

基于屏蔽罩开孔的 GIS 隔离开关温度场散热优化设计

陈世萍, 丛浩熹, 李庆民

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: GIS 设备触头过热会引发重大事故, 因此研究其内部温度场散热优化对 GIS 设备的设计和运行具有重要意义。以实际单相 GIS 隔离开关为例, 采用有限元分析法建立了二维电磁热流耦合场仿真模型。在综合考虑辐射散热、气体对流、涡流损耗和重力加速度因素的基础上, 分别针对不同的屏蔽罩结构设计方案, 分析了 GIS 内部温度场分布特点。研究结果表明, 对于平放的 GIS 设备, 在相同半径处顶部温度高, 底部温度低, 且呈现左右对称分布的特点。由于筒内 SF₆ 气体对流散热较强烈, 内部的 SF₆ 气体呈现弯曲的 S 状分布。屏蔽罩开孔并不能减小热源, 但对加快气体自然对流散热、减小内部导体温升具有显著的效果。采用对称结构对屏蔽罩开孔, GIS 内部最大场强低于实际圆环形屏蔽罩, 且低于工程击穿场强值, 不会引起电场畸变而造成局部放电故障。在综合考虑散热效果和电场畸变程度下, 提出一种基于对称开孔结构的屏蔽罩散热优化设计方案, 可为 GIS 设备散热优化设计及其温度监测提供一定的参考价值。

关键词: GIS; 多场耦合; 温度场; 屏蔽罩开孔; 有限元分析

DOI: 10.12067/ATEEE1906015

文章编号: 1003-3076(2020)05-0074-07

中图分类号: TM56

1 引言

随着我国电力系统向智能化、大功率、特高压等方面飞速发展, 气体绝缘金属封闭开关 (Gas Insulated Switch-gear, GIS) 广泛应用于电厂和电网中^[1,2]。它具有占地面积小、结构紧凑、安装检修方便、互换性好、运行可靠、维护工作量小等优点。但是由于 GIS 封闭性、大电流运行的特点, 容易造成温升过高以及发热等问题, 特别是当 GIS 内部触头接触不良时, 如果没有及时处理, 由损耗发热引起的故障会带来电网的重大事故和严重的经济损失^[3]。根据不完全统计, 我国电网公司使用的 GIS 高压设备均不同程度地存在隔离开关、断路器、电缆头等部件由于接触不良、绝缘老化劣化等, 造成母线过热温度攀升, 从而引发重大故障的现象^[4]。因此, 为了准确预测并且消除故障隐患, 确保 GIS 设备以及电厂和电网的安全可靠运行, 研究 GIS 设备温度场的分布特性及优化设计具有重要意义。

GIS 母线和隔离开关的损耗发热计算, 综合应

用了电磁场、传热学、流场等领域的理论和技术。数值分析方法主要涵盖传统解析法和有限元分析法。传统解析法^[5]一般采用电磁场解析方法求解损耗, 进而运用热平衡以及传热学解析公式求解母线温度。虽然物理概念清晰, 但是不能综合考虑辐射散热、重力加速度、集肤效应、涡流分布、自然对流换热等因素的影响, 因此难以准确计算 GIS 母线受外界温度和内部负荷电流共同影响下的温度场分布。早期文献^[6]采用实验测取法研究了 GIS 母线的散热能力和温度场分布特性, 但在广泛应用方面存在一定困难。为克服解析法的局限性, 近期研究多围绕有限元分析法展开。文献^[7-11]将有限元的方法分别应用于单相、三相 GIS 的损耗发热的电磁场与流场求解, 侧重分析了内部损耗和温度场的分布规律。文献^[12]考虑了太阳辐射、环境温度、风速、负荷电流对 GIS 母线筒内的温度场分布情况的影响。但涉及封闭母线内部结构优化设计的研究并不多见, 文献^[13,14]分别采用有限差分法和有限元法, 针对圆环状、八边形、开缝圆环以及开缝八边形等不同的

收稿日期: 2019-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51737005)、国家高技术发展研究计划 (863 计划) 项目 (2011AA05A121)

作者简介: 陈世萍 (1997-), 女, 福建籍, 博士研究生, 研究方向为电力设备电磁场、温度场数值计算;

丛浩熹 (1989-), 男, 山东籍, 副教授, 硕导, 博士, 研究方向为高压开关状态监测与故障诊断。

内部导体结构设计方案,探讨了导体结构对 GIS 母线损耗发热的影响。文献[15]基于仿真结果分析,优化设计了新型导体结构。但在综合考虑辐射散热、气体对流、涡流损耗以及重力加速度等因素的基础上,运用电磁-热流耦合计算方法,分析不同内部屏蔽罩结构设计对 GIS 母线损耗发热影响的文献,尚很少见于公开发表。

本文在综合考虑上述因素影响的基础上,以实际单相 GIS 隔离开关为原型,分别针对不同的内部屏蔽罩结构设计方案,建立二维有限元仿真模型,获得了 GIS 内部温度场分布特性。在考虑避免电场畸变造成局部放电的影响下,探讨了不同内部屏蔽罩结构设计方案对 GIS 内部损耗发热的影响,并基于上述结果,提出基于屏蔽罩开孔的 GIS 散热优化设计方案,可为 GIS 隔离开关结构散热设计提供一定的参考价值。

2 单相 GIS 隔离开关电磁-热流耦合模型

2.1 单相 GIS 隔离开关物理模型

以实际单相 GIS 隔离开关为算例,建立了二维温度场仿真模型,如图 1 所示,其基本结构与工况参数见表 1。

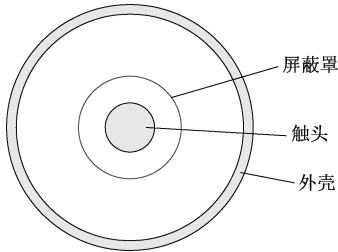


图 1 隔离开关结构示意图

Fig.1 Structure diagram of disconnecting switch

表 1 单相 GIS 隔离开关主要尺寸参数

Tab.1 Main parameters of single-phase GIS disconnecting switch

参数	数值	参数	数值
屏蔽罩外径/mm	109	外壳内径/mm	248
屏蔽罩内径/mm	105	外壳外径/mm	260
触头外径/mm	43	导体电流/A	2000
放置方式	水平	环境温度/℃	25

GIS 设备的温度分布受到金属屏蔽罩的厚度、形状、半径等因素的影响。由于屏蔽罩的厚度受限于加工工艺,其半径受绝缘的限制,因此不探究对屏蔽罩厚度、半径的优化设计。考虑在电场没有

明显畸变的前提下,对屏蔽罩开孔,通过减小热源和增大气体对流散热来降低温升,改善内部温度分布。选定以下 4 种内部屏蔽罩结构设计方案进行研究,具体见表 2,其中方案一为实际单相 GIS 隔离开关。四种 GIS 横截面如图 2 所示。

表 2 四种内部屏蔽罩结构设计方案

Tab.2 Four structure design schemes of the screening can

方案	内部屏蔽罩结构设计方案
方案一	圆环,实际结构
方案二	开孔圆环,开 2 个 10°的孔
方案三	开孔圆环,开 6 个 10°的孔
方案四	开孔圆环,开 8 个 10°的孔

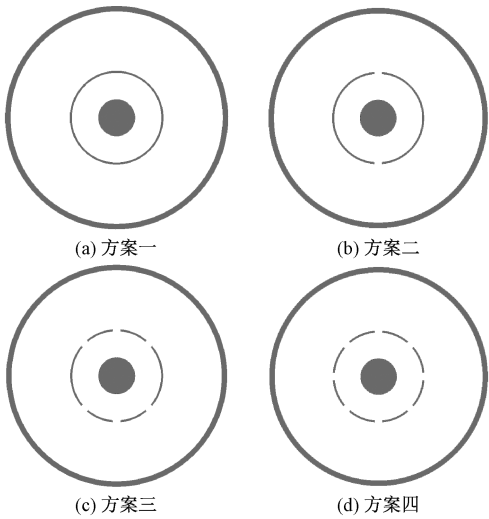


图 2 GIS 横截面示意图

Fig.2 Cross section of GIS bus bar

为了便于建模计算,对上述物理模型作以下简化:①当外界环境因素和导体电流不变时,GIS 内部热量传递处于稳态过程;②由于 GIS 导体产生的热量主要通过外壳散失,因此忽略气体的轴向流动;③触头和导体接触良好,忽略接触电阻的影响;④对于距离外壳较远处的空气,认为其不受热源影响,GIS 外壳对空气的热对流系数为恒定值。

2.2 电磁场计算模型

GIS 内部热源主要包括负荷电流在导体上产生的焦耳热,导体、屏蔽罩、外壳感应出的涡流损耗。在 GIS 整个求解区域的电磁场控制方程如下:

导体内:

$$\nabla \times (\mu_e^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla \cdot (\mu_e^{-1} \nabla \cdot \mathbf{A}) = \mathbf{J}_s \quad (1)$$

屏蔽罩内:

$$j\omega\sigma_e\mathbf{A} + \nabla \times (\mu_e^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla \cdot (\mu_e^{-1} \nabla \cdot \mathbf{A}) + \sigma_e \nabla \phi = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (-J_s \omega \sigma_e \mathbf{A} - \sigma_e \nabla \phi) = 0 \quad (3)$$

外壳内:

$$\begin{aligned} j\omega \sigma_e \mathbf{A} + \nabla \times (\mu_e^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) - \\ \nabla \cdot (\mu_e^{-1} \nabla \cdot \mathbf{A}) + \sigma_e \nabla \phi = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (-J_s \omega \sigma_e \mathbf{A} - \sigma_e \nabla \phi) = 0 \quad (5)$$

总电流密度:

$$J_t = J_s + J_e \quad (6)$$

$$J_e = -j\omega \sigma_e \mathbf{A} \quad (7)$$

式中, \mathbf{A} 为矢量磁位; ϕ 为标量电位; J_s 为源电流密度; J_t 为总电流密度; J_e 为磁场变化在导电区域中感应出来的电流密度; σ_e 为导电区域的电导率; ω 为角频率; μ_e 为媒质的磁导率。

在离外壳较远处设置远端边界条件 $\mathbf{A} = 0$ 。导体域输入总电流有效值 I , 输入电流 I 与导体总电流密度的关系为:

$$I = \iint_S J_t dx dy \quad (8)$$

导体区域内的损耗为:

$$Q_e = \frac{1}{2} \int_S \frac{J_t^2}{\sigma} dS \quad (9)$$

由此可求得涡流场中导体、屏蔽罩、外壳的电能损耗, 作为温度场计算的热源。

2.3 稳态流场-温度场计算模型

流场-温度场的热量散失主要包括导体、屏蔽罩、外壳固体传热, GIS 筒内 SF_6 气体在稳态自然对流下气体传热以及外壳与外部空气对流下的散热。本模型采用如下控制方程和边界条件^[16]。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

动量守恒方程:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (11)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (12)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \quad (13)$$

固体导热微分方程:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0 \quad (14)$$

式中, u 、 v 分别为气体沿 x 和 y 方向的速度分量; λ

为气体的热导率; ρ 为气体的密度大小; c_p 为气体的比热容; t 为气体的温度; F_x 、 F_y 分别为体积力在 x 和 y 方向的分量; p 为气体压力大小; η 为气体运动粘性系数。

模型求解的边界条件为:

$$t(x, y) |_{x^2+y^2=\infty} = t_\infty, u(x, y) |_{x^2+y^2=\infty} = 0$$

$$v(x, y) |_{x^2+y^2=\infty} = 0, p(x, y) |_{x^2+y^2=\infty} = 0$$

$$t(x, y) |_{x^2+y^2=r_{s0}^2} = t_{s0}, u(x, y) |_{x^2+y^2=r_{s0}^2} = 0$$

$$v(x, y) |_{x^2+y^2=r_{s0}^2} = 0, p(x, y) |_{x^2+y^2=r_{s0}^2} = 0$$

式中, t_{s0} 为屏蔽罩外表面温度; t_∞ 为外界环境温度; γ_{s0} 表示径向距离为屏蔽罩外径长度, 即屏蔽罩外表面处。

结合定解条件, 可对式(10)~式(14)的微分方程组进行求解。本文利用仿真软件 ANSYS Workbench 进行仿真计算, 利用有限元法将微分方程离散化后, 多次迭代计算直至收敛, 最后得到温度场分布情况。

2.4 计算精度验证

为验证 GIS 温度场计算结果的准确性, 以常规圆环状屏蔽罩设计方案为例, 进行了温度测量, 结果见表 3。表 3 中对比列出在不同的运行工况和环境温度下, 外壳顶部和底部的计算值和测量值。通过实验结果证实本文计算结果与测量值在误差允许的范围范围内相吻合, 且具有较高的准确度。

表 3 实验数据和仿真结果对比

Tab.3 Comparison of simulation results and test samples

负荷 电流 /kA	环境 温度 /℃	外壳顶部			外壳底部		
		实测 值/℃	仿真 值/℃	相对 误差 (%)	实测 值/℃	仿真 值/℃	相对 误差 (%)
1.5	27.7	34.4	33.4	2.90	33.6	32.9	2.08
2.0	28.0	36.0	36.6	1.61	34.9	35.7	2.29
2.5	27.9	37.2	38.2	2.69	35.8	36.7	2.51

3 基于屏蔽罩开孔的温度场与电场分布规律

3.1 内部损耗与温度场计算分析

在 Maxwell 2D 模块中计算导体的电磁场并求出导体损耗和涡流损耗^[17,18]。网格划分的合理性直接影响到整个分析过程及结果的精确度和正确性。在内部导体、屏蔽罩以及外壳中, 电流和损耗的分布规律都体现出明显的集肤效应, 应对固体的表层进行更细致的划分。因此, 网格划分中, 设置集肤深度, 针对金属表层进行更细致的划分。图 3 为有限元剖分图。

将单相导体损耗和涡流损耗作为热源耦合到有限元软件 Fluent(流场)中^[19-23]。考虑热辐射时, 设

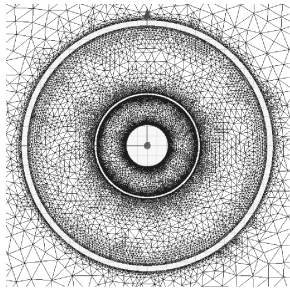


图 3 隔离开关有限元剖分图

Fig.3 Mesh renderings of disconnecting switch

置 S2S(Surface to Surface) 辐射散热模型,来模拟封闭体内辐射传输。按如下数据设置仿真参数:外壳外表面对流换热系数为 $7.6\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 气体重力加速度取 $g=9.806\text{m}/\text{s}^2$, 外界环境温度为 25°C , 设置迭代次数不超过 500, 由于本模型内部 SF_6 自然对流和外部空气对流均未达到湍流临界, 因此气体流动设置为层流。根据上述单相 GIS 有限元仿真模型, 得到 GIS 内筒温度和气流分布, 如图 4 和图 5 所示。损耗发热结果见表 4。

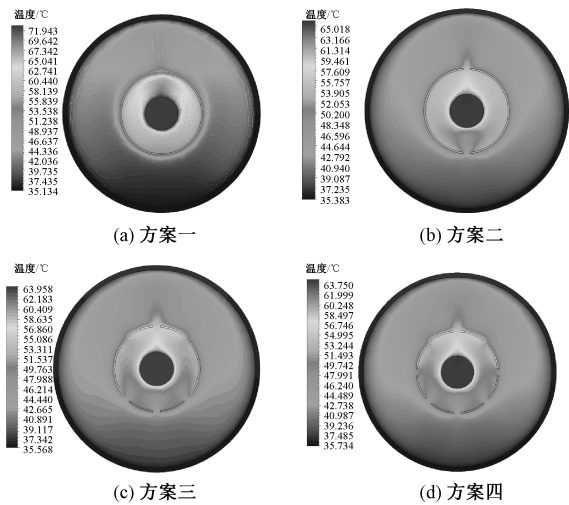


图 4 GIS 内部温度分布云图

Fig.4 Distribution of temperature

表 4 GIS 隔离开关损耗发热计算结果

Tab.4 Ohmic loss and temperature of single-phase

GIS disconnecting switch

方案	导体 损耗 /(W/m)	屏蔽罩 损耗 /(W/m)	外壳 损耗 /(W/m)	导体 最高 温度/ $^\circ\text{C}$	温降 百分比 (%)
方案一	33.34	47.32	3.50	74.88	0
方案二	33.34	47.78	3.74	65.75	12.19
方案三	33.34	48.54	4.31	64.72	13.57
方案四	33.34	48.83	4.64	64.58	13.76

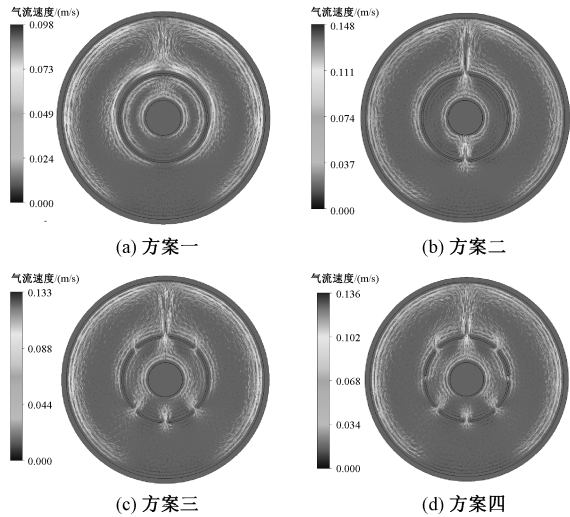


图 5 GIS 气流速度矢量分布云图

Fig.5 Distribution of velocity vectors

由图 4、图 5 可见, 对于平放的 GIS 内部, 在相同半径处, 顶部温度高, 底部温度低。这是由于气体受热上浮至上端外壳内表面, 然后分为左右两股, 沿着内壁下降, 形成环流。 SF_6 气体在重力的作用下, 底部流速慢, 使内部温度场呈现上高下低的状态。其尺寸、结构、电流焦耳热以及涡流损耗均左右对称。由于筒内 SF_6 气体回流流动较强烈, 使温度呈现弯曲的 S 型分布, 出现离开热表面越远温度反而升高的现象。

由表 4 可见, 由于对屏蔽罩开孔使 GIS 内筒的磁场增大, 而涡流损耗与磁感应强度正相关, 因此对屏蔽罩开孔并没有减小热源。从温降百分比可见, 内部屏蔽罩开孔对减小导体温升效果显著, 其主要原因是: 当屏蔽罩封闭时, 气体流动主要在屏蔽罩外壁与外壳内壁之间进行, 导体难以靠气体流动散热; 对屏蔽罩开孔后, 内部气体能够穿过缝隙, 掠过导体外壁, 加快气体自然对流散热, 显著改善导体的散热效果。此外, 开孔相当于增大了辐射散热的有效面积, 进一步促进了导体热量的耗散。

3.2 内部电场计算分析

对屏蔽罩进行结构优化时, 需考虑其对电场分布的影响。屏蔽罩的主要作用是均压, 避免局部放电引发故障。因此, 下面在 Maxwell 2D 模块中对额定运行状态下 GIS 四种屏蔽罩结构的内部电场进行仿真分析。实际单相 GIS 隔离开关原型的额定电压为 126kV 。因此设置 GIS 导体接 126kV , 外壳接地为 0。GIS 内筒电场强度及其矢量如图 6 所示。

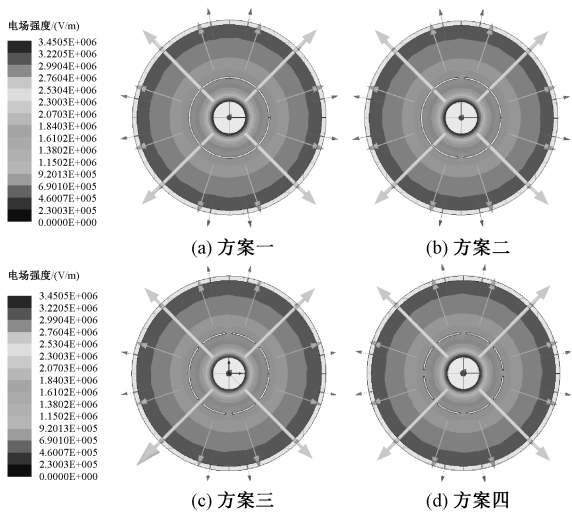


图 6 GIS 内筒电场分布云图
Fig.6 Distribution of electrical field of GIS

根据仿真结果得到四个方案在额定运行状态下最大场强依次为 34.51kV/cm、34.50kV/cm、34.49kV/cm 和 34.40kV/cm,可见屏蔽罩优化结构的 GIS 内部最大场强低于实际圆环形屏蔽罩,也低于工程击穿场强值。为了进一步观察电场分布是否有毛刺,求得四种方案沿 y 轴径向的电场分布曲线图,如图 7 所示,图 7 中横坐标为离圆心的径向距离。

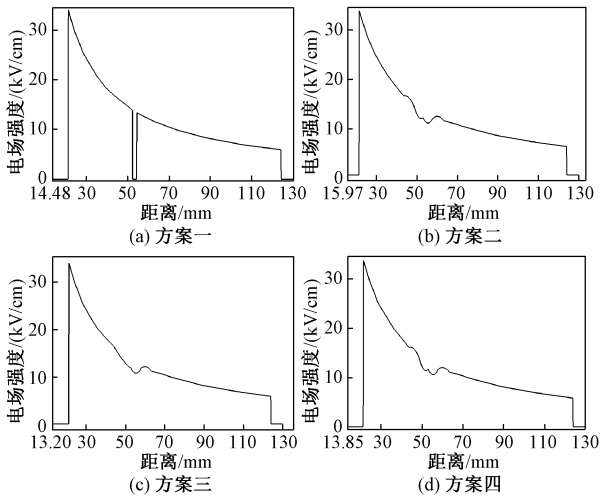


图 7 GIS 内筒电场强度径向分布曲线
Fig.7 Electrical field intensity curvilinear figure of GIS along radial direction

从图 7 可以看出,GIS 内筒电场强度沿径向递减,屏蔽罩开孔只造成屏蔽罩周围的场强小幅上升或下降,并未对电场造成太大畸变,从理论上验证了该优化设计方法的可行性。

3.3 基于对称开孔结构的屏蔽罩开孔角度设计

根据原设计的开孔位置和个数,综合考虑散热效果和对称结构,优先选择方案四——开孔圆环,开 8 个 10°的孔,并对其进行进一步角度优化。不同开孔角度下,GIS 隔离开关损耗发热和屏蔽罩表面电场计算结果见表 5。从表 5 可以看出,随着开孔角度的增加,导体最高温度逐渐下降。当开孔角度超过 5°时,再增加开孔尺寸,导体温度下降已不太明显。且屏蔽罩表面的电场最大值也增大,影响屏蔽罩的均压效果。因此在散热效果差别不大的情况下,优先选择屏蔽罩开孔角度为 5°。

表 5 GIS 隔离开关损耗发热和屏蔽罩表面电场计算结果

Tab.5 Ohmic loss and temperature of single-phase GIS disconnecting switch and electric field of shield surface

开孔 角度 /(°)	导体 损耗 /(W/m)	屏蔽罩 损耗 /(W/m)	外壳 损耗 /(W/m)	导体 最高 温度 /℃	温降 百分比 (%)	表面 电场强度 最大值 /(kV/cm)	畸变率 /(kV/cm ²)
0	33.34	47.32	3.5	74.88	0	13.69	4.8
2	33.34	47.85	3.70	70.94	5.02	14.38	302.8
5	33.34	48.44	4.03	66.63	11.02	14.23	224.9
8	33.34	48.77	4.39	65.12	13.03	14.93	220.9
10	33.34	48.83	4.64	64.58	13.76	14.58	235.4
12	33.34	48.75	4.92	64.28	14.16	15.32	229.1

4 结论

(1)四种内部屏蔽罩结构中,对于平放的 GIS 隔离开关,在相同半径处,顶部温度高,底部温度低。其主要原因是 SF₆ 气体在重力加速度的作用下,底部流动速度慢,使单导体 GIS 内部温度场呈现上高下低的状态。温度场呈现左右对称分布的特点是由于该型号的几何尺寸、结构和电流焦耳热、涡流损耗均左右对称。由于 GIS 筒内 SF₆ 气体对流散热较强烈,内筒的温度呈现弯曲的 S 状分布。

(2)内部屏蔽罩的涡流损耗是最主要的热源之一。屏蔽罩开孔并不能减小热源,但对加快气体自然对流散热、减小内部导体温升具有显著的效果。采用对称结构对屏蔽罩开缝,GIS 内部最大场强低于实际圆环形屏蔽罩,也低于工程击穿场强值,不会引起电场畸变而造成局部放电故障。在综合考虑散热效果和电场畸变程度下,提出一种基于对称开孔的屏蔽罩结构优化设计方案,即在屏蔽罩上以对称形式开 8 个 5°的孔。

本文采用电磁-热流多物理场耦合的方法,综合

考虑封闭气体空间中的自然对流换热、热辐射、集肤效应以及 GIS 内部 SF_6 气体的重力加速度,建立了单相 GIS 二维电磁场的计算模型和电磁-热流耦合的有限元仿真模型。计算结果与测量值较为吻合,从而能够有效准确地计算出单相 GIS 设备受导体电流和外界环境温度共同影响下温度场分布,进而能够较好地预测和分析不同的结构设计方案对 GIS 损耗发热的影响,可为 GIS 温度场分布规律及其温度监测提供一定参考价值。

参考文献 (References):

- [1] Bolin P H K. Gas insulated switchgear GIS-State of the art [A]. IEEE Power Engineering Society General Meeting [C]. Tampa, FL, USA, 2007. 1-3.
- [2] 杜凤青, 盛戈皞, 徐剑, 等 (Du Fengqing, Sheng Gehao, Xu Jian, et al.). 基于 IEC61850 的 GIS 智能监测信息建模及信息交互系统设计 (Information modeling for GIS smart monitoring based on IEC61850 and development of information interaction system) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2013, 33 (6): 163-167.
- [3] Yao Liangzhong, Li Naihu, Kou Hao, et al. Reliability tests of a wireless system of monitoring and controlling for high voltage switch cabinets [A]. 2010 International Conference on Power System Technology [C]. Hangzhou, China, 2010. 1-5.
- [4] 魏翔 (Wei Xiang). 气体绝缘金属封闭开关柜在线测温系统设计 (Design of online temperature measuring system for gas-insulated metal-closed switchgear) [J]. 电工电气 (Electrotechnics Electric), 2010, (1): 51-54.
- [5] Coneybeer R T, Black W Z, Bush R A. Steady-state and transient ampacity of bus bar [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9 (4): 1822-1829.
- [6] Koshi Itaka, Tomoo Araki, Takushi Hara. Heat transfer characteristics of spacer cables [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus, 1978, 97 (5): 1579-1585.
- [7] 范镇南, 张德威, 陈显坡, 等 (Fan Zhennan, Zhang Dewei, Chen Xianpo, et al.). GIS 母线损耗发热状况的电磁场与流场计算分析 (Calculation of electromagnetic field and flow field in GIS bus loss heat generation) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2009, 29 (S1): 241-244.
- [8] Kim J K, Lee J Y, Wee S B, et al. A novel coupled magneto-thermal-flow analysis for temperature rise prediction of power apparatus [A]. The International Conference on Electrical Machines and Systems [C]. Wuhan, China, 2008. 585-588.
- [9] Ho S L, Li Y, Edward W, et al. Analyses of three-dimensional eddy current field and thermal problems in an isolated phase bus [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39 (3): 1515-1518.
- [10] Yoon J H, Ahn H S, Choi J, et al. An estimation technology of temperature rise in GIS bus bar using three-dimensional coupled-field multiphysics [A]. International Symposium on Electrical Insulation [C]. Vancouver, BC, Canada, 2008. 432-436.
- [11] 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.
- [12] 陈强, 李庆民, 丛浩熹, 等 (Chen Qiang, Li Qingmin, Cong Haoxi, et al.). 引入多重边界条件的 GIS 母线温度分布多场耦合计算及影响因素分析 (Multi-field coupling calculation and influence factors analysis of GIS bus bar temperature distribution with multiple boundary conditions) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (17): 187-195.
- [13] 杨沫, 陶文铨, 陈中颀 (Yang Mo, Tao Wenquan, Chen Zhongqi). 开缝八边形密封母线自然对流的数值计算 (Numerical prediction of natural convection heat transfer between cylindrical envelope and internal concentric slotted octagonal cylinder) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1991, 11 (4): 58-64.
- [14] 范镇南, 罗永刚, 赵斌, 等 (Fan Zhennan, Luo Yonggang, Zhao Bin, et al.). 内部导体结构对 GIS 母线损耗发热的影响 (Influence of internal conductor structure on GIS bus loss heat generation) [J]. 电机与控制学报 (Journal of Electric Machinery and Control), 2011, 15 (5): 22-27.
- [15] Rebzani N, Marty P, Clavel E. Influence of the conductor design on the temperature field in a high voltage gas insulated switchgear [A]. International Symposium on Circuits and Systems [C]. Melbourne, Australia, 2014. 1175-1178.
- [16] 张兆顺, 崔桂香 (Zhang Zhaoshun, Cui Guixiang). 流体力学 (Fluid mechanics) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 2006.
- [17] CAE应用联盟, 刘成柱, 等 (CAE Application Alliance, Liu Chengzhu, et al.). ANSYS Workbench17.0 热力学分析实例演练 (ANSYS workbench 17.0 thermodynamic analysis example exercise) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2017.
- [18] 黄志新, 刘成柱 (Huang Zhixin, Liu Chengzhu). AN-

- SYS Workbench14.0 超级学习手册 (ANSYS Workbench14.0 super learning manual) [M]. 北京: 人民邮电出版社 (Beijing: People's Posts and Telecommunications Press), 2013.
- [19] 陈荆洲, 杜志叶, 王栋, 等 (Chen Jingzhou, Du Zhiye, Wang Dong, et al.). 高压开关柜温度场数值分析 (Numerical analysis of temperature field of high voltage switchgear) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (1): 38-44.
- [20] 鲍晓华, 方勇, 程晓巍, 等 (Bao Xiaohua, Fang Yong, Cheng Xiaowei, et al.). 基于三维有限元的大型充水式潜水电机端部涡流损耗 (3-D finite element method analysis of eddy current losses in the end region of large water filling submersible motor) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (7): 84-89.
- [21] 彭诗怡, 阮江军, 杜志业, 等 (Peng Shiyi, Ruan Jiangjun, Du Zhiye, et al.). 不同散热条件对开关柜母线室温度分布影响 (Influence of different heat dissipation conditions on temperature distribution in busbar room of switchgear) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (8): 48-57.
- [22] 刘慧娟, 张竞雄, 陈艺端, 等 (Liu Huijuan, Zhang Jingxiong, Chen Yiduan, et al.). 二维涡流磁场等效电路的矩阵分析方法 (Matrix analysis method of equivalent circuit in 2D eddy current magnetic field) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (6): 73-80.
- [23] 张艳辉, 吴新振, 郑晓钦, 等 (Zhang Yanhui, Wu Xinzhen, Zheng Xiaoqin, et al.). 十二相整流发电机系统二极管故障时场路耦合仿真分析 (Field-circuit coupling simulation analysis of diode fault of 12-phase rectifier generators system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (4): 71-78.

Heat dissipation optimization design for temperature field of GIS disconnecting switch based on shield opening

CHEN Shi-ping, CONG Hao-xi, LI Qing-min

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The overheating phenomenon of GIS contacts may cause major accidents. Therefore, it is important to study on the optimization of internal temperature field heat dissipation for the design and operation of GIS equipment. Taking the actual single-phase GIS disconnecting switch as an example, the two-dimensional electromagnetic heat flow coupled field simulation model was established by finite element analysis. On the basis of comprehensive consideration of factors such as radiative heat dissipation, gas convection, eddy current loss and gravity acceleration, the distribution characteristics of internal temperature field of GIS were analyzed for different shield structure design schemes. The research results indicate that, for the flat GIS equipment, the top temperature is higher than the bottom temperature at the same radius, and the characteristics are symmetrically distributed. As the convection heat dissipation of the SF₆ gas in the cylinder is strong, the internal SF₆ gas exhibits a curved S-shaped distribution. The opening of shield cannot reduce the heat source, but it has a significant effect on accelerating the natural convection heat dissipation of the gas and reducing the temperature rise of the inner conductor. By using a symmetrical structure to open the shield, the maximum electric field strength inside the GIS is lower than that of the actual circular shield and the engineering breakdown electric field strength, and will not cause electric field distortion as well as partial discharge failure. Finally, considering the heat dissipation effect and the degree of electric field distortion, a heat dissipation optimization design scheme based on symmetric opening structure was proposed, which can provide some reference value for heat dissipation optimization design and temperature monitoring of GIS equipment.

Key words: GIS; multi-field coupling; temperature field; shield opening; finite element method