

文章编号:1671-6833(2016)05-0067-05

# 低碳型 35 kV GIS 的气室电场强度计算及结构优化

程 显<sup>1,2</sup>, 王海燕<sup>2</sup>, 闫广超<sup>2</sup>, 焦连曜<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467000)

**摘 要:** 气体绝缘金属封闭开关柜气室的电场分布是其结构设计时需考虑的关键问题, 应尽可能使气室内电场分布均匀, 避免场强集中处发生闪络和放电现象. 直接使用 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体替代纯 SF<sub>6</sub> 气体作为 35 kV 电压等级 GIS 气室绝缘介质无法满足其绝缘要求. 笔者针对此问题对 GIS 气室进行电场分析和结构优化研究. 运用 Solidworks 软件建立 GIS 气室结构三维模型并进行有限元分析; 基于静电场理论对气室模型进行电场数值计算, 计算结果表明气室中隔离断口、接地断口、绝缘拉杆等处的电场强度高, 针对这些部位进行结构优化, 并对优化后的气室模型进行校验计算. 计算结果证明, 优化后 GIS 气室内电场强度较之前显著降低, 电场强度最大值低于替代气体绝缘强度, 替代气体可满足优化后气室的绝缘要求.

**关键词:** GIS 气室; 场强计算; 绝缘介质; 电场分布; 结构优化

**中图分类号:** TM561.2 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.013

## 0 引言

随着电力系统的不断发展, 运行可靠、结构紧凑的气体绝缘金属封闭开关柜(gas insulated metal enclosed switchgear, GIS)成为配电网必不可少的组成单元. 目前绝大部分 GIS 均采用 SF<sub>6</sub> 气体作为绝缘介质, SF<sub>6</sub> 气体具有良好的绝缘性能, 同时也有严重的温室效应. 随着人们环境保护意识的不断加强, 2020 年将在全球限制 SF<sub>6</sub> 气体的使用<sup>[1-2]</sup>. 研究发现, 在氮气中混入少量 SF<sub>6</sub> 气体可大幅提高氮气的绝缘强度<sup>[3]</sup>. 30% SF<sub>6</sub>/70% N<sub>2</sub> 混合气体在气压为 0.15 MPa 时耐电强度可达 5.5 kV/mm, 略低于同等压力下的纯 SF<sub>6</sub> 气体, 因此采用低 SF<sub>6</sub> 含量的 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体替代纯 SF<sub>6</sub> 气体作为 GIS 的绝缘介质是当下降低 SF<sub>6</sub> 气体使用量的有效方法之一<sup>[4-5]</sup>. 目前, 已有 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体在电力行业作为绝缘介质应用, 主要用来解决高原或严寒地区纯 SF<sub>6</sub> 气体液化温度较高的问题和充气电缆的绝缘问题, 在 GIS 中的应用较少且混合气体中 SF<sub>6</sub> 气体含量均较高(在 50% 以上), 对降低 SF<sub>6</sub> 气体使用量的意义不明显<sup>[6-7]</sup>.

GIS 气室的结构设计是保证其电场分布合

理、绝缘强度可靠的关键, 合理的电场分布可减少电场强度集中部位并降低该部位的场强值, 避免闪络和放电现象发生. 电场分布研究主要通过实验测量和仿真计算的方法. 高压实验成本较高, 引入测量探头会使电场产生畸变, 导致测量结果有一定误差. 随着数值模拟技术与电磁场仿真软件的发展, 电场仿真计算应用日益广泛. 电场仿真计算较实验测量成本低且效率更高, 电场仿真在产品设计与优化方面更具优势<sup>[8-11]</sup>. 目前, 电器产品的设计与优化主要通过电场仿真计算的方法, 文献[8]研究了 72.5 kV 真空灭弧室的电场分布; 文献[9]应用仿真计算的方法对 40.5 kV 真空断路器绝缘结构进行了优化设计; 文献[10]应用 ANSYS 软件对高压 SF<sub>6</sub> 断路器灭弧室进行了优化设计.

笔者针对 0.15 MPa SF<sub>6</sub>(体积分数为 30%)/N<sub>2</sub>(体积分数为 70%)混合气体充入 35 kV 电压等级 GIS 气室作为绝缘介质时, 气室内出现部分部位电场强度高于替代气体绝缘强度的问题, 以气室结构为对象开展研究, 运用仿真软件 ANSYS 进行电场数值模拟计算得出气室内场强较高区域, 通过对气室结构优化设计使其符合替代气体

收稿日期: 2016-03-11; 修订日期: 2016-07-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51407163、51477024); 中国博士后科学基金资助项目(2014M552012, 2015T80778)

作者简介: 程显(1982—), 男, 河南平顶山人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事高压电器研究, E-mail: chengxian@zzu.edu.cn.

的绝缘强度要求,为环保气体应用于 35 kV GIS 提供设计依据。

## 1 气室模型建立与电场计算

### 1.1 气室模型建立

气室内部主要包括母线、母线套管、真空灭弧室、内绝缘锥、三工位隔离接地开关、连接部件等。气室部件多为非对称结构,采用 3 维模型可以更准确的反映气室模型特征。根据气室实际结构尺寸建立的气室 3 维模型如图 1 所示。

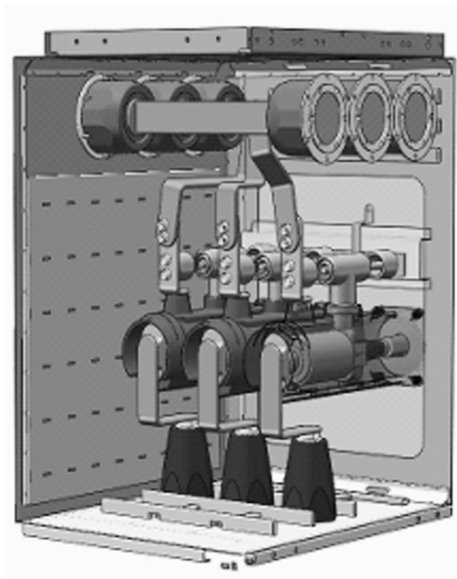


图 1 GIS 气室模型

Fig.1 GIS gas chamber model

### 1.2 场强求解方法

场强计算过程中主要条件设定气室外壳接地,即其为整个计算区域边界,计算区域包括上述部件以及气室所充入的绝缘介质。气室内部的材料主要分为导体和绝缘材料:导体材料铜是良导体,电场计算时作为等势体处理;绝缘材料包括聚氯乙烯、SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体、环氧树脂等,这些材料在工频电场作用下,内部位移电流远大于传导电流可视为理想电介质。由于工频电压频率较低可以忽略感生电场的影响,因此气室内部电场可以认为是静电场。上述气室电场分布可由静电场方程描述,静电场的基本方程微分形式可表示如下

$$\nabla \cdot D = \rho. \quad (1)$$

$$\nabla \times E = 0. \quad (2)$$

$$D = \varepsilon E. \quad (3)$$

上述 3 个方程构成了静电场的基本方程,其中  $D$  为电位移; $\rho$  为电荷密度; $E$  为电场强度; $\varepsilon$  为介电常数,由材料属性决定。为便于计算,引入电

位函数的概念,用  $\varphi$  表示电位,静电场的电场强度矢量等于负的电位梯度,即

$$E = -\nabla \varphi. \quad (4)$$

联立上式可以得出

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon}. \quad (5)$$

式(5)是静电位的微分方程,通过求解此方程可以确定空间任一点的电位。通过施加边界条件和激励源,静电场分布即可唯一确定。静电场的边界条件可表示为

$$-\varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} + \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} = \sigma. \quad (6)$$

式中: $\sigma$  为分界面上分布的自由电荷面密度; $\varepsilon$  为分界面两种介质的介电常数。

进行电场计算前还需对气室模型进行网格划分,划分的网格质量对仿真结果有很大影响,笔者采用四面体网格划分 GIS 气室模型,划分后的 GIS 气室剖分节点 7 245 180 个,可满足计算精度的要求。

### 1.3 场强计算

根据 GB 3906—2006 设计要求,35 kV 电压等级 GIS 应能够耐受工频电压为:隔离断口 118 kV/1 min,接地断口 95 kV/1 min;雷电冲击耐受电压:隔离断口 215 kV,接地断口 185 kV。仿真计算中以雷电冲击耐受电压值进行测算,在隔离断口与接地断口分别施加 215 kV 和 185 kV 电压,接地触头与外壳始终保持零电位。图 2 为气室内三工位开关隔离断口闭合时的电场分布情况,气室内整体电场分布不均匀,断口和绝缘拉杆处最甚。图 3、图 4 分别为三工位开关接地断口和隔离断口在合闸位置时气室的电场强度分布情况。

由图 2~4 可知,三工位开关工作在接地位置时,电场强度最大值出现在隔离断口的端部,其值为 6.29 kV/mm;隔离断口处于闭合状态时,接地断口的电场强度最大值为 6.6 kV/mm;除此之外,绝缘拉杆和真空灭弧室上下接线端子上的电场强度分别为 5.87 kV/mm 和 5.25 kV/mm,也高于或接近替代气体 5.5 kV/mm 的绝缘强度。因此,需要对这些部位进行结构优化使该处及临近区域的电场分布更加均匀,满足 GIS 气室的绝缘要求。

## 2 气室结构优化与电场校验计算

### 2.1 气室结构优化

通过上述场强计算可知气室内存在电场强度

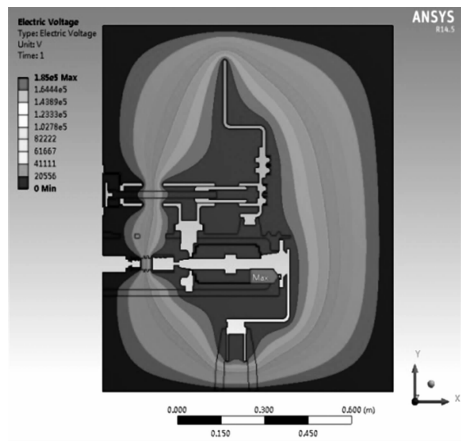


图 2 GIS 气室电场分布

Fig.2 The electric field distribution of GIS chamber

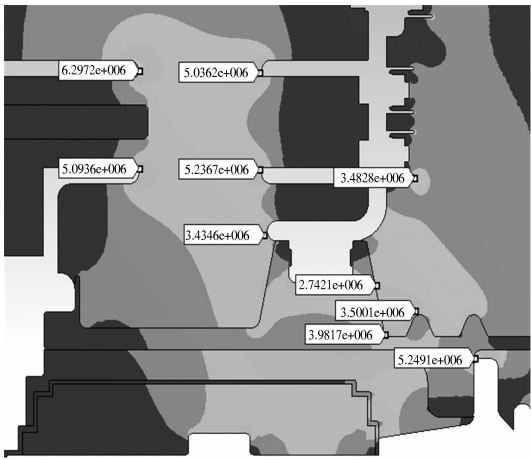


图 3 隔离断口电场强度分布

Fig.3 The electric field strength distribution of disconnecting break

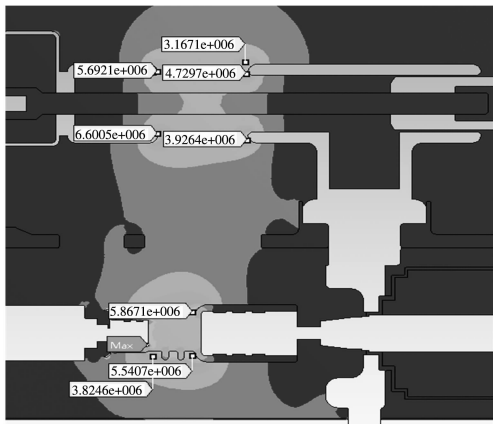


图 4 接地断口与绝缘拉杆电场强度分布

Fig.4 The electric field strength distribution of grounding break and insulated rod

较为集中且场强过高部位,必须对其重新进行结构优化.其中,隔离开关、接地开关断口部位倒角过于尖锐导致该处电场强度特别集中,可以通过增加屏蔽罩的方法来降低电场强度;绝缘拉杆与

其伞裙连接处形状不规则,且绝缘拉杆等效绝缘长度不足容易发生闪络,可以通过增大绝缘杆与绝缘伞裙端接处曲率半径、增多伞裙个数以增加等效绝缘长度的方法降低其电场强度;其他场强较为集中但未超过限定值的部位可以通过优化母线排形状、增大母线转角和固定件端部曲率半径、使用表面平滑度更好的配件等方法尽可能均匀电场分布.对优化后的部位进行建模并重新代入 GIS 气室模型进行电场计算,如果场强计算值低于设定的场强值则该处优化符合设计要求,反之则需进一步结构优化,直至场强计算值低于设定值.气室结构优化设计的流程如图 5 所示.

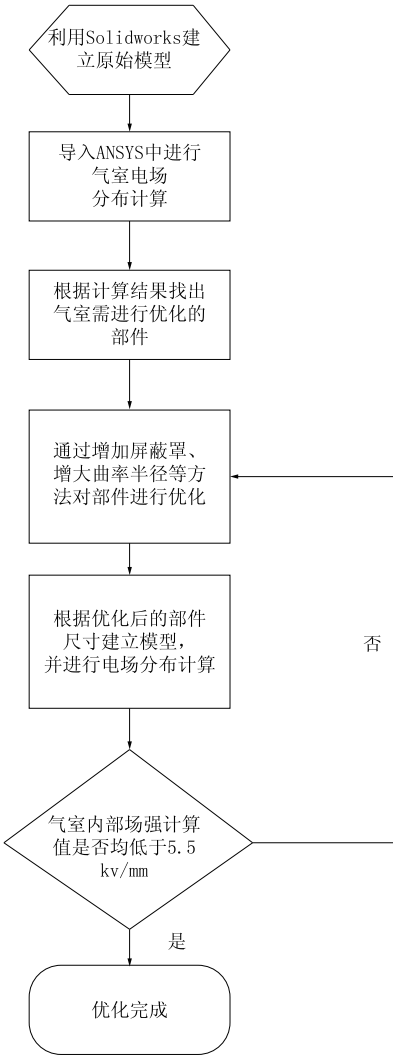


图 5 优化流程图

Fig.5 Optimization process

2.2 结构优化结果

依照图 5 中优化设计流程,最终完成的 GIS 气室三维模型如图 6 所示.原气室内场强过高而重新优化的部件电场强度计算结果如图 7、图 8、图 9 所示,图 7 是隔离断口优化后电场强度分布

图,图 8 是接地断口优化后电场强度分布图,图 9 是绝缘拉杆表面电场强度分布图.

由图 7~9 可知,电场强度分布规律虽与之前相同,高场强区域仍集中在隔离断口、接地断口端部和绝缘拉杆表面,但上述电场强度的最大值已降至 5.05 kV/mm,低于替代气体的绝缘强度值 5.5 kV/mm,替代气体此时可以满足气室内的绝缘要求.气室内结构优化前后电场强度集中区域的场强值对比如表 1 所示.

3 结论

(1) 针对 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体替代 SF<sub>6</sub>气体作为 35 kV GIS 气室绝缘介质无法满足气室绝缘要求的问题,建立了气室结构 3 维模型并进行电场计



图 6 优化后气室三维模型

Fig.6 The optimized chamber three-dimensional model

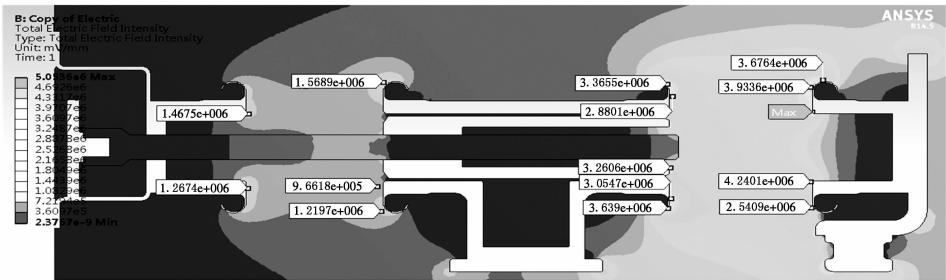


图 7 隔离断口优化后电场强度分布

Fig.7 The optimized electric field strength distribution of disconnecting break

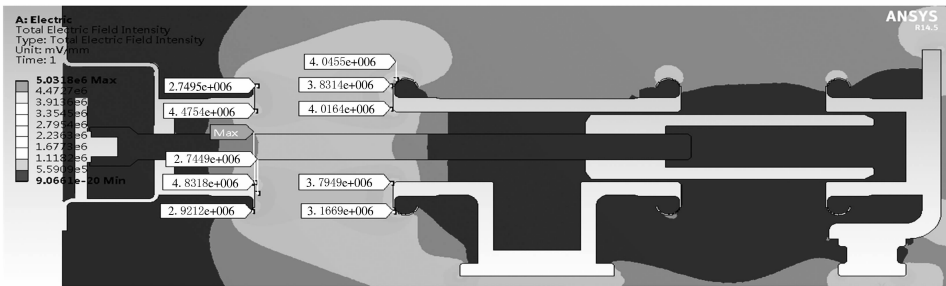


图 8 接地断口优化后电场强度分布

Fig.8 The optimized electric field strength distribution of grounding break

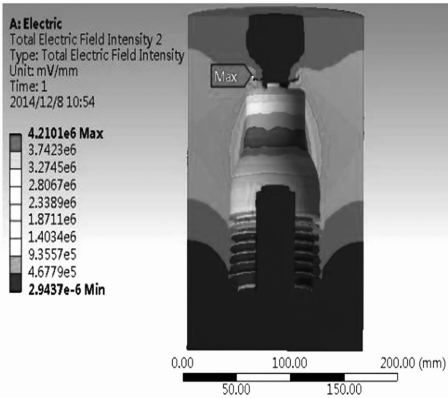


图 9 绝缘拉杆优化后电场强度分布

Fig.9 The optimized electric field strength distribution of insulated rod

表 1 气室内部结构优化前后电场强度集中处场强对比

Tab.1 Mix proportion of concrete		
优化部位	改进前电场强度 /(kV·mm <sup>-1</sup> )	改进后电场强度 /(kV·mm <sup>-1</sup> )
隔离断口	6.29	5.05
接地断口	6.60	5.03
绝缘拉杆	5.87	4.21
线座搭接端	5.25	5.06

算. 计算结果表明,气室内隔离断口、接地断口和绝缘拉杆等处电场强度较为集中,电场强度最大值均超过替代气体的绝缘强度.

(2) 对气室内主要部件进行了结构优化设计,并对优化后的气室模型重新进行电场计

算,计算结果表明气室内部电场强度最大值已降至 5.5 kV/mm 以下。

(3)通过对气室上述部位的结构优化,SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体可以作为 35 kV GIS 气室的绝缘介质,为 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体应用于中压低碳型 GIS 提供了依据,基于研究成果的 35 kV GIS 样机 2015 年 5 月通过试验测试,绝缘水平满足相关标准要求。

参考文献:

[1] The Working Group III. Intergovernmental panel on climate change: fifth assessment report [ R ]. Geneva, Switzerland: The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.

[2] 李惠芬. SF<sub>6</sub>气体替代面临诸多挑战[J]. 高电压技术, 2000, 26(3): 50 – 51.

[3] 李旭东,周伟,屠幼萍,等. 0.1 ~ 0.25 MPa 气压下二元混合气体 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>和 SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>的击穿特性[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 260 – 264.

[4] 郭璨,张乔根,文韬,等. 雷电冲击下稍不均匀电场中 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体的协同效应[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 69 – 75.

[5] CHRISTOPHOROU L G, VAN B R J. SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>mixtures basic and HV insulation properties[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 952 – 1003.

[6] 牛文军,魏俊梅,张铎,等. 550 kV SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>充气母线绝缘性能研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 77 – 80.

[7] 刘彦军,李松琴. 户外 SF<sub>6</sub>断路器在严寒地区可靠运行的措施[J]. 高压电器, 2001, 37(5): 53 – 61.

[8] 邱志斌,黄道春,阮江军. 72.5 kV 真空灭弧室电位和电场分布研究[J]. 高压电器, 2012, 48(11): 36 – 42.

[9] 杨敬华,范承勇. 40.5 kV 真空断路器绝缘结构电场分析及优化设计[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 146 – 152.

[10] 和彦森,张俊民,袁海文. 高压 SF<sub>6</sub>断路器灭弧室电场优化与分析[J]. 高压电器, 2006, 42(6): 442 – 449.

[11] 孙纪东. 中压 GIS 设备的气室绝缘研究与设计[J]. 电气时代, 2009(5), 78 – 83.

The Electric Field Strength Calculation and Structure Optimization for Low-carbon 35kV GIS Chamber

CHENG Xian<sup>1</sup>, WANG Haiyan<sup>2</sup>, YAN Guangchao<sup>2</sup>, JIAO Lianyao<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China; 2. Ping Gao Group Co, Ltd, Pingdingshan 467000, China)

**Abstract:** The chamber electric field distribution of gas insulated metal enclosed switchgear is an important issue for its structural design. The chamber electric field distribution should be as uniform as possible to avoid flashover and discharge phenomenon in the high electric field strength place. In this paper, SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> mixed gas replaces SF<sub>6</sub> gas as an insulation dielectric of 35kV voltage class GIS chamber. The electric field analysis and structural optimization are conducted to solve flashover problem in the chamber caused by the alternative gas insulated strength lower than the maximum electric field strength of chamber. The Solidworks software is used to build a three-dimensional model of GIS chamber, and its finite element analysis is conducted. The electric field intensity of chamber model is calculated based on the electrostatic field theory. The calculation dates show that the electric field strength values of disconnecting break, grounding break and insulated rod, etc in the chamber are too high. The structure optimization is conducted for those parts, and the optimized chamber model is carried on a verification calculation. The results proved that the electric field strength of optimized GIS chamber is significantly lower than previous one. Its maximum value is lower than the alternative gas dielectric strength, so the alternative gas can meet the insulation requirement of optimized gas chamber.

**Key words:** GIS gas chamber; electric field strength calculation; insulation dielectric; electric field distribution; structure optimization