

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.02.002

母线通流温升对GIS内绝缘特性影响的仿真研究

吴细秀^{1,2}, 程诗敏^{1,2}, 周帆^{1,2}, 吴士普², 冯宇²

(1. 武汉理工大学自动化学院, 武汉 430070; 2. 电网环境保护国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: GIS母线通流产生温升发热现象,进而引起SF₆的流动使其分布不均。SF₆击穿特性受其分布不均性的影响极大,极易在分布不均的局部区域出现击穿现象,从而引发绝缘故障。为此文中开展了母线通流温升对GIS内部绝缘特性的影响研究。建立了考虑集肤效应、涡流损耗、电导率温升效应的1 100 kV GIS气室电磁场—温度场—流场耦合模型,求解了SF₆在GIS母线通流温升条件下的流动情况。结果表明:母线通流温升的确使SF₆分布不均,温升越高区域SF₆分布越稀薄,绝缘水平下降越厉害。为定量得到GIS内部绝缘状态,在分析SF₆击穿特性基础上,根据绝缘裕度的概念建立了绝缘裕度计算模型,得到了GIS内部绝缘特性。计算结果表明:母线通流温升使GIS内部绝缘水平大幅下降,从14.51 kV/mm降到9.92 kV/mm,有被击穿的危险。这表明母线通流温升对GIS内部绝缘水平的影响不能忽略,这一点在今后的GIS内绝缘设计中应予以高度重视。

关键词: SF₆气体介质; 内绝缘特性; GIS母线; 击穿裕度; 多物理场耦合

Influence of Temperature Rise due to Rated-current Flowing Through Busbar on the Internal Insulation Characteristics of GIS: A Simulation Study

WU Xixiu^{1,2}, CHENG Shimin^{1,2}, ZHOU Fan^{1,2}, WU Shipu², FENG Yu²

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan 430074, China)

Abstract: Temperature rise phenomena occurs when rated current flows through the busbar of GIS, which results in SF₆ gas flowing and ultimately makes it distribute unevenly. The uneven SF₆ distribution greatly influences its breakdown characteristics, and may easily cause partial discharge in local uneven distribution area and then lead to insulation faults. In this paper, an electromagnetic-temperature-flow multi-physical field coupling model considering eddy effect, skin effect, and temperature rise effect of conductivity is established to analyze the flowing characteristics of SF₆ in the 1 100 kV GIS. The results show that the higher the temperature rise, the thinner the SF₆ gas distribution and the lower the insulation level of GIS. To quantitatively evaluate the internal insulation condition of GIS, the relationship between critical breakdown strength and SF₆ gas distribution is analyzed and the concept of insulation margin is defined. Subsequently, a mathematical model is set up to calculate the internal insulation margin of GIS. The results show that the temperature rise due to current flowing through the busbar makes the internal insulation level of GIS decrease dramatically from 14.51 kV/mm to 9.92 kV/mm, which implies that under this condition the GIS will be easily broken-down if it suffers high voltage impulse such as lightning. It is concluded that the influence of this temperature rise on the internal insulation level of GIS cannot be ignored in insulation design of GIS.

Key words: SF₆ gas; internal insulation characteristics; GIS busbar; breakdown margin; multi-physical field coupling

收稿日期:2019-10-21; 修回日期:2019-12-04

基金项目:电网环境保护国家重点实验室开放基金项目资助(GYW51201901085)。

Project Supported by Open Fund of State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection(GYW51201901085).

0 引言

绝缘故障始终是影响GIS运行可靠性的重要因素。据不完全统计,绝缘故障可占到总故障30%。金属颗粒、污秽、绝缘件制造缺陷、悬浮电位以及水分等是诱发绝缘故障的主要因素^[1-5]。当GIS内部出现上述诱因时,将会导致GIS内部电场局部电场畸变,一旦畸变电场强度超过绝缘强度时,局部放电现象产生了。由此可见,局部放电是GIS绝缘故障的主要表现形式,而GIS内部局部电场分布不均、绝缘强度不够是绝缘故障产生的根本原因^[6-7]。

除上文所述诱因会导致GIS内部局部电场强度分布不均外,母线通流温升也会导致GIS内部局部电场强度分布不均。GIS母线通流时会产生温升发热现象,进而造成绝缘气体SF₆气体的流动。作为绝缘介质的SF₆气体一旦流动起来其分布的均匀性就遭到了破坏,于是局部电场分布不均现象出现了。电压等级越高,通流电流越大,SF₆的流动越剧烈,越易出现局部电场分布不均现象。对SF₆气体而言,绝缘强度的不均匀性对其击穿特性的影响远比空气大,这是GIS设计中应极力避免出现的现象。

国内外开展大量研究分析金属颗粒、污秽等对GIS内部电场分布的影响^[8-11]及温升给母线带来的影响^[12-15],而很少有研究讨论母线温升导致SF₆气体流动进而对GIS内部电场分布的影响。尽管GIS在设计时有较大的绝缘裕度,但母线温升对GIS内部气室电场分布不均的影响是否会影响其内部的绝缘水平或是在多大程度上对内部绝缘有影响尚未可知,因此有必要开展相应的研究。为此,文中以特高压GIS为研究对象,分析了SF₆击穿特性的击穿,得到SF₆介质绝缘强度与其密度成正比的关系,在此基础上建立了温度场一流场—电场多物理场耦合模型计算了SF₆气体密度的分布情况,分析了母线温升对SF₆气体流动及其密度分布的影响、进而得到母线通流温升对GIS内部绝缘强度的影响规律。

1 SF₆气体击穿特性分析

依据流注理论,SF₆临界击穿场强最终表达形式为^[16]

$$E > \left[\left(\frac{E}{N} \right)^* \cdot \frac{R_0}{R_{SF_6}} \right] \cdot \rho \quad (1)$$

式(1)中: R_{SF_6} 表示SF₆气体的分子量,即146.07 g/mol; R_0 为阿伏伽德罗常数, $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$; ρ 为SF₆气体密度。将 $(E/N)^* = 3.56 \times 10^{-15} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$,代入式(1),即可得

到SF₆气体介质的临界击穿场强最终表达式判据

$$E > E_{\text{crit}} = 1.467\rho \quad (2)$$

式(2)中, E_{crit} 为SF₆临界击穿场强,kV/mm。由式(2)可知:①SF₆气体绝缘强度与其密度分布成正比,即气体密度分布越浓厚的地方,越不易被击穿。因此SF₆气体密度的分布直接决定了其内部绝缘状态。②当外加电场产生的场强超过该临界场强时,SF₆气体介质就会被击穿。

文[17]提出击穿裕度的概念,即用临界击穿场强与实际场强之间的差值 E_m 描述SF₆气体的实际绝缘水平,见式(3)

$$E_m = 1.467\rho - E \quad (3)$$

当 $E_m > 0$ 时,表明SF₆气体绝缘水平良好;当 $E_m < 0$,表明SF₆气体已被击穿,绝缘遭到破坏;若 E_m 接近于零,则表明SF₆气体有被击穿的危险,应采取相应措施提高介质绝缘水平,避免SF₆气体被击穿。

2 GIS内部气室SF₆气体流动模型的建立

如前文所述,GIS母线通流温升会引起SF₆气体的流动进而导致其密度分布发生改变,为定量得到母线通流温升对SF₆气体密度分布的影响,文中以特高压GIS为研究对象,建立了温度场一流场耦合的GIS内部气室流动模型,并通过计算得到了GIS内部气室SF₆的气体密度分布情况。

2.1 特高压GIS母线计算模型

建立的特高压GIS母线三维有限元计算模型见图1,其相关计算参数见表1。

依据GIS母线温升试验标准,试验时母线应施加的电流为额定电流的1.1倍^[18],故文中在仿真时电流取为额定电流的1.1倍。

2.2 SF₆气体流动模型

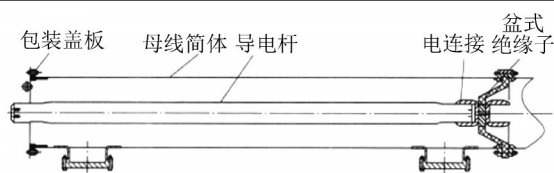
SF₆气体是在母线通流发热和外壳损耗发热共同作用下的流动,从流体力学的角度来看属低速($Ma < 0.3$)牛顿流体流动,且流动状态为层流($Re < 2\,000$)(即不存在激波的影响)。因此该流场问题可归结为有源、非定常、可压缩、变边界条件的粘性气流场问题。可用三维N-S方程表示^[19]。

2.2.1 控制方程

1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho w_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

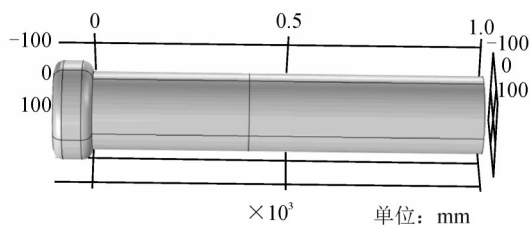
2) x轴向动量守恒方程



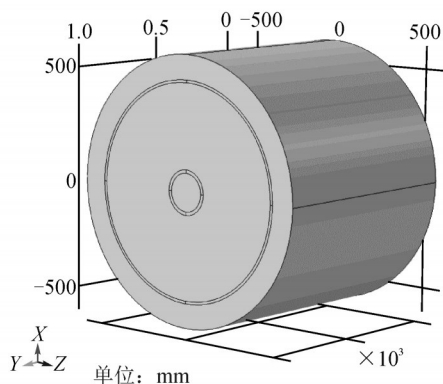
(a) GIS母线一个单元结构图



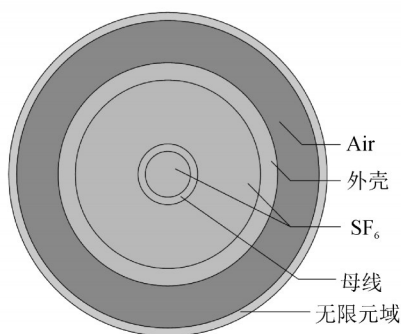
(b) 实物图



(c) 导杆计算模型



(d) 整体计算模型



(e) 计算模型截面示意图

图1 GIS母线模型示意图

Fig. 1 3D model of GIS bus bar

$$\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \quad (5)$$

表1 110 kV GIS母线相关参数

Table 1 The parameters of 110 kV GIS bus bar for calculation

参数	数值	参数	数值
外壳内径/mm	420	导体内径/mm	90
外壳外径/mm	440	导体外径/mm	100
额定电流 I_0 /A	8 000	导体厚度/mm	10
额定电压 U_0 /kV	1 100	环境温度/℃	40
放置方式	水平	额定气压/MPa	0.36

3) y轴方向动量守恒方程

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + w_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y \quad (6)$$

4) z轴方向动量守恒方程

$$\rho \left(\frac{\partial w_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \quad (7)$$

5) 能量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_x (e + p/\rho)}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y (e + p/\rho)}{\partial y} + \frac{\partial \rho w_z (e + p/\rho)}{\partial z} = \\ \frac{\partial (u_x \tau_{xx} + v_y \tau_{xy} + w_z \tau_{xz} + k \frac{\partial T}{\partial x})}{\partial x} + \\ \frac{\partial (u_x \tau_{xy} + v_y \tau_{yy} + w_z \tau_{yz} + k \frac{\partial T}{\partial y})}{\partial y} + \\ \frac{\partial (u_x \tau_{xz} + v_y \tau_{yz} + w_z \tau_{zz} + k \frac{\partial T}{\partial z})}{\partial z} + q_v \end{aligned} \quad (8)$$

式(4)-(8)中: ρ 为气体密度, kg/m^3 ; p 为气体压力, Pa; u_x, v_y, w_z 分别为气体的 x, y, z 向速度, m/s; q_v 为能量源项, J; e 为单位质量的总能量, J; τ_{ij} 为粘性应力张量的各个分量。

$$e = \frac{p}{(\alpha - 1)\rho} + \frac{u_x^2 + v_y^2 + w_z^2}{2} \quad (9)$$

式(9)中: α 为比热比。

2.2.2 边界条件

边界条件包括速度边界和温度场边界条件。

1) 温度场边界条件。SF₆气体在不均匀受热及重力的影响下, 气室内部以自然对流传热为主。

对于气室内部主导体外壁面, 存在如下边界条件

$$-k_1 \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_{in} (T_{cond} - T_{tank}) + \varepsilon_{in} \sigma_b (T_{cond}^4 - T_{tank}^4) \quad (10)$$

对于外壳外壁, 存在如下边界条件

$$-k_2 \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_{out} (T_{tank} - T_{surr}) + \varepsilon_{out} \sigma_b (T_{tank}^4 - T_{surr}^4) \quad (11)$$

式(10)、(11)中: k_1 、 k_2 分别为主导体与外壳的导热系数; n 为法线方向; a_{in} 、 a_{out} 分别为主导体和外壳的对流散热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; T_{cond} 、 T_{tank} 、 T_{surr} 分别为主导体外壁、外壳外壁与外部环境温度; ε_{in} 、 ε_{out} 分别为主导体和外壳外壁的等效发射系数; σ_b 为 Stefan-Boltzmann 常数, $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ 。

2)速度边界条件。对于流经物体表面的连续性粘性流体 SF_6 , 存在无滑移边界条件, 即在物体表面有

$$u = v = w = 0 \quad (12)$$

故在进行流场边界定义时, 只需要对主导体外表面和外壳内表面的施加无滑移边界条件即可。

2.3 涡流发热的处理

GIS 母线作为载流导体, 自身的电阻损耗产生焦耳热, 使自身温度升高并向周围环境散热; 外壳因电磁感应现象, 产生涡流。即影响母线温升的有电阻发热和外壳的涡流损耗发热。因此计算 GIS 内部气室温升情况需解决两个系统方程: 温度场方程和涡流场方程。

1)温度场方程。母线通流后的温升情况可通过傅里叶传热方程求解

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_T \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_T \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_T \frac{\partial T}{\partial z}) + q_v = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (13)$$

式(13)中: k_T 为导热系数, $W/(m \cdot K)$; T 为介质温度, $^{\circ}C$; q_v 为单位体在单位时间内所产生的热量, W/m^3 , $q_v = \frac{1}{\sigma} |J|^2$, 其中, J 为总电流密度包括激励电流密度和涡流电流密度, A/m^2 。稳态时, $\partial T / \partial t = 0$ 。将式(13)计算得到的结果带入式(8)即可实现温度场与流场的耦合。

2)涡流场方程。文中采用矢量位 A 求解涡流场方程^[20]。

$$B = \nabla \times A \quad (14)$$

则由磁矢量位 A 描述的涡流场的基本方程为

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = -J_e \quad (15)$$

将式(12)转换为三维时变涡流计算的控制方程可化为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z}) = \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - J_e \quad (16)$$

三维正弦时变电磁场的控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z}) = j\omega\sigma A - J_s \quad (17)$$

2.4 电导率温度效应

式(15)–(17)表明, 电导率的温升效应会影响金属导体的涡流损耗进而影响母线的温升, 最终影响 SF_6 气体的密度分布情况。故需考虑电导率的温升效应。

母线多采用铝合金 6063 材料, 在 $20^{\circ}C$ 时的电导率为 $3.03 \times 10^7 S/m$, 电导率与温度变化关系为

$$\sigma = \sigma_0(1 - k\Delta T) \quad (18)$$

式(18)中: $\Delta T = T - 20^{\circ}C$; σ_0 为 $20^{\circ}C$ 对应的电导率; k 为温度效应系数, 此时为 0.004; T 为实际温度; σ 为实际温度对应的电导率。

采用多次迭代的方法, 可以精准地考虑电导率的温度效应, 但极大增加了三维多物理耦合场的计算量, 对计算机的能力提出了更高的要求。为此, 文中采用了一种简化方法考虑电导率的温升效应。

根据 GIS 母线设计标准, 母线通流后温升不应超过 $35^{\circ}C$ ^[18]。因此在最高环境温度下, 母线温升最大的条件下其电导率效应最明显。于是电导率表示为

$$\sigma = \sigma_0[(1 - k\Delta T_1) + (1 - k\Delta T_2)]/2 \quad (19)$$

式(19)中: $\Delta T_1 = (40 - 20)^{\circ}C = 20^{\circ}C$; $\Delta T_2 = (70 - 20)^{\circ}C = 50^{\circ}C$ 。

最终得到计算用电导率 $2.608 \times 10^7 S/m$ 。

2.5 网格划分

在有限元计算过程中, 网格划分是计算的关键。网格过细, 一方面会增大计算时间, 同时也增加了对计算机性能方面的要求; 另一方面, 还可能造成计算不收敛, 导致计算无法完成。网格过粗, 则有可能使计算结果不准确。该模型中, 由于主导体厚度和外壳厚度与整个模型的尺寸比小得多。为了满足精度和收敛的要求, 采用多级网格划分的方法。

在计算 SF_6 流体分布时还需通过网格细分来解决集肤效应和涡流效应问题。文中采用对母线细分外加边界层网格剖分解决集肤效应, 见图 2(b)。同样, 在细分网格的基础上采用多级分层网格解决涡流效应问题, 见图 2(c)。

3 计算结果与分析

1 100 kV GIS 内部气室 SF_6 的温度、密度和流速的分布情况见图 3–5。其中, 图 3 和图 5 的(c)、(d)分别是垂直方向上温度和密度随路径的变化曲线图, 具体路径见图 3(b)中 l_1 、 l_2 。

由图 3–5 可知:

1)母线通流后会出现温升现象, 温度的分布呈现出均匀性, 由温度随距母线中心垂直距离的变化趋势可知: 离母线外壳表面越远的区域其温度越小, 最大温度出现在母线外壳表面。

2)GIS 气室内气体在温度越高的地方流速越快,

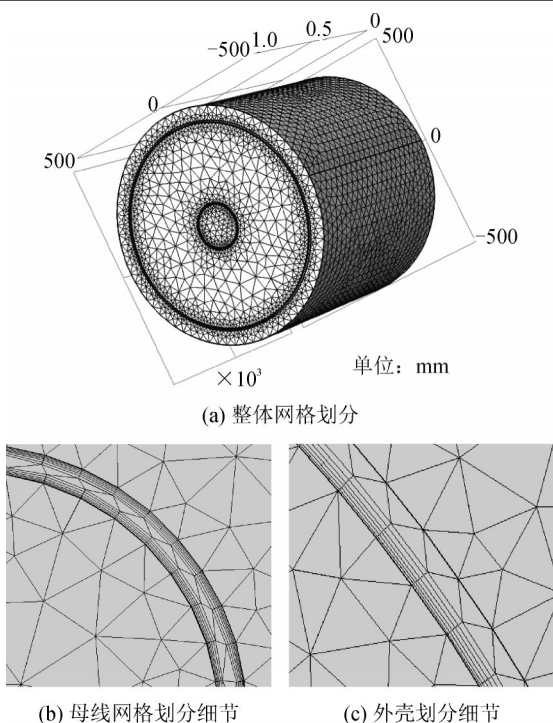


图2 网格划分

Fig. 2 Element mesh

最大流速出现在温度最高处。计算结果还表明SF₆气体出现了强烈的回流现象,见图4(b)。

3)由图5(b)、(c)、(d)可知,隔离开关操作条件下,气室中的SF₆气体分布不均匀,且在垂直方向上呈非线性分布。通过对比图3(c)、(d)及图4(c)、(d)可知,温度越高的区域SF₆密度分布稀薄,表明此处绝缘强度越低,如图4所示母线上部分。若此处存在颗粒或水分含量较高,则极易出现局部放电;反之,温度越低的区域,SF₆密度分布越浓密,这些区域的绝缘情况越好。

4 GIS母线内SF₆击穿裕度的求解

图4虽然计算出SF₆的密度分布,但还是无法知晓其内部绝缘水平。为此,文中根据式(3)在SF₆流动模型基础上,建立电场模型求解其内部绝缘状况。

4.1 GIS内部电场分布计算模型

GIS内部气室内电场分布及SF₆气体击穿裕度分布的求解属静电场计算问题,其求解方程如下。

1) 电场控制方程

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0 \quad (20)$$

2) 边界条件

$$\begin{cases} \Omega: -\nabla \cdot \varepsilon \nabla \varphi = 0 \\ \Gamma_1: \varphi = \varphi_0 \\ \Gamma_2: \varphi = 0 \end{cases} \quad (21)$$

式(21)中: Ω 为求解域; Γ_1 为主导体边界; Γ_2 为外

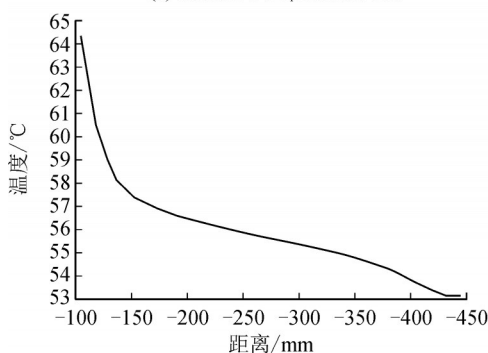
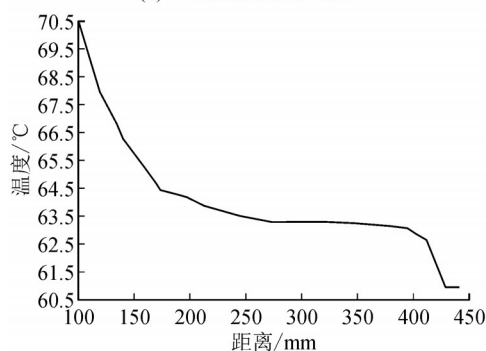
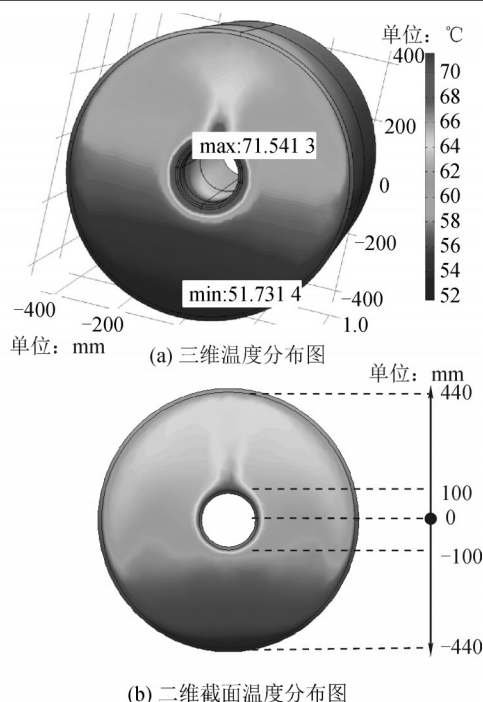


图3 温度分布示意图

Fig. 3 Temperature distribution

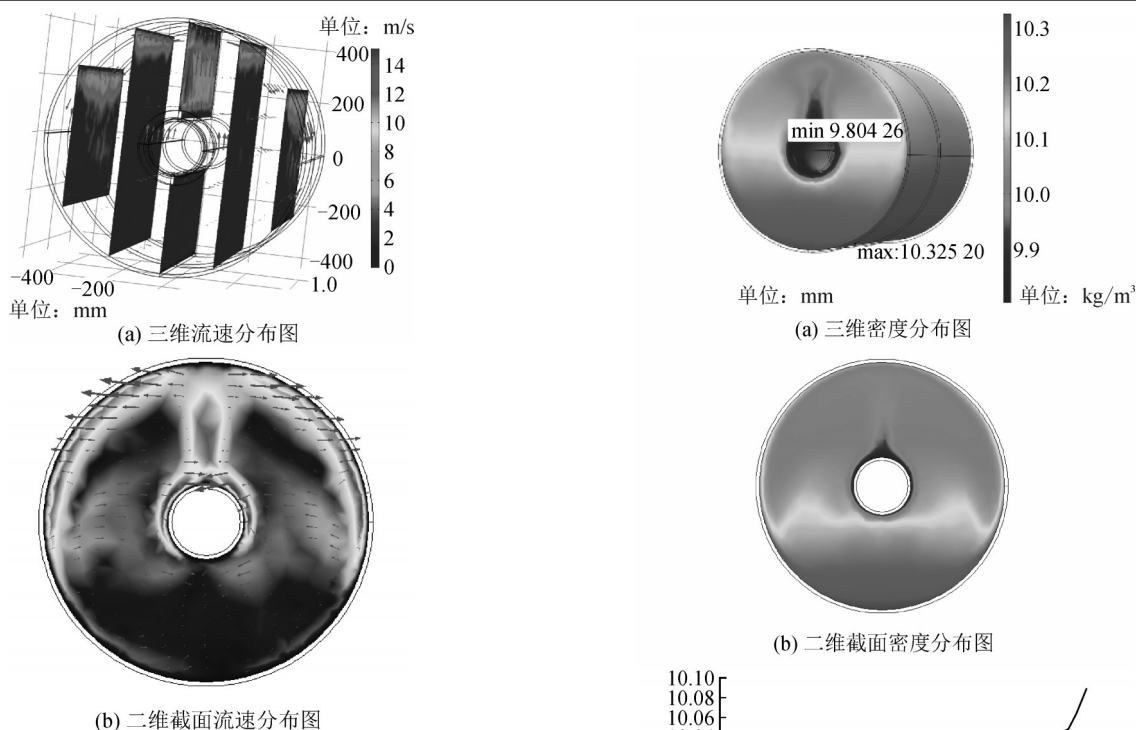
壳边界; φ 为电位,kV。

初始条件: $\varphi_0 = 1100\sqrt{2}/\sqrt{3}$ kV。

计算模型的网格划分同样采用分级网格细化,在接头等关键部位进行网格特别细化。在主导体处加载额定峰值电压,外壳接地,得到计算结果如下。

4.2 击穿裕度分布

图6(a)、(b)分别表示考虑与不考虑温升通过影响SF₆气体密度来影响各个部位的击穿分布的计算

Fig. 4 Velocity distribution of SF₆ gas

结果,具体见图6。

通过对比图6(a)、(b)、(c)可知:

1) 无论是否考虑母线通流温升的影响, GIS内部气室的绝缘裕度并非均匀分布, 越靠近母线外壳区域其绝缘裕度越小。若只考虑气体分布对绝缘影响, 则可得母线外壳区域是易出现局部放电现象的区域的结论。但在工程实际中局部放电与导体粗糙度、金属微粒、污秽等因素均有关, 十分复杂。

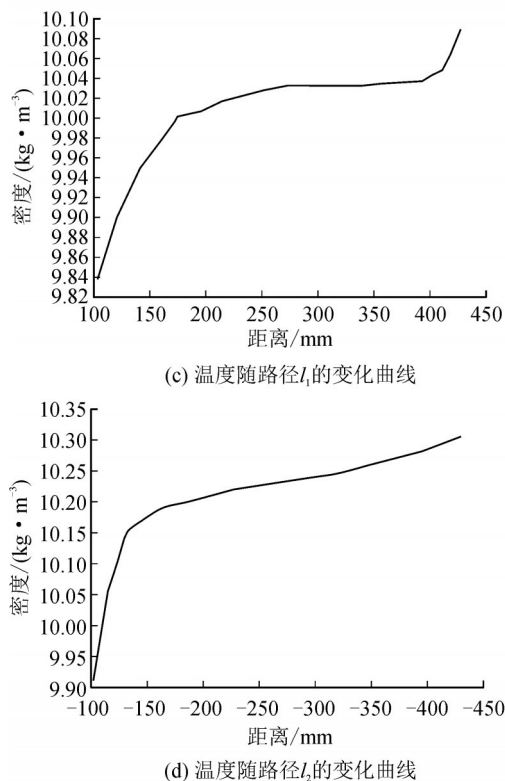
2) 母线的通流温升效应使GIS内部绝缘水平大幅下降, 最小绝缘裕度从14.51 kV/mm降到9.92 kV/mm, 尽管此时满足绝缘要求, 但若此处有金属微粒或有污秽, 亦或是有外施高电压的冲击如雷电冲击, 则此处极易被击穿, 从而引发绝缘故障。

3) 绝缘裕度计算结果表明, 母线通流温升对GIS内部绝缘水平的影响不能忽略, 这点在今后的绝缘设计中应引起高度重视。

5 结论

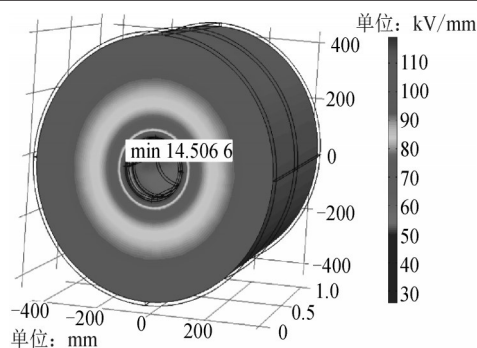
局部放电是GIS绝缘故障的主要表现形式,

GIS内部SF₆分布不均引起的电场强度分布不均导致的部分区域绝缘强度不够是绝缘故障产生的根本原因。GIS母线温升会引起SF₆流动导致SF₆气体分布不均进而影响GIS内部绝缘水平。为研究GIS母线温升对其内部绝缘水平的影响程度, 文中做了如下工作:

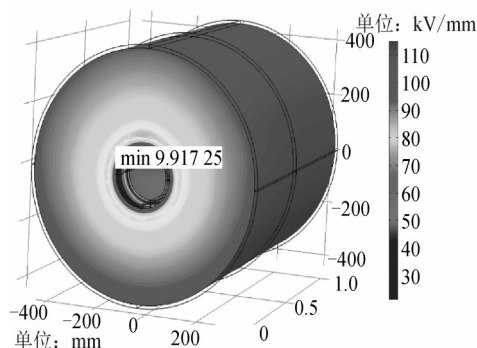
Fig. 5 Density distribution of SF₆

1) 在已有研究的基础上分析了SF₆气体击穿特性, 得到SF₆临界击穿场强与其密度分布的关系;

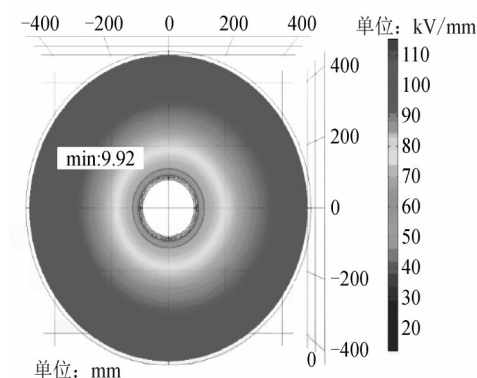
2) 建立了考虑集肤效应、涡流损耗、电导率温升效应的1100 kV GIS气室电磁场—温度场—流场耦合模型, 求解了GIS气室内SF₆气体在母线通流温升的条件下的流动情况。计算结果表明, 温升越高区域, SF₆气体流动越剧烈, 其密度分布越稀薄; 反之, 温升越低地方, SF₆气体密度分布越稠密。并且SF₆在母线上出现回流现象;



(a) 不考虑温升击穿裕度3D分布图



(b) 考虑温升击穿裕度3D分布图



(c) 考虑温升击穿裕度2D分布图

图6 击穿裕度分布图

Fig. 6 Distribution of breakdown margin

3) 论文中通过分析母线通流温升对气室绝缘水平的影响可知, 无论是否考虑通流温升对SF₆气体流动的影响, GIS内部气室的绝缘裕度均呈现出非均匀性。若只考虑SF₆气体密度分布的非均匀性, 则越靠近母线外壳区域其绝缘裕度较小;

4) 母线的通流温升效应使GIS内部绝缘水平大幅下降, 最小绝缘裕度从14.51 kV/mm降到9.92 kV/mm。

上述研究结果表明: 母线通流温升对GIS内部绝缘水平的影响不能忽略, 这点在今后的绝缘设计中应引起高度重视。

参考文献:

[1] 汤铭华. GIS组合电器典型故障分析及改进[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
TANG Minghua. Fault analysis and improvement of gas in-

sulated substation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.

- [2] 崔景春, 王承玉, 刘兆林. 气体绝缘金属封闭开关设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
CUI Jingchun, WANG Chengyu, LIU Zhaolin. Gas insulated metal enclosed switchgear[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [3] 张亮, 李军浩, 谭家勇, 等. 绝缘铜管母线接头处沿面局部放电特性研究[J]. 高压电器, 2013, 49(11): 94-98.
ZHANG Liang, LI Junhao, TAN Jiayong, et al. Characteristics of surface partial discharge on joint of insulated copper busbar[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 94-98.
- [4] CIGRE Working Group 33/32. 12. Insulation coordination of GIS: Return of experience on site tests and diagnostic techniques[J]. Electra, 1998, 176(2): 67-95.
- [5] 金立军, 刘卫东, 黄家旗, 等. GIS金属颗粒局部放电的试验研究[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 10-13.
JIN Lijun, LIU Weidong, HUANG Jiaqi, et al. Examination and research on the partial discharge of metallic particles in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 10-13.
- [6] 汲胜昌, 王圆圆, 李军浩, 等. GIS局部放电检测用特高频天线研究现状及发展[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 163-172.
JI Shengchang, WANG Yuanyuan, LI Junhao, et al. Review of UHF antenna for detecting partial discharge in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 163-172.
- [7] 李德军, 沈威, 郭志强. GIS局部放电常规检测和超声波检测方法的应用比较[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 99-103.
LI Dejun, SHEN Wei, GUO Zhiqiang. Application comparison between conventional and ultrasonic detection methods for GIS partial discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 99-103.
- [8] 齐波, 李成榕, 郝震, 等. GIS绝缘子表面固定金属颗粒沿面局部放电发展的现象及特征[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 101-108.
QI Bo, LI Chengrong, HAO Zhen, et al. Evolution phenomena and features of surface partial discharge initiated by immobilized metal particles on GIS insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 101-108.
- [9] 杨波, 王慧君. GIS盆式绝缘子表面自由金属颗粒缺陷导致局部放电的发展过程[J]. 南方电网技术, 2015, 9(11): 73-77.
YANG Bo, WANG Huijun. Partial discharge development of basin-type insulator of GIS triggered by free metal particles insulation defect[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(11): 73-77.
- [10] 李岩松, 李世延, 仇仔来, 等. GIS绝缘子表面固定金属颗粒放电特性研究[J]. 电测与仪表, 2014(15): 33-36.

- LI Yansong, LI Shiyan, QIU Zilai, et al. Study on discharge characteristics of fixed metal particles on GIS insulator surface[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014(15):33-36.
- [11] 刘 诣. 基于GIS的绝缘子污秽信息管理分析系统的研究与开发[D]. 长沙:湖南大学, 2006.
- LIU Yi. Research and development of insulator contamination information management and analysis system based on GIS[D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [12] WU X, LI H, PENG Y, et al. Temperature distribution analysis of single-phase GIS bus[C]//2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. [S.l.]: IEEE, 2011:1-4.
- [13] KIM J K, HAHN S C, PARK K Y, et al. Temperature rise prediction of EHV GIS bus bar by coupled magneto thermal finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5):1636-1639.
- [14] WU Xiaowen, SHU Naiqiu, LI Hongtao, et al. Contact temperature prediction in three-phase gas-insulated bus bars with the finite-element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2):277-280.
- [15] KIM H K, OH Y H, LEE S H. Predict of temperature-rise in the gas insulated switchgear bus bar using magnetic-thermal multi-physics analysis[C]//Transmission and Distribution Conference Exposition. Asia and Pacific: IEEE, 2009:1-4.
- [16] 王 亮, 林 莘. SF₆断路器开断小电流介质临界击穿电压数值模拟计算分析[C]//2012输变电年会. 上海:[s. n.], 2012:89-94.
- WANG Liang, LIN Xin. Numerical simulation analysis of the small current media critical breakdown voltage on SF₆ circuit breaker[C]//Proceedings of Power Transmission Annual Meeting 2012. Shanghai:[s. n.], 2012:89-94.
- [17] 吴细秀, 张科杰, 余光召, 等. 基于SF₆气体介质击穿判据的气体绝缘变电站母线优化设计[J]. 高电压技术, 2017, 43(6):1950-1957.
- WU Xixiu, ZHANG Kejie, YU Guangzhao, et al. Optimal design of gas insulated substation bus bar based on breakdown criteria of SF₆ gas[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6):1950-1957.
- [18] 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求:GB/T 11022—2011[S]. 北京:中国标准出版社, 2011.
- Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards: GB/T 11022—2011[S]. Beijing: Standard Press of China, 2011.
- [19] 王黎明, 刘 霆, 梅红伟, 等. 基于计算流体力学的支柱绝缘子积污特性研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(8):2741-2749.
- WANG Liming, LIU Ting, MEI Hongwei, et al. Research on contamination deposition characteristics of post insulator based on computational fluid dynamics[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8):2741-2749.
- [20] 曾 亮, 郭建炎, 袁传镇, 等. 基于有限元分析的三相共箱GIS母线温度场分布[J]. 水电能源科学, 2015, 33(9):196-199.
- ZENG Liang, GUO Jianyan, YUAN Chuazhen, et al. Temperature field distribution of three-phase box GIS bus based on finite element[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(9):196-199.
- 吴细秀(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要从事高电压绝缘、高压电器电磁仿真方面的研究工作(通讯作者)。

《高压电器》2020年2期广告单位

彩色广告

封一:莱茵技术(上海)有限公司

封二:珠海思创电气有限公司

封三:史陶比尔(杭州)精密机械电子有限公司

封四:上海乐研电气有限公司

前插1:北京京东方真空电器有限责任公司

前插2:浙江雅博自动化设备有限公司

前插3:西安高压电器研究院有限责任公司(认证中心)

前插4:陕西维柯瑞电气有限责任公司

前插5:陕西龙翔电器有限公司

前插6:陕西斯瑞新材料股份有限公司

前插7:攀时(上海)高性能材料有限公司

前插8:西安高压电器研究院有限责任公司(业务)