

文章编号: 1006 - 4729(2011) 03 - 0224 - 05

基于 ANSYS 的 126 kV 三相共罐式 GIS 断路器电场分析

马爱清¹, 潘三博²

(1. 上海电力学院 电力与自动化工程学院, 上海 200090;
2. 上海交通大学 自动化系, 上海 200240)

摘要: 利用 ANSYS 对 126 kV 三相共罐式 GIS 断路器进行三维电场分析计算. 首先针对复杂的分析实例, 建立了断路器的计算模型, 然后采用不同的参数设置进行网格剖分, 计算了不同试验状况下断路器内部电场强度的分布情况, 得到了各种试验状况下电场强度的最大值, 最后给出了每种施压方式中电场强度值最大的电场强度分布图及其位置.

关键词: 三相共罐式; GIS 断路器; 网格剖分
中图分类号: TM561 **文献标志码:** A

Electric Field Numerical Analysis of 126 kV Circuit Breaker in Three-Phase-in-One-Tank GIS Based on ANSYS

MA Ai-qing¹, PAN San-bo²

(1. School of Electric Power and Automation Engineering, Shanghai University of
Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Three dimensional electric field of 126 kV circuit breaker in three-phase-in-one-tank GIS is analyzed with ANSYS software. For the complex analysis example, the model is constructed and meshed by different parameter settings. The distribution of electric field intensity is obtained under different working modes. The corresponding maximum of electric field intensity is listed respectively. The typical E_{\max} is pointed out. It is found that the distance among three-phase buses and between bus and tank has a great effect on electric field intensity.

Key words: three-phase-in-one-tank; GIS circuit breaker; network sector

气体绝缘金属封闭开关设备 (Gas Insulated Switchgear, GIS) 是电网建设中的关键设备之一, 具有占地面积小、不易受外界环境影响、可靠性高

等优点, 在电源电网建设中得到了广泛应用. 随着 GIS 体积的小型化, 加上 GIS 断路器中的电场分布不均匀, 容易发生闪络与击穿, 因此其绝缘机构

收稿日期: 2011 - 02 - 22

通讯作者简介: 马爱清 (1975 -) 女, 博士, 副教授, 山西大同人. 主要研究方向为电磁场数值计算和高压电器的优化设计等. E-mail: aqmaq@shiep.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金 (51007055); 上海市教育委员会重点学科建设项目 (J51301); 上海高校选拔优秀青年教师科研专项基金 (sdl10012).

的设计受到越来越多的关注. 电场分布是 GIS 绝缘设计的关键. 通过电场的计算和分析, 可以了解 GIS 内部电场分布情况, 指导 GIS 内部的结构设计, 从而提高绝缘强度, 达到优化设计的目的^[1-7].

电场的均匀程度对 SF₆ 气体间隙击穿电压和沿面闪络电压的影响要比空气大得多, 随着电场不均匀程度的增加, 气体间隙的击穿电压和绝缘件的沿面闪络电压都将明显降低. 因此, 在设计断路器的结构时, 不仅要考虑结构的小型化, 还要充分考虑电场的均匀性. 本文对某型号 126 kV 三相共罐式 GIS 用 SF₆ 断路器进行三维电场分析, 为了准确地反映电场的原貌, 在进行电场计算时建立了三维模型, 尽量接近断路器的实际情况, 并进行了三维场域电场的数值计算分析.

1 模型的建立

建立物理模型的常用方法有两种: 一是在有限元软件中直接建模; 二是在三维绘图软件中建立模型, 然后设法导入有限元软件. 对于比较简单、规则的图形可以直接利用有限元软件构建, 不用考虑图形接口之间的兼容问题. 而对于结构复杂的物理模型, 利用三维绘图软件绘制后再导入有限元软件则比较简便^[8].

对于本文分析的 126 kV 三相共罐式 GIS 用 SF₆ 断路器, 由于其三相共处于一个罐体, 物理模型比较复杂, 因此利用三维有限元软件 PRO/E 进行绘制^[9], 而且 PRO/E 和有限元软件 ANSYS 之间可以通过软件的配置实现模型的无缝导入, 从而为下一步的数值分析做好准备. 在进行电场计算时, 断路器的整体结构和内部结构见图 1.

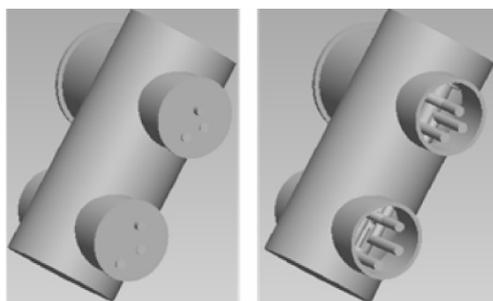


图 1 三相共罐式 GIS 断路器结构

图 1a 为 GIS 用 SF₆ 断路器的外形图, 外壳为金属接地导体; 图 1b 为两个端盖打开时两组三相母线输入端的内部接线情况.

2 模型的剖分处理

在进行有限元剖分时, 网格的数量将直接影响计算结果的精度. 网格数量增加时, 计算精度会有所提高, 但同时计算量也会增加, 这对计算机硬件的要求也会更高. 而当网格的剖分数量达到一定值时, 计算精度并不能明显提高, 计算时间反而会大大增加, 因此在确定网格数量时应权衡考虑. 本文以三维图形为计算对象, 模型单元类型选用 solid122 单元, 它是 10 节点、自由度为 VOLT 的电场分析单元.

三相共罐式 GIS 断路器的复杂性给网格划分带来了一定困难, 尤其是上下两组三相输入母线和三相输出母线处有很多弯角, 在剖分过程中很有可能出现质量很差的网格, 导致不能较好体现断路器的实际结构, 从而影响有限元求解的精度, 因此本文在复杂结构进行剖分时使用了用户设定的网格划分工具. 通过设置网格控制选项, 可以对网格剖分的方式、形状和大小进行控制. 将网格形状定义为四面体单元, 边中节点按照实体模型的边界线或边界面的曲率进行排布, 使有限元模型与实体模型的边界更吻合, 并设置网格尺寸的比例因子、分网过渡因子、单元边界跨越角度等参数. 由于主要考虑 SF₆ 中的电场分布情况, 因此对 SF₆ 的剖分精度取 0.025, 对于断路器接线柱子和两边端盖上的绝缘支撑环氧树脂部分的剖分精度取 0.05 即可.

GIS 内部绝缘气体三维剖分和环氧树脂三维剖分如图 2 所示.

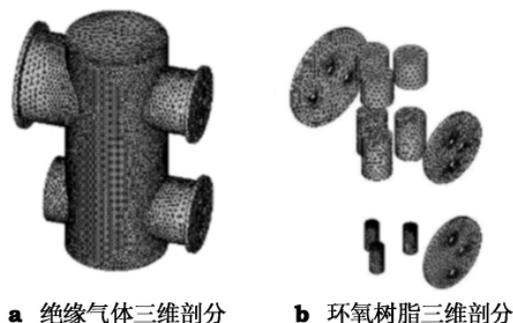


图 2 GIS 内部网格剖分示意

3 断路器电场计算与分析

本文主要考虑 GIS 内部三维电场的分布, 暂时不考虑灭弧室的情况, 只是简单地将其定义为

开关的闭合和断开. GIS 断路器内部电场的试验状况包括合闸对地、分闸对地、双向加压、相间耐压等,如图 3 所示. 每种试验状况又有多种施压方式,如表 1 所示.

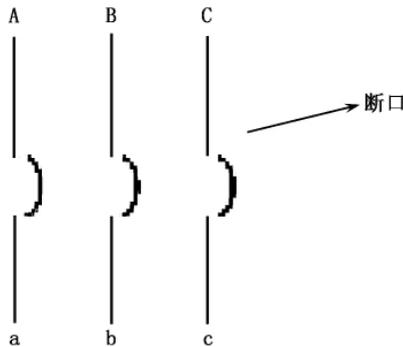


图 3 GIS 断路器试验状况

表 1 各种试验工况下 GIS 断路施压方式

施压方式	合闸对地	分闸对地
1	A a(高压) B b, C c(接地)	A(高压) a, B, b, C, c(接地)
2	B b(高压) A a, C c(接地)	a(高压) A, B, b, C, c(接地)
3	C c(高压) A a, B b(接地)	B(高压) b, A, a, C, c(接地)
4		C(高压) c, A, a, B, b(接地)
施压方式	双向加压	相间耐压(合闸状态)
1	A(高压) a(高压反相) B b, C c(接地)	A a(高压), B, b(高压反相) C, c(接地)
2	B(高压) b(高压反相) A a, C c(接地)	B, b(高压), C, c(高压反相) A a(接地)
3	C(高压) c(高压反相) B b, A a(接地)	A a(高压), C c(高压反相) B b(接地)

鉴于工频测试的多种工作情况,若在 ANSYS 的 GUI 方式下直接计算,则需要每次手动施加载荷,工作量较大,因此合理利用 ANSYS 软件的二次开发语言 APDL (ANSYS Parametric Design Language),能大大提高计算效率^[10,11].

3.1 电场计算

3.1.1 GUI 方式

采用 GUI 方式进行电场计算包括以下 4 个步骤.

(1) 导入 利用 ANSYS 与 PRO/E 的接口,导入 GIS 模型.

(2) 前处理 首先,由于 PRO/E 中的长度单

位是 mm, ANSYS 中是 m, 因此要利用 scale 指令统一模型的单位. 其次,由于 ANSYS 是对每一个几何体素(ANSYS 中称为 VOLUME) 操作的,而对于 SF₆ 绝缘体,在图形导入 ANSYS 后,需利用布尔运算中的 overlap 指令人为添加一个几何体素作为 SF₆. 最后,设定每个几何体素对应的介电常数. 环氧树脂的介电常数为 3.9, SF₆ 的介电常数为 1.002, 导电体的电阻率为 0.028 7.

(3) 求解计算 以合闸对地为例,三相接线柱中一相施加电压 230 kV, 其他两相和金属外壳无需施压.

(4) 后处理 通过剖面图了解内部电场和电压分布情况.

3.1.2 Batch 方式

ANSYS 可以提供扩展名为 .log 的文件,记录了 GUI 方式下的每一步操作,但它属于脚本语言,对于每个 GUI 方式的操作,基本上都有一个操作命令与之对应,这样就产生了大量的操作命令. 利用命令流的方式可以实现批处理,但为了操作简单,需对该脚本文件作进一步整理,同时设计一个人机接口界面,在设计过程中可以通过这个界面调整剖分精度、施加载荷,以及后处理时剖面位置的选择参量等,以节省时间.

ANSYS 可以对构成三维图形的所有几何体素进行自动识别,并为各个几何体素自动编号. 利用这一特性,对这些几何体素进行循环操作,可以实现计算的批处理,而且程序直观易懂,易于操作. 具体程序如下.

定义类型:

```
prop_type_AL = 0.028 7
```

```
prop_type_sf6 = 1.002
```

```
prop_type_epoxy = 3.9
```

.....

设置剖分网格精度:

```
AL_mesh_precision = 0.023
```

```
sf6_mesh_precision = 0.03
```

```
epoxy_mesh_precision = 0.05
```

.....

设置施加载荷值:

```
Vwf = 230 000
```

```
Vdl1 = -73 000
```

```
Vdl2 = -115 000
```

```
Vz = 0
```

```

Val = Vwf
Vbr = Vz
Vbl = Vz
Vcr = Vdl2
Vcl = Vdl2
V_BOUNDARY_NUM(1) = 99
V_BOUNDARY_NUM(2) = V al
V_BOUNDARY_NUM(3) = V ar
.....
主程序:
.....
* DO i,1,n_MAT2-1
  ESIZE ,epoxy_mesh_precision 0 ,
  MSHAPE ,1,3D
  MSHKEY 0
  VMESH ,V_MAT2_NUM(i)
* ENDDO
.....
* DO i,1,n_wf_BOUNDARY-1
  VSEL ,S ,VOLU ,Vwf_BOUNDARY_NUM(i)
  ASEL ,R ,EXT
  DA ,ALL ,VOLT ,Vwf
  Var = Vwf

  ALLSEL ,ALL
* ENDDO
.....
* DO i,1,n_dl_BOUNDARY-1
  VSEL ,S ,VOLU ,Vdl_BOUNDARY_NUM(i)
  ASEL ,R ,EXT
  DA ,ALL ,VOLT ,Vdl2
  ALLSEL ,ALL
* ENDDO
.....

```

如果要调整剖分精度,只需直接修改 AL_mesh_precision 变量. 对于不同的试验状况,也只需修改 Vwf 等变量. 然后在 ANSYS 软件中直接运行这些编制好的宏文件即可.

3.2 计算结果及分析

按照表 1 的施压方式,分别计算 GIS 用 SF₆ 断路器在各种试验状况下的电场强度分布情况,并列各种试验状况下的最大电场强度值,如表

2 所示. 其中,每个最大电场强度值(记作 E_{max}) 对应表 1 中每一种施压方式.

表 2 各种试验工况下 GIS 断路器施压方式对应的最大电场强度值 E_{max} $kV \cdot cm^{-1}$

施压方式	合闸对地 E_{max}	分闸对地 E_{max}	双向加压 E_{max}	相间耐压 E_{max} (合闸状态)
1	121(①)	119(②)	123(④)	133(⑤)
2	119	76.7(③)	119	119
3	119	114	119	123
4		104		

注: ①②③④⑤——各种施压方式下对应的最大电场强度值 E_{max} .

126 kV 三相共罐式 GIS 断路器气体的额定压力 $P=0.5$ MPa(20 °C 的表压),根据 SF₆ 气体的工程击穿场强下限值公式,电场强度 $E = 65 \times (10P)^{0.73} kV \cdot cm^{-1}$,即工程击穿场强约为 $210 kV \cdot cm^{-1}$. 由表 2 可知,断路器内电场强度最大值均小于工程击穿场强值,因此该 GIS 断路器内部绝缘结构是安全可靠的.

由于 GIS 用 SF₆ 断路器是封闭罐体,为了解其内部电场分布情况,鉴于问题的相似性,本文仅给出表 2 中①②③④⑤方式对应的 E_{max} 相应位置图,如图 4 至图 8 所示.

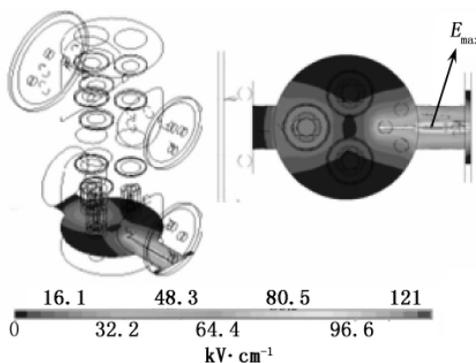


图 4 合闸对地时 E_{max} 位置切面

图 4 中的 E_{max} 出现在施加高压的一相母线输入端,主要是由于该输入端与右侧罐体底部之间的距离较短引起的. 图 5 中 E_{max} 出现在两组三相母线输入连接部分. 图 6 中 E_{max} 出现在断路器三相之间,由于输出的三相母线罐体直径较大,因此最大值不是出现在三相母线输出端. 图 7 中 E_{max} 出现的位置与图 4 类似. 图 8 中的 E_{max} 出现在三相母线之间,由于相间耐压是在合闸状态下测试的,而且相间电压差较大,与前几种施压方式相比

可以看出,这种施压方式的 E_{\max} 最大.综合以上情况可知, E_{\max} 主要出现在三相母线之间及母线与两侧罐体间.因此,在设计时需要仔细考虑这些地方的结构布置,以达到最好的绝缘效果.

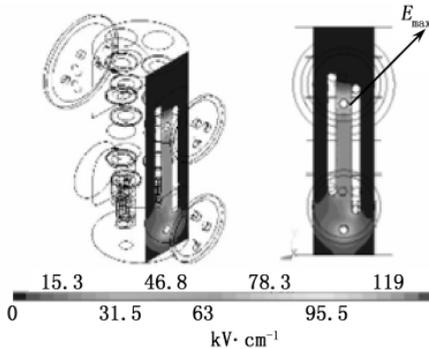


图5 分闸对地时施压方式1的 E_{\max} 纵向切面

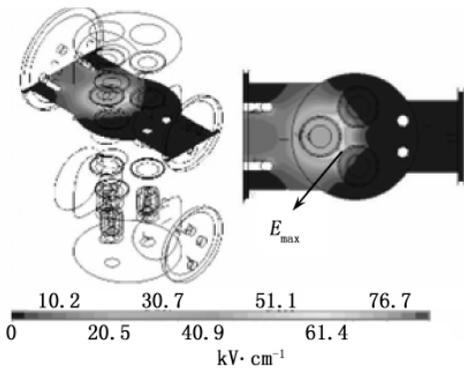


图6 分闸对地时施压方式2的 E_{\max} 切面

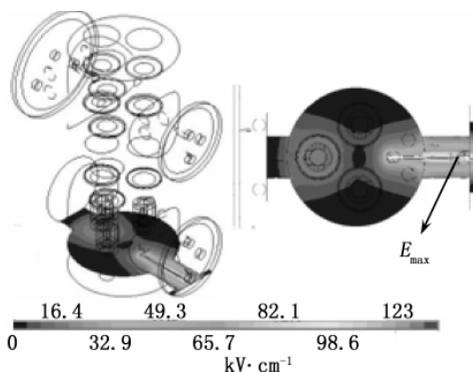


图7 双向加压施压方式1的 E_{\max} 横向切面

针对本文计算的 126 kV 三相共罐式 GIS 用 SF₆ 断路器,笔者在西安高压研究所进行了 1 min 工频耐压试验,试验顺利通过.

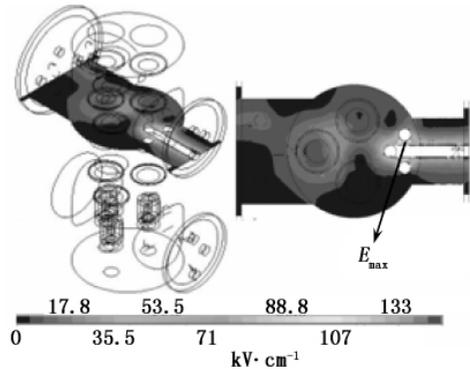


图8 相间耐压施压方式1的 E_{\max} 横向切面

4 结论

(1) 利用三维绘图软件 PRO/E 建立了三相共罐式 GIS 断路器三维有限元电场分析的计算模型,该模型能准确表达装置的物理特征,并易于与现有商业程序连接.

(2) 实现了 126 kV 三相共罐式 GIS 断路器在不同试验状况下三维电场的分析与计算,获得了断路器内部三维电场分布云图.通过分析各种施压方式下电场分布可以看出,电场强度的最大值均小于工程击穿场强值.分析了出现 E_{\max} 的相应位置,为 GIS 绝缘设计提供了理论依据.

(3) 利用有限元软件 ANSYS 的二次开发语言 APDL 进行批处理计算,避免了繁琐的重复操作,节约了计算时间,提高了计算效率.

参考文献:

- [1] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991: 47-58.
- [2] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991: 101-158.
- [3] STEINBIGER H, HALLER D. Comparative analysis of methods for computing 2-D and 3-D electric fields[J]. IEEE Trans. on Dielectric and Electrical Insulation, 1991, 26(3): 529-536.
- [4] RYAN H M, LIGHTLE D, MILNE D. Factor influencing dielectric performance of SF₆ insulator GIS[J]. IEEE Trans. PAS, 1985, 104(6): 1 526-1 535.
- [5] XU Jian-yuan. The calculation and analysis of the 3-D electric field of the disconnector switchgear inside of a 110 kV 3-phase in one tank type GIS [C]//Proc. of IEEE Conference on Power System Technology, 1998(1): 207.
- [6] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992: 57-85.

(下转第 237 页)

参考文献:

- [1] IEEE Std 1547. Standard for interconnecting distributed resources with electric power systems [C]//IEEE Standards Coordinating Committee 21, 2003:3-12.
- [2] 韦钢, 吴伟力, 胡丹云 等. 分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 36-40.
- [3] 邓佑满, 张伯明, 相年德. 配电网重构的改进最优流模式算法[J]. 电网技术, 1995, 19(7): 47-50.
- [4] 张栋, 张刘春, 傅正财. 配电网重构的快速支路交换法[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 82-88.
- [5] KIM H, KO Y, JUNG K H. Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1 356-1 366.
- [6] CHIANG Hsiao-dong, RENE Jean-jumeau. Optimal network reconfigurations in distribution systems: Part 2 solution algorithms and numerical results [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1990, 5(3): 1 568-1 574.
- [7] NARA K, SHIOSE A, KITAGAWA M. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1992, 7(3): 1 044-1 051.
- [8] LI Qi-wang, DING Wei, ZHANG Jian-quan, et al. A new reconfiguration approach for distribution system with distributed generation [C]//International Conference on Energy and Environment Technology, Guilin China, 2009: 23-26.
- [9] WU Yuan-kang, LEE Ching-yin, LIU Le-chang, et al. Study of reconfiguration for the distribution system with distributed generators [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1 678-1 685.
- [10] 崔金兰, 刘天琪, 李兴源. 含有分布式发电的配电网重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(15): 37-40.
- [11] GOLDBERG D E. Optimization and machine learning [M]. MA: Addison-Wesley, 1989: 45-69.
- [12] 宋平, 张焰, 蓝毓俊, 等. 改进遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(4): 488-491.
- [13] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 13-29.
- [14] 毕鹏翔, 刘健, 刘春新, 等. 配电网重构的改进遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 57-61.
- [15] 欧阳武, 程浩忠, 张秀彬, 等. 基于随机生成树策略的配网重构遗传算法[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1 726-1 730.
- [16] CIVANLAR S, GRAINGER J J, YIN H. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988(3): 1 217-1 223.

(编辑 苏娟)

(上接第 228 页)

- [7] 罗学琛. SF₆ 气体绝缘全封闭组合电器(GIS) [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 13-15.
- [8] 邢克飞, 周好斌. PRO/ENGINEER Wildfire 2.0 从入门到精通 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 5-20.
- [9] 唐兴伦. ANSYS 工程应用教程: 热与电磁学篇 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003: 20-45.
- [10] 龚曙光, 谢桂兰. ANSYS 操作命令与参数化编程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 35-43.
- [11] 博奕创作室. APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 20-35.

(编辑 白林雪)