

# 特高压复合绝缘子有限元模型的简化

刘守豹, 阮江军, 余世峰, 黄道春

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了研究特高压复合绝缘子在长时间电场作用下的电场分布特性, 笔者对特高压复合绝缘子进行有限元建模, 并计算沿芯棒的电位分布。以完整细剖分模型的计算结果作为基准, 将简化模型的结果与其对比来验证简化模型的有效性。通过比较证明了简化模型可以代替完整模型进行复合绝缘子电位分布的分析且能够在很大程度上减小计算规模, 对特高压复合绝缘子的建模分析具有重要参考意义。

关键词: 特高压; 复合绝缘子; 有限元法; 电位分布

中图分类号: TM151; TM216

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)02-0004-03

## Simplified Finite Element Model for Ultra High Voltage Composite Insulator

LIU Shou-bao, RUAN Jiang-jun, YU Shi-feng, HUANG Dao-chun

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** A finite element model is built for ultra high voltage composite insulator to investigate its electric field distribution under long-term electric field effect. The result of complete and fine meshed model is taken as reference to examine the availability of simplified model. The results show that the simplified model could replace the complete model to analyze electric field distribution of an insulator, and diminish calculation cost greatly. It may be very useful for modeling and analyzing the ultra high voltage composite insulator.

**Key words:** ultra high voltage; composite insulator; finite element method (FEM); potential distribution

### 0 引言

绝缘子在输电线路中起着支撑导线和绝缘的重要作用, 其稳定运行对于电力系统的安全和稳定十分重要<sup>[1]</sup>。复合绝缘子相对于玻璃和瓷绝缘子具有重量轻、强度高、无零值、耐污性能好等优点<sup>[2]</sup>, 我国特高压输电的前期研究表明, 复合绝缘子将在特高压架空线路中得到广泛的应用<sup>[3]</sup>。复合绝缘子由有机材料制造, 在高场强的作用下易分解和失效<sup>[4]</sup>, 因此研究特高压复合绝缘子在长时间电场作用下的电场分布特性就特别重要, 电位分布直接决定着电场分布, 笔者着重分析复合绝缘子沿芯棒的电位分布特性。

目前大多数文献选择有限元方法作为计算复合绝缘子电位分布的手段。但是由于相对于整体场域而言, 绝缘子伞裙和金具的尺寸太小, 为了保证计算精度必需使绝缘子及其附近的区域被剖分的足够密, 这就加大了数据的处理量, 在需要建立三维模型

的情况下此问题尤为突出。为有效解决这一问题, 文[5]使用微单元(Macro element)来简化伞裙等结构重复的部分, 文[6]使用高精度快速边界元法代替有限元法来减小计算规模。

考虑到有限元法的通用性及其商业软件的普及, 笔者依然采用有限元方法对特高压复合绝缘子进行建模。由于复合绝缘子绝缘长度上电位分布近似呈浅 U 型曲线<sup>[7]</sup>, 绝缘子电位最大值出现在高压端芯棒和金具连接处<sup>[8]</sup>, 可以在保留其两端几何结构的前提下对中间伞裙进行简化。笔者通过计算提出了对特高压复合绝缘子的简化有限元模型, 对于以电位分布特性作为考察绝缘子性能的分析与设计的情况下, 简化模型可以较好地代替完整模型。

### 1 完整细剖分模型的建立

#### 1.1 基本参数

绝缘子型号为 FXBW-1000/210-9750, 共有大伞 57 个, 半径 250 mm, 间距为 158 mm; 中伞 57 个, 半径 164 mm, 距大伞 79 mm; 每个大伞与中伞间均

收稿日期: 2008-08-22 修回日期: 2008-12-13

作者简介: 刘守豹(1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为工程电磁场数值计算。

匀分布小伞2个,半径98 mm;均压环共3个,从上到下半径分别为300、500、175 mm,截面半径分别为60、60、25 mm。

### 1.2 计算模型的建立

根据复合绝缘子结构的对称性,可以建立二维轴对称模型<sup>[9]</sup>。以绝缘子下端金具几何中心为坐标原点建立直角坐标系,模型以实际几何尺寸建立,其整体用一个空气区域包围起来,模拟无穷大区域。在均压环以及绝缘子附近区域由于电位变化剧烈,且是关注的重点<sup>[10]</sup>,所以采取了3层剖分控制(见图1(a))以保证计算精度,对绝缘子的浅表面空气区域施加控制剖分框(见图1(b)),对上下均压环施加控制剖分框(见图1(c)),对较近空气区域施加控制剖分(见图1(d))。在这样的控制下剖分单元数为151 127,节点数为303 686。

从图1剖分控制区域的单元分布情况来看,从绝缘子伞裙到外围空气的三角形单元符合渐变和形状规则的要求,可以保证计算结果的准确性<sup>[11]</sup>。对绝缘子的下端金具施加1 000 kV电位,对上端金具和外围空气边界节点施加0电位后求解即可得到沿绝缘子芯棒的电位分布。图2是绝缘子下端的电位云图,图3给出了相邻大伞间的电位差占上下两端电位差的比例。

## 2 简化模型的建立

为建立绝缘子的有限元简化分析模型,从以下

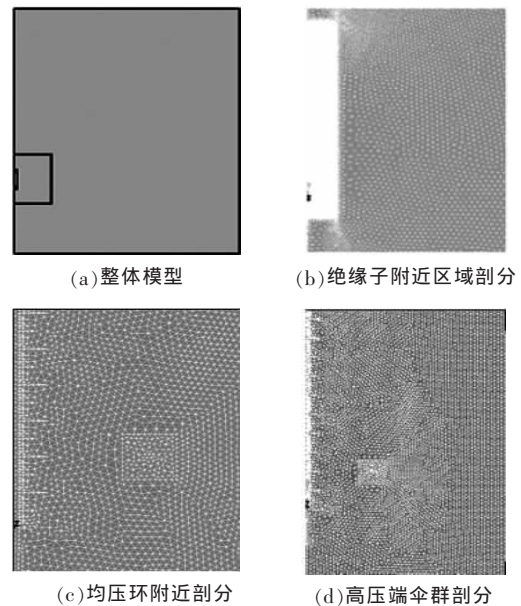


图1 计算模型及剖分控制区域单元

两个方面着手:减小剖分控制区域;省略重复出现的伞裙部分。作为探索性的研究,可采取如下的简化措施:取消第1部分所述的3层剖分控制框,将全部重复出现的57组伞裙仅保留中间的芯棒部分。这种简化使得单元数减少为27 786,节点数减少为56 473。

计算得到的绝缘子下端电位云图见图4,简化模型相邻大伞间的电位差占总体电位差的比例见图5,完整细剖模型与简化模型的电位分布百分比间的相对误差分布见图6。

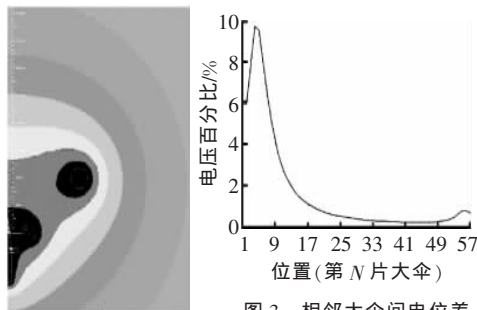


图2 绝缘子下端云图

图3 相邻大伞间电位差占总电位差的比例

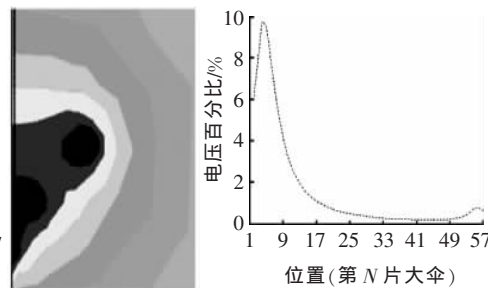


图4 简化模型的下端电位云图

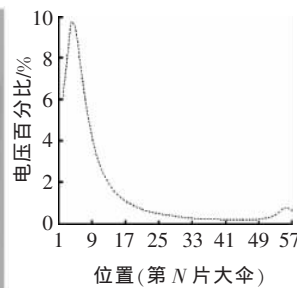


图5 简化模型相邻大伞间的电位差的比例

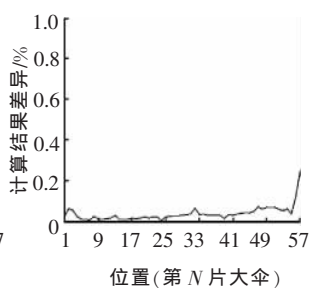


图6 简化模型与实际模型电压分布百分比相对误差

从图6与图4的对比中可以看出,在剖分量急剧减小的情况下,绝缘子附近的电位分布云图部分区域的连续性变差,但是从图5、6中可知,在芯棒方向这种简化方式是可行的。

## 3 对简化模型的优化

上一节的分析表明对完整细剖模型的简化方式是可行的,只是在剖分量减小后电位分布的连续性变差,通过图6也可看出简化模型在第3片和第57片大伞处电位分布情况与完整细剖模型有较大的差异,而这两个区域受均压环的影响很大,在需要考虑均压环位置对绝缘子电位分布影响的情况下

必须对上述的简化模型进行优化。

为此可做这样的处理:适当进行剖分控制;在保证中间大部分伞裙被芯棒取代的前提下适当恢复上下两端的部分伞裙。在进行优化的模型中仅对绝缘子的浅表面区域进行剖分控制,同时恢复上下各10组伞裙。进行这样的处理后模型的单元数变为95 285,节点数变为191 552。计算得到的电位云图见图7,电位分布百分比与完整细剖模型的相对误差分布见图8。

从图7中的电位云图分布情况可知,在对绝缘子的浅表面区域进行剖分控制后电位分布的连续性有明显的改善,同时由图8可知,在上下均压

环所处的区域优化后的简化模型与完整细剖有很好的吻合,伞裙与芯棒的交接部分存在一定的差异,但是都低于0.3%。

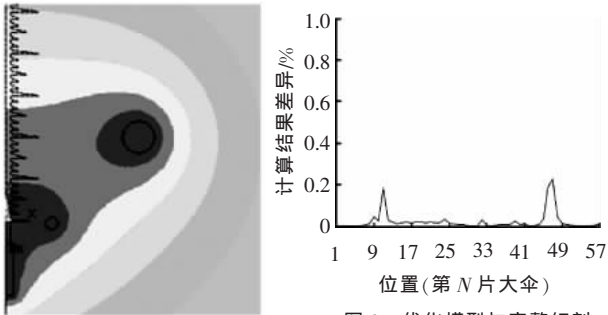


图7 优化模型的电位云图分布

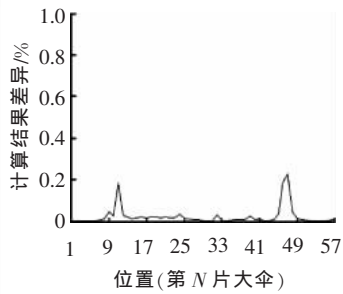


图8 优化模型与完整细剖模型电压分布差异

### 4 结论

笔者通过建立1000 kV特高压交流复合绝缘子的有限元简化模型并将简化模型的电位分布计算值与完整细剖模型的值进行了对比分析,可以得到以下结论:

- (1) 简化模型可以有效代替完整模型,且可在较大的程度上减小计算规模;
- (2) 特高压复合绝缘子伞裙对其电位分布的影响有限,在不需要对其表面电位分布进行严格考察的情况下可将伞裙部分仅建立芯棒模型等效;
- (3) 在需对绝缘子表面进行考察的情况下也可通过对简化绝缘子模型进行优化满足计算准确

性要求。

### 参考文献:

- [1] 黄道春, 阮江军, 刘佳, 等. 330 kV 绝缘子串电压分布和屏蔽环位置的优化[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 91-94.
- [2] 黄道春, 阮江军, 刘佳. 复合绝缘子串电压分布计算和屏蔽环位置优化[J]. 高压电器, 2006, 42(3): 176-178.
- [3] 关志成, 王国利. 中国特高压输电工程及其相关的关键技术[J]. 南方电网技术研究, 2005, 1(6): 12-18.
- [4] 江汛, 王仲奕, 金强. 棒形悬式复合绝缘子电场计算和优化[J]. 高压电器, 2005, 41(5): 340-343.
- [5] HAZNADAR M Z, SADOVIC S M. Macro Elements in the Finitie Element Method-application to the High-voltage Insulating System Design [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1982, 18(2): 519-522.
- [6] 李亚莎. 高精度快速边界元法及其在绝缘子电场计算中应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- [7] 卫李静, 王伯时, 汪忆新, 等. 均压环对复合绝缘子电位分布影响的研究[J]. 高压电器, 2006, 42(4): 262-265.
- [8] YANAGUIZAWA J A, LEITE L R P, SHINOHARAA H, et al. Study of Electical Breakdown Voltage in a Partially Damaged Glass Insulators Chain with Polycarbonate Protectors[C]// IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Latin America, 2004: 727-730.
- [9] 江汛, 王仲奕. 330 kV 带均压环的棒形悬式复合绝缘子电场有限元分析[J]. 高压电器, 2004, 40(3): 215-217.
- [10] 邓铭, 王世山, 李彦明, 等. 基于非对称故障条件的复合绝缘子电场分析[J]. 电瓷避雷器, 2004, 199(3): 4-8.
- [11] 倪光正, 杨仕友, 钱秀英, 等. 工程电磁场数值计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

(上接第3页)

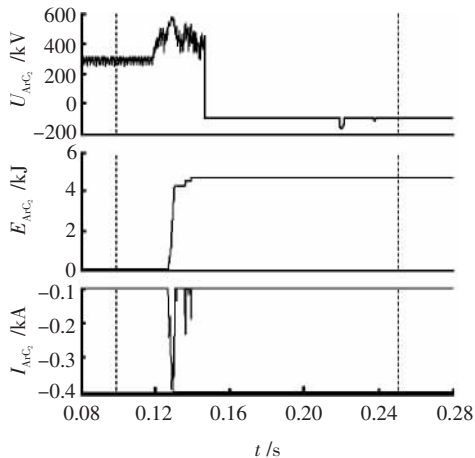


图6 C<sub>2</sub>避雷器的直流暂态过电压图(无A<sub>2</sub>避雷器)

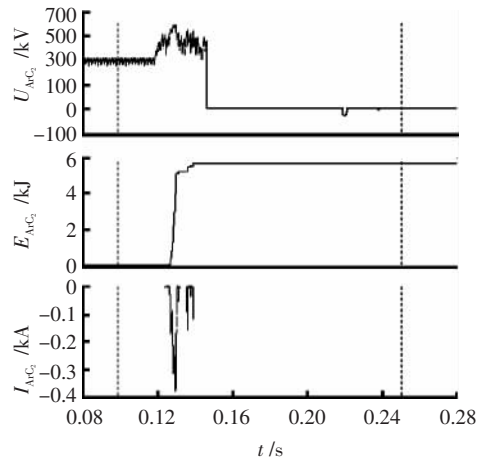


图7 C<sub>2</sub>避雷器的直流暂态过电压图(有A<sub>2</sub>避雷器)

避雷器配置可以优化特高压直流设备的绝缘水平。

- (3) 计算结果表明,在最高电位换流变阀侧与地之间加装A<sub>2</sub>避雷器保护有利于降低和限制±800 kV换流变高压阀侧设备的绝缘水平,可直接保护最高电位换流变压器阀侧设备,具有直接而可靠的优点。
- (4) 为±800 kV特高压直流工程换流站高压端换流变阀侧加装A<sub>2</sub>避雷器提供了理论及计算依据。

### 参考文献:

- [1] 云南-广东±800 kV 特高压直流输电工程技术规范 [Z]. 广州: 南方电网技术研究中心, 2007.
- [2] 云广工程绝缘配合研究报告. ED3\_061[1].CS -0[R]. 广州: 南方电网技术研究中心, 2007.
- [3] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.