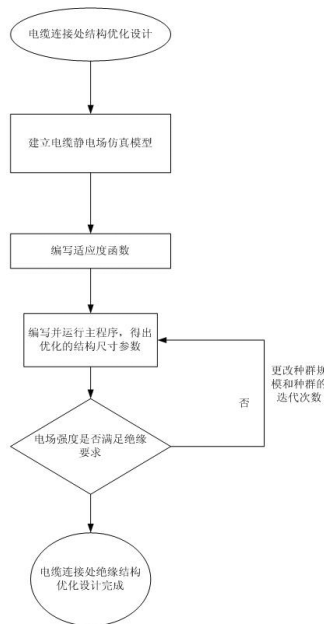


图 3 遗传算法优化非线性系数流程

(2) 编写适应度函数，将非线性复合材料的非线性系数作为优化变量，将高压电缆本体绝缘内部场强最大值的倒数作为适应度函数。以优化变量作为遗传函数算法的个体，先进行个体计算机的编码，选择个体编码、变异和交叉，通过软件编制的算法计算出的适应度函数值，个体的选择通过由适应度函数决定，将较高的适应度函数个体进行保留，剔除较低的适应度函数个体。

(3) 编写并运行主程序。在主程序文件中调用 MATLAB 自带的遗传算法，通过遗传算法工具进行计算，调用步骤(2)进行适应度函数的编写，定义非线性系数并设定初始值和变化范围；根据条件限制设定一定规模的种群（即在一次搜寻结构尺寸组合起来的个数）和进化代数（更新  $\alpha$ 、 $\beta$  可行解的次数）。在上面的过程中，初始值的优化选取是很关键的。如果选取的初始值不当，会造成最优解在初始状态下已选出的困境。所以电缆附件结构参数的初始状态参数不能盲目的选取。本文先通过 COMSOL 仿真文件中对电缆本体及附件结构参数进行参数化扫描，通过此过程选取合理的参数，将电缆本体或者附件场强最弱的区域参数作为遗传算法的初始值。使用遗传算法对  $\alpha$ 、 $\beta$  进行寻优，寻优过程结束后，得到非线性系数最佳值。将上述检测过程完成后，然后运行主程序，如果算法计算完成是收敛时，程序将主动输出优化的电缆附件结构参数和电缆

附件附近的最大场强

(4) 打开 COMSOL 仿真文件, 将优化后的结构参数模型  $\alpha$ 、 $\beta$  代入步骤一的 COMSOL 仿真模型中, 进行计算电缆本体及附件处的电场强度。如果电缆本体或者附件处的电场强度数值大小满足绝缘要求, 则整个电缆附件连接处绝缘结构的优化设计结束。如果连接处的电场强度数值大小不满足绝缘要求, 则回到第三步骤, 更改种群规模设置以及进行迭代次数的更改, 直到结构优化的仿真电场强度满足绝缘要求。

### 3 仿真结果分析

电缆中间接头的主绝缘设置为非线性复合材料, 应力锥绝缘设置为固定电导材料<sup>[10-13]</sup>。采用遗传算法对 500kV 电缆中间接头进行 COMSOL-MATLAB 电场联合仿真。进行计算, 迭代次数设置为 3 代。迭代结果如图 4 所示, 可以发现, 在经历 1 次迭代后即趋近于收敛, 对应的  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为  $1.8501 \times 10^{-12}$  和  $1.2096 \times 10^{-6}$ 。此时最大场强  $E_{\max}$  为 5.931kV/mm, 对应的场强畸变因子 F 降低至 11.56%。如图 4 所示。

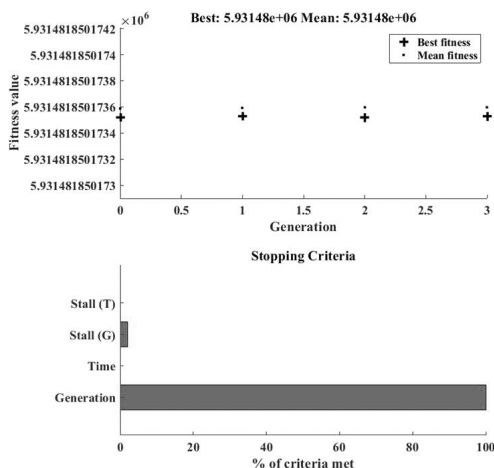


图 4 电缆绝缘为非线性电导材料时遗传算法迭代结果

电缆中间接头绝缘选用非线性复合材料, 电缆接头应力锥选用固定性电导材料, 情况下电缆接头内部等势线间隔更为分散, 原本集中于电缆绝缘中的场强分散到应力锥绝缘和中间接头绝缘中, 有效抑制了场强畸变<sup>[14-15]</sup>。如图 5 所示。

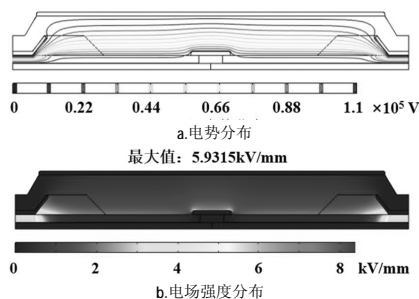


图 5 电缆绝缘为非线性复合材料时电缆接头内部电势及电场强度分布

### 4 结语

(1) 针对现有电缆接头安装工艺复杂、施工条件影响大的问题, 可以采用非线性介电材料均匀电缆内部场强。

(2) 通过 Comsol&Matlab 联合仿真方法, 结合遗传算法, 求解了最佳非线性系数。

(3) 仿真结果表明, 电缆绝缘材料选用非线性电导材料对场强均匀有较好的效果。

### 参考文献

- [1] 张德铭, 梁明, 王生明, 等. 新型电力电缆接头故障检测系统的设计[J]. 电气应用, 2005 (1): 29-31.
- [2] 蒋晓娟, 梁惟钢, 夏俊峰, 等. 35kV 电力电缆冷缩式中间接头典型缺陷电场计算及故障分析[J]. 绝缘材料, 2015 (11): 59-63.
- [3] 顾金, 王俏华, 尹毅, 等. 高压直流 XLPE 电力电缆预制式接头的设计[J]. 高电压技术, 2009, 35 (12): 3159-3163.
- [4] 张宇. 高压电缆中间接头故障及处理 [J]. 中国高新区, 2018 (6): 165.
- [5] 唐正森, 李景禄, 李志娟. 10kV 交联电缆接头施工工艺分析及改进措施[J]. 绝缘材料, 2009, 42 (2): 71-74.
- [6] 朱晓辉, 李旭, 王浩鸣, 等. 施涂 RTV 硅橡胶粘合工艺的中压电缆附件安装技术[J]. 绝缘材料, 2016 (9): 61-65.
- [7] SANAYEPASAND M, JAHROMI A N, ELHAG A H, et al. Comparison of Available Silicone Rubber Coatings for High Voltage Applications[J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2008, 9(1): 1-17.
- [8] LI R, ZHOU C, YU L, et al. Study on the thermal stability and ablation properties of metallic oxide-filled silicone rubber composites using uniform design method[J]. Journal of Polymer Engineering, 2016, 36(8): 805-811.
- [9] 李进卫. 新型电子电器绝缘性封装的环氧树脂材料[J]. 化学工业, 2015, 33 (11): 12-14.
- [10] 薛文彬. 高压电缆附件应用力锥材料的制备与性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- [11] 金维芳. 电介质物理学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000: 64-65.
- [12] 唐科, 文武, 丁俊杰, 等. 基于有限元法的电缆接头温度场仿真[J]. 电力建设, 2016, 37 (2): 145-150.
- [13] 李昭红. 高压直流 XLPE 绝缘电缆中间接头电热耦合仿真研究和稳态载流量计算[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [14] 吴光亚, 谭捷华, 张子龙, 等. 高压输电线路用复合绝缘子电位和电场分布的计算与改善[J]. 电力设备, 2004 (1): 29-32.
- [15] 林冬, 张雪莹, 王鹏宇, 等. 高压电缆中间接头轴向传热的实验研究[J]. 电线电缆, 2017 (1): 5-10.

作者简介: 詹威鹏(1983—), 男, 汉族, 广东深圳人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事高压电缆运行管理工作。