

# 基于三相GIS电场分布的模型简化研究

李晓丹 李水清 方临川 田晓霄

(正泰电气股份有限公司 上海 201614)



李晓丹 女 1987年生, 工程师, 主要从事电气产品电磁场仿真工作。



李水清 男 1969年生, 高级工程师, 主要从事输配电产品研发及管理工作。

**摘要:** 高压电场计算采用有限元法, 针对有限元仿真精度与效率的矛盾, 提出一种适用于电场有限元分析的模型简化原则。基于 Infolytica 软件建立 145kV GIS 三相母线模型, 并分别以三相分支母线与盆式绝缘子为仿真目标, 分析雷电冲击电压下模型的电场强度分布情况。以三相分支母线为仿真目标, 三相分支母线位于简化模型的中心位置, 简化模型与原模型的电场强度分布情况一致。以盆式绝缘子为仿真目标, 盆式绝缘子位于简化模型的边缘位置, 简化模型与原模型的电场强度分布差异较大。两种仿真结果对比表明, 在有限元电场模型简化过程中, 应把要分析的区域基本上处于中心位置, 避免两边电场突变影响仿真精度。

**关键词:** 电场分析 模型简化 有限元分析 三相母线模型

**中图分类号:** TM595

## Research on the Model Simplification Based on the Three-Phase GIS Electric Field Analysis

Li Xiaodan Li Shuiqing Fang Linchuan Tian Xiaoxiao

(Chint Electric Co. Ltd Shanghai 201614 China)

**Abstract:** The finite element method is used to high voltage electric field calculation, for the contradiction between precision and efficiency in finite element electric field analysis, a kind of model simplification principle applied in electric field finite element analysis has been put forward. Three phase busbar model of 145kV GIS has been built based on Infloytica software. With the three-phase bus bar and basin insulator as simulation target respectively, the electric field intensity distribution of the model has been analyzed under lightning impulse voltage. Chosen three-phase bus bar as simulation target, it's located in the center of the simplified model, the electric field intensity distribution of simplified model consistent with the original model. Chosen basin insulator as simulation target, it is located in the edge of simplified model, the electric field intensity distribution of simplified model and the original model are differences. Compared of two kinds simulation results shown that during the simplification of finite element electric field model, the analysis of the area should be located in the center position to avoid influencing the simulation accuracy caused by mutating electric field on both sides.

**Keywords:** Electric field analysis, model simplification, finite element analysis, three phase bus bar model

## 1 引言

有限元方法是以变分的原理和区域剖分插值为基础的一种数值求解法, 由于其能缩短研发周期、减少研发投入而被广泛应用于各种工程领域的求解<sup>[1-2]</sup>。有限元分析包括前处理、求解与后处理, 其中, 前处理的核心就是产生一个有限元模型, 适当的模型是精确求解的基础。若建立的模型过于简单, 会忽略许多应当考虑的因素而影响精度。然而把模型建立的过于复杂, 考虑过多的次要因素, 会影响计算工作量, 延长产品研发周期。因此, 合理的形状简化既能保持一定的分析精度, 又能使网格划分和计算过程大为简化。

采用简化模型进行仿真时, 计算速度快, 但精度较差; 反之, 详细模型需要的计算时间较长, 且对计算机硬件要求较高。因此, 建立物体有限元模型时, 要根据分析的目标和实际问题, 综合考虑计算精度和时间来建立分析模型<sup>[3]</sup>。文献[4]以客座椅骨架静强度分析为例介绍了模型简化原则及简化方法, 但这种简化原则及方法是基于力学问题的简化, 不全部适用于特定电磁场问题的模型简化。文献[5]将神经网络修正技术应用到有限元模型简化中, 应用BP神经网络建立结构模态响应与结构参数之间的非线性关系, 这种修正方法虽然计算过程简单, 但整体实现过程较为复杂。文献[6]利用有限元软件对GIS盆式绝缘子进行了绝缘分析, 但没有涉及模型简化的问题。

本文在现有力学仿真简化原则的基础上, 建立145kV GIS三相母线模型, 并分别以三相分支母线和盆式绝缘子为研究目标, 分析模型在雷电冲击电压下的电场强度分布情况。三相分支母线位于简化模型的中心位置, 使简化模型与原模型的电场强度分布情况相同; 盆式绝缘子位于简化模型的边缘位置, 简化模型造成连续电场的突变, 使简化模型与原模型的电场强度分布差异较大。对比两种仿真结果, 在建立简化的有限元分析模型时, 应把分析目标基本处于简化模型的中心位置, 避免两端电场突变影响仿真精度。

## 2 有限元电场分析的基础

在电流不流动的场所, 若外加电压激励的变化速度达不到相当于电磁波的行进速度, 电场的状态就等于恒定外加电压的电场分布, 可近似为静电场<sup>[8]</sup>。静电场问题中应满足麦克斯韦方程组

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

电场与介质的之间的关系

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为电荷密度;  $\mathbf{D}$  为电位移矢量;  $\varepsilon$  为介电常数;  $\mathbf{E}$  为电场强度。

在实际应用中多使用微分方程来描述电磁场的规律, 电场强度与电位之间的关系

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (3)$$

由式(1)~式(3)可得静电场中满足的泊松方程

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (4)$$

对体电荷  $\rho = 0$  的区域, 变式(4)右侧为零, 则为拉普拉斯方程

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (5)$$

145kV GIS模型电场仿真过程是在一类和二类边界  $S_1$ 、 $S_2$  求解拉普拉斯方程, 其数学表达式为

$$\begin{cases} D: \nabla^2 \varphi = 0 \\ S_1: \varphi = \varphi_0 \\ S_2: \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $D$  为求解域;  $S_1$ 、 $S_2$  分别为一类、二类边界条件。

## 3 雷电冲击电压下模型的绝缘分析

绝缘材料的击穿电场强度是评定其绝缘性能的重要参数<sup>[9-11]</sup>。随着绝缘件技术和壳体加工技术的提高, GIS母线由分箱结构逐步向共箱结构发展。到目前, 145kV等级的GIS已逐步实现了分支母线和主母线全三相共箱结构<sup>[12]</sup>。箱体内存有  $\text{SF}_6$  气体, 提高了GIS母线的绝缘性能, 从而减小GIS的占地面积。因此, 母线之间的绝缘也是GIS设计阶段应重点考虑的问题。145kV GIS主要技术参数如下表所示。

在GIS设计中, 盆式绝缘子起着隔离气室、支撑导体及绝缘的重要作用。其性能的好坏直接影响着电力系统的稳定性。盆式绝缘子的绝缘强度不仅

表 145kV GIS 主要技术参数

Tab. Main technical parameters of 145kV GIS

| 参数名称           | 数值    |
|----------------|-------|
| 额定电压 /kV       | 145   |
| 额定电流 /A        | 3 150 |
| 额定频率 /Hz       | 50    |
| 额定短时工频耐受电压 /kV | 275   |
| 额定雷电冲击耐受电压 /kV | 650   |

与环氧树脂自身的性能有关，还与支撑绝缘子壳体内部的 SF<sub>6</sub> 气体的压力密切相关<sup>[6]</sup>。绝缘子表面电场畸变和局部电场集中是引起盆式绝缘子闪络的主要原因。闪络通常发生在金属电极、环氧树脂绝缘子和 SF<sub>6</sub> 气体的三交区<sup>[13-14]</sup>。

## 4 电场计算

### 4.1 仿真模型的建立

建立 145kV GIS 三相母线原模型如图 1 所示，其简化模型如图 2 所示，原模型与简化模型具有相同盆式绝缘子与电极模型，它们的结构如图 3 所示。图中壳体与电极均为铝材料，电导率  $\sigma = 3.8 \times 10^7 \text{S/m}$ ；盆式绝缘子为环氧树脂材料，相对介电常数  $\epsilon_1 = 4.5$ ；罐

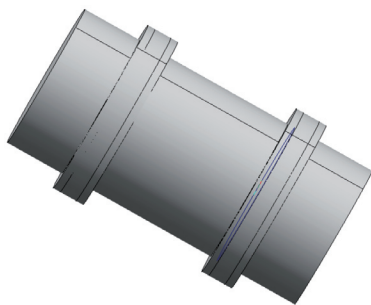


图 1 三相母线原始模型

Fig.1 The original model of three-phase busbar

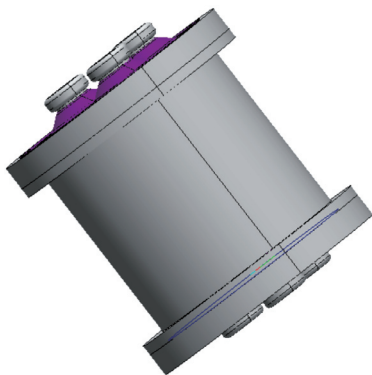


图 2 三相母线简化模型

Fig.2 The simplified model of three-phase busbar

体内部建立 SF<sub>6</sub> 气体包，相对介电常数  $\epsilon_2 = 1.0027$ 。在仿真软件中，SF<sub>6</sub> 实体位于模型树的上部，使其优先级最低，若 SF<sub>6</sub> 实体与导体或盆式绝缘子相交，则处在模型树下面的实体占有这部分空间，从而避免了实体的重叠。

在雷电冲击试验中，对 A 相电极施加 650kV 电压激励，B、C 两相施加 0V 电压，GIS 外壳接地。为了研究电场强度分布情况，分别在原模型与简化模型中沿 A 相母线做一条直线，如图 3 所示，沿盆式绝缘子做一条弧线如图 4 所示。

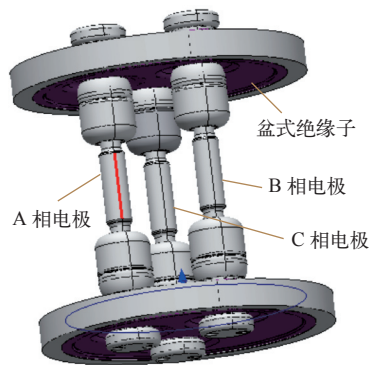


图 3 沿 A 相母线做一条直线

Fig.3 Do a line along A phase bus bar

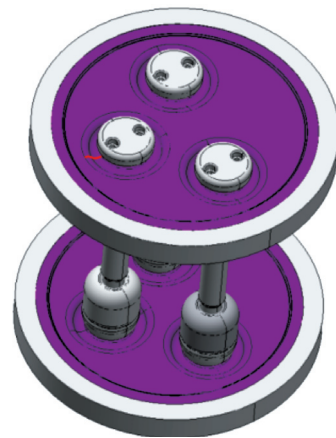


图 4 沿盆式绝缘子做一条弧线

Fig.4 Do an arc along the basin insulator

### 4.2 仿真结果分析

对于不同的仿真目标，在原模型与简化模型的仿真过程中采用相同的网格剖分参数，参数的设置情况如图 5 所示。

以三相分支母线为仿真目标，得原模型与简化模型沿图 3 直线的电场强度分布曲线如图 6 所示。

从图 6 的仿真结果可以看出，在原模型与简化模型中，沿图 3 直线的电场强度分布曲线趋势相同，

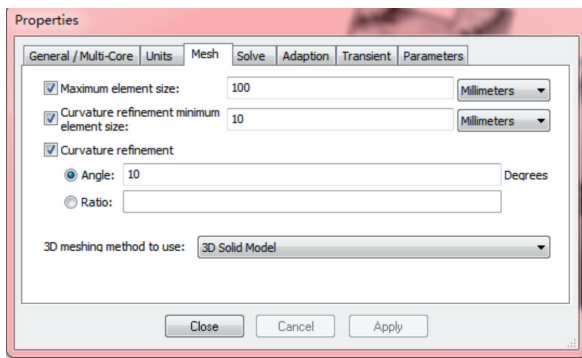


图5 网格剖分参数设置

Fig.5 Parameters setting of meshing

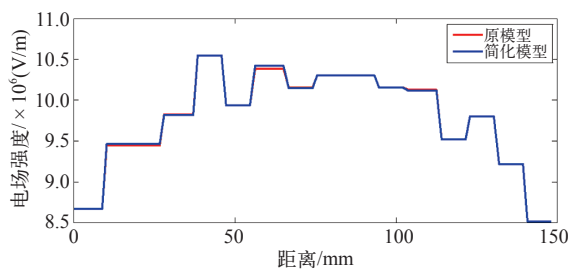


图6 原模型与简化模型沿图3直线场强分布曲线

Fig.6 The Electric field strength distribution curve along the line in Fig.3 for original model and simplified model

相同距离的电场强度值差别不大, 最大误差百分数为0.39%。

以盆式绝缘子为仿真目标, 得原模型与简化模型沿图4弧线的电场强度分布曲线如图7所示。

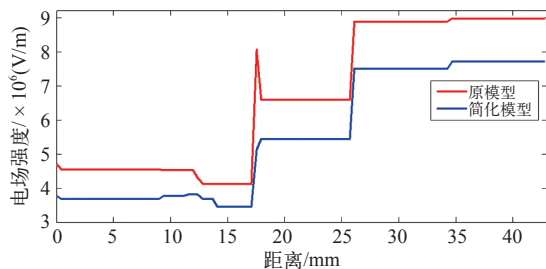


图7 原模型与简化模型沿图4弧线场强分布曲线

Fig.7 The Electric field strength distribution curve along the arc line in Fig.4 for original model and simplified model

从图7的仿真结果可以看出, 在原模型与简化模型中, 沿图4弧线的电场强度分布曲线的趋势与相同距离的电场强度值相差较大, 最大误差百分数为19.56%。

## 5 结论

(1) 以三相分支母线为仿真目标时, 三相分支

母线位于简化模型的中心区域, 三相分支母线两端的电场是连续的。因此, 在原模型与简化模型中, 沿母线直线的电场强度分布误差较小。在工程要求的误差范围内, 可将简化模型代替原模型进行绝缘分析。

(2) 以盆式绝缘子为仿真目标时, 盆式绝缘子位于简化模型的边缘区域, 连续的电场在盆式绝缘子两边突变, 使得在原模型与简化模型中, 沿盆式绝缘子弧线的电场强度值相差较大。

基于以上分析, 应考虑实际产品电场的连续性, 使要分析的区域基本上处在中心的位置, 使得两边电场突变对所研究的区域没有影响, 从而确保简化模型的仿真精度。基于该原则的模型简化方法对大型模型电场仿真具有重要的应用价值。

## 参考文献

- [1] 赵云学. 800kV 超高压 SF<sub>6</sub> 断路器绝缘特性计算与喷口研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007.
- [2] 黎斌. SF<sub>6</sub> 高压电器设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [3] 张红红. 汽车座椅静强度有限元仿真分析及结构优化 [D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
- [4] 叶彪. 客车乘客座椅骨架静强度分析的有限元模型简化 [J]. 客车技术与研究, 2008(4): 7-10.  
Ye Biao. FEM model simplification of static strength analysis for coach passenger seat frame [J]. Bus Technology and Research, 2008(4): 7-10.
- [5] 杜德润, 李爱群, 杨玉冬, 等. 基于神经网络修正的结构有限元模型简化 [J]. 东南大学学报, 2003, 33(5): 635-637.  
Du Deirun, Li aiquan, Yang Yudong, et al. Structural FEA model simplification based on neural network's modification [J]. Journal of Southeast University, 2003, 33(5): 635-637.
- [6] 许建春, 卢鹏. 1100kV GIS 盆式绝缘子的性能 [J]. 电力建设, 2010, 31(8): 91-93.  
Xu Jianchun, Lu Peng. Performance of the pan-type insulator for 1100kV GIS [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(8): 91-93.
- [7] 袁源. 模型降阶化简算法在电磁场问题中应用分析 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
- [8] 宁慧英. 高压开关柜中三维电场的计算与分析 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007.
- [9] 朱晓辉, 孟峥峥, 王浩明, 等. 运行高压交联聚

- 乙烯电力电缆的介电性能 [J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1090-1095.
- Zhu Xiaohui, Meng Zhengzheng, Wang Haoming, et al. Dielectric properties of operated high voltage XLPE power cable[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1090-1095.
- [10] Mecheri Y, Boukeezzi L, Boubakeur A, et al. Dielectric and mechanical behavior of Cross-Linked Polyethylene under thermal aging[C]. 2000 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Victoria, 2000: 560-563.
- [11] Rowland A T S, Dissado L A, Fu M L, et al. Effect of long-time electrical and thermal stresses upon the endurance capability of cable insulation material[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(5): 1436-1443.
- [12] 米雄刚. GIS 智能化母线的设计及实现 [D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- [13] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 164-168.
- [14] 梁曦东. 高电压工程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 70-74.

(编辑: 崔文静)