

基于场路耦合的±200 kV 换流站 GIS 外壳环流及温升分析

茅鑫同¹, 吴巍¹, 陈松涛², 张献蒙², 赵会龙¹, 吴乐洋³, 刘方涵³, 董天宇³

(1. 国网江苏省电力有限公司建设分公司, 南京 210003; 2. 国网江苏省电力有限公司, 南京 210003; 3. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 高压气体绝缘开关设备 (GIS) 在运行时易产生外壳环流, 这会致使设备过热并加速绝缘材料老化。环流还可能干扰测量和保护装置, 从而降低系统的供电可靠性。文中针对某±200 kV 换流站的 GIS, 研究其结构, 深入分析感应电压产生和环流形成的机理; 提出面向 GIS 设备外壳环流分析的场-路耦合模型, 以及 GIS 相间汇流排电磁-流-热多物理场耦合模型; 通过分析 GIS 外壳的感应电压产生机理以及环流路径, 研究 GIS 在不同运行工况、不同接触电阻条件下的外壳环流分布和汇流排温度分布规律; 通过与现场试验结果的比较, 验证了建立模型的精确度和可靠性。研究表明, 增加汇流排和接地的数量, 能有效降低外壳感应电压和环流, 从而缓解设备发热。本研究对实际工程中降低外壳环流、缓解设备发热、合理选择接地点的数量及位置具有一定指导意义, 为 GIS 的设计和运行提供理论依据, 以提高高压直流输电系统的安全稳定性。

关键词: 多物理场耦合; 直流输电; GIS; 环流分析; 感应电压; 设备温升; 温度场仿真; 有限元分析

Analysis of Loop Current and Temperature Rise of GIS Shell of ±200 kV converter Station Based on Field-circuit Coupling

MAO Xintong¹, WU Wei¹, CHEN Songtao², ZHANG Xianmeng², ZHAO Huilong¹, WU Leyang³, LIU Fanghan³, DONG Tianyu³

(1. Construction Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210003, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210003, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Gas Insulated Switchgear (GIS) is essential in high-voltage power transmission, but it can generate circulating currents that cause equipment heating. This heating can accelerate insulation aging and damage critical measurement and protection devices, posing a risk to power grid integrity. A study focused on GIS at a ±200 kV converter station has provided insights into these issues. The research introduced the GIS structure and analyzed the generation of shell-induced voltage and circulating currents. It developed field-path coupling and multiphysics field coupling models to understand the principles of electromagnetic and electrostatic induction, tracing the paths of circulating currents under various operating conditions and contact resistances. The study's conclusions are significant. The models' accuracy and reliability were verified against field test results. It was found that increasing busbars and grounding points can reduce induced voltage and circulating current, thereby reducing equipment heating. This finding provides practical guidance for grounding point selection in future projects and offers a theoretical basis for GIS design and operation. It enhances the safety and stability of high-voltage direct current (HVDC) transmission systems, contributing to the advancement of power transmission technology for more reliable and efficient energy distribution.

Key words: multi-physical field coupling; DC transmission; GIS; loop current analysis; induced voltage; equipment temperature rise; temperature field simulation; finite element analysis

0 引言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)采用全封闭结构设计, 内部充满六氟化硫(Sulfur Hexafluoride, SF₆)气体, 该设备集成了断路器、隔离开关等多种高压组件, 确保电力系统的稳定运行。

GIS 以结构紧凑, 占地面积小, 适应性强, 同时具备高可靠性和维护方便的优点, 在现代电力系统中广泛应用^[1-3]。

在 GIS 设备在运行过程中, 其金属外壳会因电磁感应产生感应电压, 并通过汇流排与接地网形成环流, 环流产生的损耗会引起设备温度升高, 加速绝缘

基金项目: 陕西省重点研发计划资助项目(2024GX-YBXM-236); 国网江苏省电力有限公司建设分公司科技项目(SGJSJSOXMJS2310133)。

Project Supported by Key Research and Development Program of Shaanxi(2024GX-YBXM-236), Science and Technology Project of Construction Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.(SGJSJSOXMJS2310133).

材料的老化,甚至引发事故^[4-6]。外壳环流在极端情况下可能诱发闪络放电,导致设备损坏,影响电能质量和供电可靠性,由此产生的过电压侵入电力系统、通讯系统和保护电路。此外,外壳环流会加剧设备振动,影响其周围的电磁环境,干扰智能传感器的监测,这些都是 GIS 变电站智能化改造所面临的挑战^[7]。在实际运行过程中,环流的幅值可能达到导电杆电流的 70%至 80%,若在故障情况下,这种负面影响会进一步扩大。因此,深入研究 GIS 外壳环流的产生机理及其影响因素,以及由环流引起的构件异常温升,对于提高 GIS 设备的运行安全性和可靠性,推动电力系统的智能化发展具有重大意义^[8]。

近年来,国内外对 GIS 外壳环流及构件温升的研究日益增多。文[9]提出一种 GIS 环流路径等效电路模型,并对壳体和接地回路进行仿真计算,研究结果显示,影响环流幅值的主要因素包括间距、外壳半径以及接地点之间的距离。文[10]根据电磁场理论,依据空心电流互感器的原理解释环流现象并建立等效模型。研究发现,进线和出线端的汇流排上的环流值相对较大,在发生故障时,故障点附近的电流值也会显著增加。然而,等效电路模型不能反映 GIS 外壳结构特点,外壳环流是由空间电磁感应产生的,仅采用基于等效电路的分析方法不能保证模型的准确性。文[11]探究了电磁力和磁致伸缩效应对 GIS 设备振动的影响,发现运行中的 GIS 振动频率约为 100 Hz。文[12]构建了 GIS 的多物理场模型,综合考虑了导杆电流、接触缝隙和螺栓材料等因素的影响,探究三相和单相母线在不同条件下的最大允许电流,研究表明接触缝隙的大小对 GIS 温度分布具有显著影响。然而,上述基于物理场模型的分析方法无法考虑接地系统及连

接件对环流的影响,因此存在较大的计算误差。

目前, GIS 外壳感应电压和环流的研究主要采用等效电路和局部场模型,并利用经验公式计算元件参数,仿真模型的准确性仍有待提高;此外, GIS 外壳的换流特性分析多基于单物理场,缺少对设备结构参数、汇流排和接地拓扑、电阻温度系数、气体对流散热和环境温度等影响因素的综合分析,壳体环流研究仍有待完善。针对这些问题,文中以 ± 200 kV 换流站 GIS 为研究对象,提出面向 GIS 设备外壳环流分析的场—路耦合模型,以及 GIS 相间汇流排电磁—流—热多物理场耦合模型。通过分析 GIS 外壳的电磁感应和静电感应原理以及环流路径,研究 GIS 在不同运行工况、不同接触电阻条件下的外壳环流分布和汇流排温度分布规律。与实际测量结果比较,证明了所建模型的精确度与可靠性。本项研究对实际工程中降低外壳环流、缓解设备发热、合理选择接地点的数量及位置具有一定指导意义,为 GIS 的设计和运行提供理论依据,以提高高压直流输电系统的安全稳定性。

1 GIS 外壳环流产生机理与理论分析

1.1 GIS 外壳环流产生机理

由于 GIS 外壳和母线同轴配置,形成了类似互感线圈的结构,导电杆中的电流变化会在外壳中感应产生电压,类似于单匝电流互感器的工作原理,一次侧电流的变化会在二次侧即外壳中感应出相应的电压^[13]。感应电压会在 GIS 外壳和接地系统构成的闭合回路中驱动产生环流。

三相分箱 GIS 等效电路见图 1。图 1 中 I_A 、 I_B 、 I_C 为线路电流; R_a 、 R_b 、 R_c 分别为三相外壳电阻; M_a 、 M_b 、 M_c 为三相导电杆与外壳之间的互感;

L_a 、 L_b 、 L_c 为三相外壳电感； R_{djdp} 和 L_{djdp} 为短接排电阻和电感； R_{jdp} 和 L_{jdp} 为接地排电阻和电感； R_d 为接地电阻。在高压直流输电系统中，GIS 导电杆中的电流变化会在外壳中产生感应电压，进而在闭合路径中产生感应电流^[14]，而外壳的连接与接地方式决定了环流的分布。

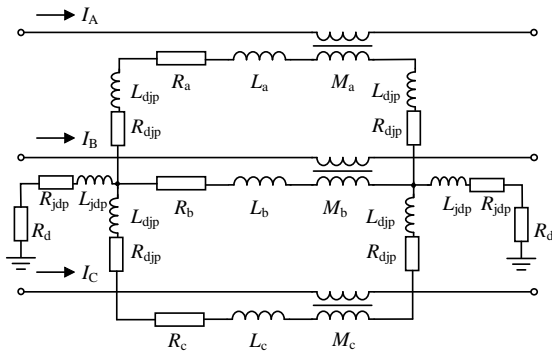


图 1 三相分箱 GIS 外壳等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of three-phase split-box GIS enclosure

1.2 GIS 外壳环流路径

GIS 设备的不同结构设计导致壳体环流的路径存在一定的差异性。壳体环流路径一般可分为两大类，第一类环流为相—地间环流，此类环流主要出现在三相共箱式 GIS 结构中，见图 2，该结构的母线外壳与接地网相连，并通过支架、接地排等构件形成闭合通路。第二种路径则常见于高电压等级的 GIS，这些设备通常采用三相分箱式结构。在设计阶段，为实现三相 GIS 外壳间的电气连接，会在外壳的非连接区域两侧安装相间汇流排。当 GIS 设备处于带电运行状态时，GIS 壳体与汇流排之间将形成环流^[15]见图 3。

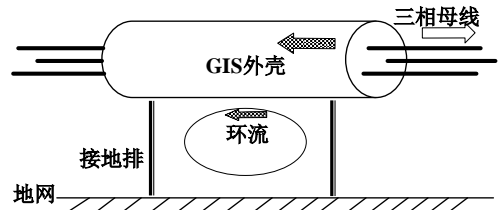


图 2 三相共箱式 GIS 模型与外壳环流示意图

Fig. 2 Three-phase co-boxed GIS model with enclosure circulation schematic

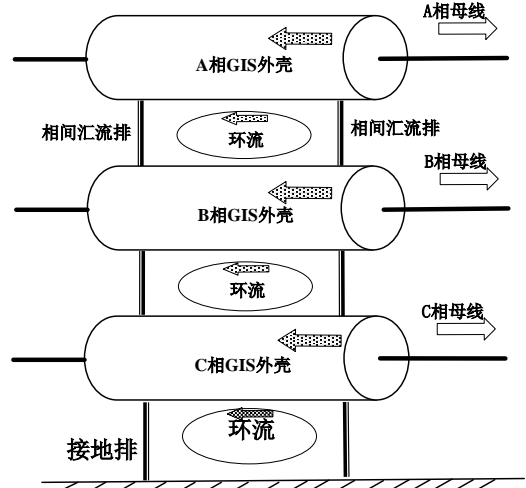


图 3 三相分箱式 GIS 模型与外壳环流示意图

Fig. 3 Three-phase split-box GIS model with enclosure circulation schematic

在稳定运行条件下，外壳环流的分布呈现 U 型曲线的特征，见图 4。具体来说，GIS 首端和尾端套管根部的环流幅值较大，而中间壳体部分的环流幅值相对较小。现有研究表明，相间汇流排的存在对于降低接地排的入地电流至关重要。在隔离开关操作过程中，GIS 出线端部附近的相间导流排和接地排的电流会达到峰值，若 GIS 仅设置接地排而缺少相间汇流排，接地排将会承载极大的入地电流，这将对检修维护人员及二次设备的安全造成严重威胁。

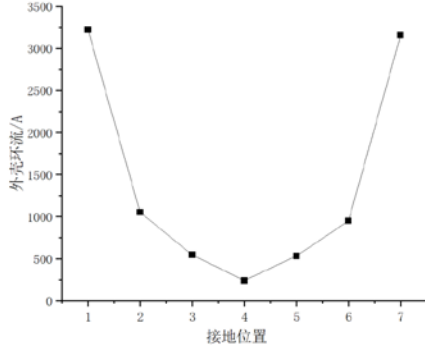


图4 不同接地位置下外壳环流值

Fig. 4 Enclosure circulating current values at different grounding positions

2 GIS 仿真模型

2.1 外壳场—路耦合仿真模型

本研究以 200 kV 换流站换流变间隔的 GIS 为研究对象, 该间隔实际通流为 3 400 A。母线和进出线套管采用三相分箱式结构, 内部填充 SF₆ 气体以提供绝缘, 并在关键部位配置了相间短接排和接地排, 其中结构参数见表 1。文中研究旨在分析该结构下环流的分布特性。

表 1 GIS 结构参数表

Table 1 List of GIS structural parameters

参数	数值/mm
母线壳体外径	291
母线壳体厚度	6
导杆外径	120
导杆厚度	15
母线间距	600

GIS 外壳环流由导杆中的电流产生的磁场感应产生, 为探究外壳环流的影响因素, 文中采用 Comsol 和 Simulink 联合搭建 GIS 外壳的场—路耦合模型进行分析。通过 Comsol 中的“磁场”接口计算 GIS 外壳内部的磁场分布以及由此产生的感应电流, 利用 Simulink 中的“电路”接口构建汇流排和其他相关元件的等效电路模型见图 5。联合“磁场”接口和“电路”接口进行分析^[16], 得到 GIS 环

流分布与外壳感应电压的数值。

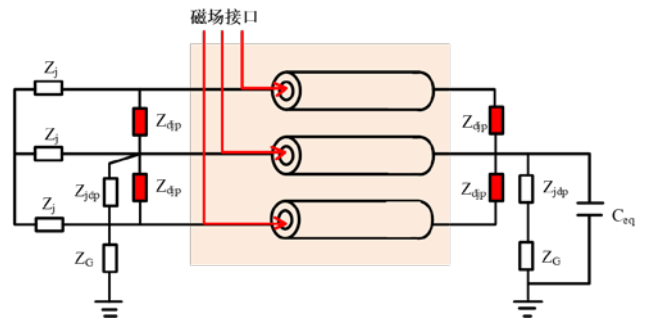


图 5 GIS 外壳的场—路耦合模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the field-road coupling model of the GIS shell

交流电流流经 GIS 导电杆时, 外壳将产生涡流, 由电磁感应产生的涡流与导体中的电流共同导致功率损耗。在理论计算和模拟分析过程中, 为了简化模型, 通常不考虑空间电荷和位移电流的影响。此外, 本研究中假设导电杆和外壳的相对磁导率保持恒定, 电导率依赖于温度变化。基于上述假设, 依据 Maxwell 方程组对求解域进行频域电磁场分析, 控制方程为

$$\mathbf{J}_z = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial^2 \mathbf{A}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}_z}{\partial y^2} \right] - j\omega \rho_t(T_t) \mathbf{A}_z \quad (1)$$

式(1)中: J_z 和 A_z 分别为 z 轴方向电流密度矢量和矢量磁位; μ 为磁导率; $\rho(T)$ 为随温度变化的电阻率。

壳体的功率损耗 Q_t 以及考虑温度影响下的电阻率 $\rho_t(T_t)$ 分别为:

$$Q_t = \int \rho_t(T_t) J_t^2 dS_t \quad (2)$$

$$\rho_t(T_t) = \rho_{tT_0} \left[1 + 0.004(T_t - T_0) \right] \quad (3)$$

式(2)、(3)中: S_t 为壳体的横截面积; T_0 为环境温度; ρ_{tT_0} 为壳体在 T_0 时的电阻率。

在确保模型精度的同时提升计算效率，本研究采用了三维外壳磁场模型，并进行了适当的简化处理。考虑到磁场仿真计算对模型与实际结构的相似程度要求并非绝对严格，本研究将外壳各部分视为单一连续体进行处理，分析其对仿真结果的影响。在仿真计算过程中，文中构建了包括外壳、导电杆、内部 SF₆ 气体、外部空气层以及法兰、螺栓等连接件在内的结构模型，其中外壳和导电杆的材料为 6063 铝合金、法兰材料为 5052 铝合金。建立的 GIS 外壳简化结构有限元模型，见图 6。

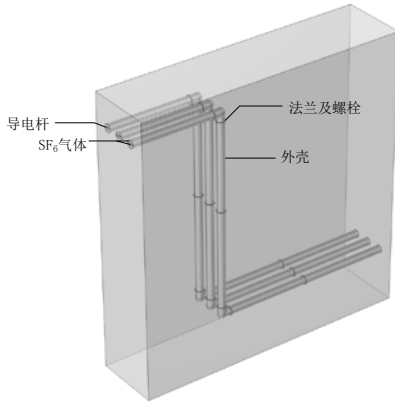


图 6 GIS 外壳磁场模型

Fig. 6 Magnetic field model of GIS shell

在外壳两端添加接地条件，母线的三相导电杆上施加了大小分别为 3 000 A 和 3 400 A 的三相交流电流，其频率设定为 50 Hz。由于电磁感应效应，GIS 外壳产生了与导体电流平行且方向相反的感应电流见图 7。仿真计算得到外壳的感应电流为 2527.5A，占导体中电流的 74.3%。

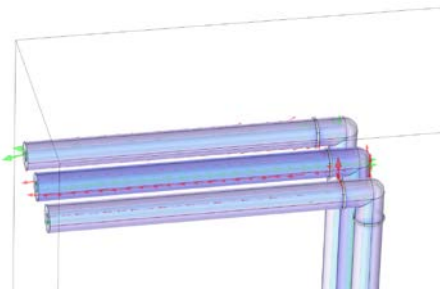


图 7 GIS 外壳电流密度分布图

Fig. 7 Current density distribution of GIS enclosure

[键入文字]

为进一步分析外壳的感应电压的分布情况，文中选取了从首端至相间汇流排连接处的路径，沿此路径对电场进行了积分处理，求解得到每相各段外壳的感应电压。

文中构建了 GIS 外壳电流等效模型见图 8，并求解等效电路中的各元件阻抗。

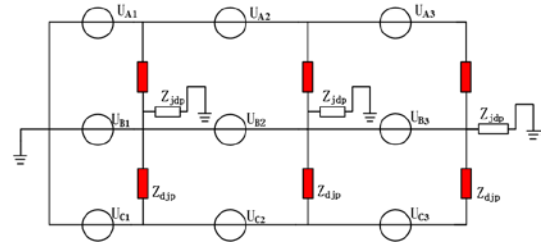


图 8 GIS 外壳电路模型

Fig. 8 GIS enclosure circuit model

相间汇流排与接地排的电感与电阻的计算为：

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{w+t} + 0.5 \right) \quad (4)$$

$$R = \frac{\rho l}{w \cdot t} \quad (5)$$

式(4)、(5)中： l 为汇流排或接地排的长度； w 为宽度； t 为厚度； ρ 为电阻率； μ_0 取 $4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$ 。

将场模型计算得到的外壳感应电压加载至 GIS 外壳路模型中，求解相间汇流排及接地排的电流。

2.2 汇流排电磁一流一热耦合仿真模型

汇流铜排工频稳态状态下的焦耳热作为热源，负载损耗 P_{Cu} 可表示为

$$P_{\text{Cu}} = I^2 R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (6)$$

式(6)中： I 为汇流排电流； T 为绕组汇流排温度； T_0 为空气温度， R_0 为 T_0 时绕组的电阻； α 为电阻温度系数，汇流铜排的系数取 $0.00386 [1/\text{K}]$ 。

在自然对流冷却的条件下，汇流铜排的热传递主要通过热传导和热对流两种方式进行。考虑到 GIS 外壳与汇流铜排紧密压接，稳态热传导过程可

根据傅里叶定律进行描述为

$$q_t = -\left(\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \quad (7)$$

式(7)中： λ_x 、 λ_y 、 λ_z 为固体介质沿 x 、 y 、 z 方向的导热系数； q_t 为固体介质间用于导热的热流密度。

温度升高致使其周围空气介质的密度减小。根据阿基米德定律可知，汇流铜排绝大部分热量通过周围空气循环散失^[17]。考虑到三维热流场模型中的NS方程具有高度非线性且相互作用非常复杂，故在大范围内对空气进行自然对流散热计算时，动量守恒方程可利用 Boussinesq 近似简化分析^[18-19]。在开放空间的流体场内，对电磁耦合器自然对流传热过程建立控制方程为

$$\lambda \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (8)$$

在流体场分析中，质量守恒、动量守恒和能量守恒方程相应的形式如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(\mathbf{v}_x \frac{\partial \mathbf{v}_x}{\partial x} + \mathbf{v}_y \frac{\partial \mathbf{v}_x}{\partial y} + \mathbf{v}_z \frac{\partial \mathbf{v}_x}{\partial z} \right) = \\ \tau \left(\frac{\partial^2 \mathbf{v}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{v}_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{v}_x}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} + T \beta \rho \mathbf{a}_x \\ \rho \left(\mathbf{v}_x \frac{\partial \mathbf{v}_y}{\partial x} + \mathbf{v}_y \frac{\partial \mathbf{v}_y}{\partial y} + \mathbf{v}_z \frac{\partial \mathbf{v}_y}{\partial z} \right) = \\ \tau \left(\frac{\partial^2 \mathbf{v}_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{v}_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{v}_y}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} + T \beta \rho \mathbf{a}_y \\ \rho \left(\mathbf{v}_x \frac{\partial \mathbf{v}_z}{\partial x} + \mathbf{v}_y \frac{\partial \mathbf{v}_z}{\partial y} + \mathbf{v}_z \frac{\partial \mathbf{v}_z}{\partial z} \right) = \\ \tau \left(\frac{\partial^2 \mathbf{v}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{v}_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{v}_z}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial z} + T \beta \rho \mathbf{a}_z \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\rho c_p \left(\mathbf{v}_x \frac{\partial T}{\partial x} + \mathbf{v}_y \frac{\partial T}{\partial y} + \mathbf{v}_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \nabla \cdot k \nabla T + Q_c \quad (10)$$

式(9)、(10)中： v_x 、 v_y 、 v_z 分别为流体速度在

x 、 y 、 z 方向的分量； ρ 为流体的体积密度； τ 为流体的动力粘度； P 为流体受到的压力； β 为流体的热膨胀系数； α_x 、 α_y 、 α_z 分别为体积力在 x 、 y 、 z 方向的加速度； c_p 为比定压热容； k 为流体介质导热系数； Q_c 为流体的内热源，即在忽略黏性耗散、辐射时，损耗热量流向空气中的部分^[20]。

在较大范围内求解热力学及流体问题的边界约束为

$$T|_{\Gamma} = C \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} \Big|_r = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} \Big|_r = 0 \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} \Big|_r = -g \end{array} \right. \quad (12)$$

式(11)、(12)中：该范围边界温度 T 设为常数 C ；该范围流体边界设置为无滑移条件，气流速度在 x 、 y 方向无加速度，仅存在沿 z 轴负方向的重力加速度 g 。

在 Comsol 中构建三维电磁场—温度场—流场耦合模型，将场—路耦合模型中计算得到的汇流排电流作为激励，进一步分析 GIS 汇流铜排的温升情况。在电磁模块中，考虑材料电阻率随温度的变化、压接面的接触电阻；在温度场模块中，设置初始汇流排温度与环境温度为 30 °C；在流场模块中，周围空气设置为层流条件^[21-22]，空气边界设置无滑移条件，设置沿 z 轴负方向的重力加速度 g 与约化压力选项，模拟自然对流。GIS 汇流排温度场分布见图 9。

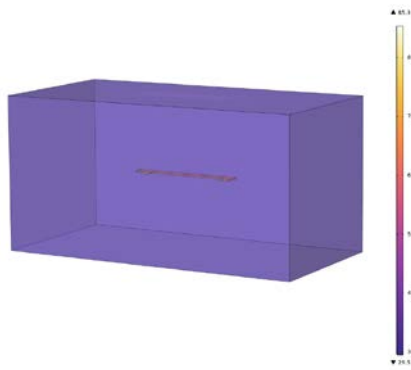


图 9 汇流排温升仿真模型

Fig. 9 Confluence temperature rise simulation model

3 仿真分析与实验验证

3.1 仿真分析

GIS 外壳环流仿真结果见表 2，如表 2 所示，仿真得到的三相外壳感应电压的相位差大致为 120°，这一现象与理论预期相符，进一步证实了采用单匝电流互感器模型来估算外壳感应电压的合理性。此外，汇流铜排电流约为导电杆中电流的 80%~90%，其数值甚至超过了外壳产生的感应电流。因此在实际工程中，GIS 外壳的异常温升现象主要发生在汇流排及其连接组件处。

表 2 GIS 外壳环流仿真结果

Table 2 GIS shell circulation simulation results

导杆电 流/A	铜排规 格/mm	相	相间电压/V	铜排电 流/A
3 000	50×6	AB	0.314 9(∠-33.62°)	2 322.85
		BC	0.318 4(∠-153.52°)	2 523.90
3 400	100×20	AB	0.356 9(∠-33.61°)	2 882.43
		BC	0.360 8(∠-153.52°)	3 121.90

1)为了探究外壳半径对 GIS 外壳环流数值的影响，文中控制导杆通流为 3 000 A 的条件下，改变模型中 GIS 外壳半径。

不同外壳外径条件下电流的幅值见图 10，如图 10 所示，GIS 外壳半径增大时，环流的数值呈现递减趋势。此现象可归因于，在其他参数保持恒

定的条件下，外壳半径的增加导致母线与外壳之间的几何距离扩大。由于长直母线产生的磁场在远离其轴线中心的区域呈现磁通密度下降的特性，因此，当磁通量通过形成环流的闭合回路时，其感应的磁通量减少，相应地，感应产生的环流数值也随之降低^[23]。

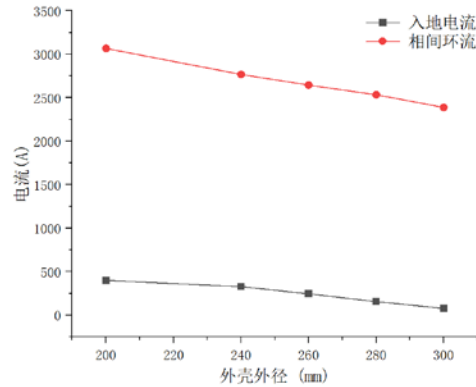


图 10 不同外壳外径条件下电流的幅值

Fig. 10 Amplitude of current for different shell outer diameter conditions

基于上述分析，在实际工程中，设计者应在考虑最小化占地面积和经济性的同时，适当增加外壳半径，以降低外壳环流数值。

2)为了探究接地点数量对 GIS 外壳环流数值的影响，控制导杆通流为 3 000 A 的条件下，保留首位两端的固定接地点外增设了 1~4 个中间部位的接地点，研究分支处汇流排的环流数值及入地电流大小。

不同接地条件下的电流幅值见图 11，如图 11 所示，随着接地点数量的增加，GIS 相间环流的数值呈现下降趋势。原因在于随着接地点数量的增加，GIS 外壳、接地体以及接地线所构成的闭合回路路径缩短，导致通过该回路的磁通量减少，进而降低了感应产生的环流数值。特别地，首尾两端的接地点之外在中间段首次引入接地点时，环

流幅值的降低幅度较为显著。若继续增加接地点数目, 虽然也能降低环流数值, 但效果相对较小。

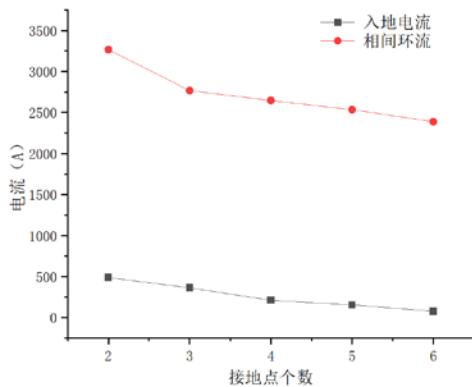


图 11 不同接地条件下的电流幅值

Fig. 11 Current amplitude for different grounding conditions

基于上述分析, 在实际工程中, 设计者应当考虑适当增加接地点的数量, 以有效抑制外壳环流, 还可以在保证设备性能的同时, 减少因环流引起的能量损耗和潜在的电磁干扰问题。

3)为了研究外壳不同部位的环流发布情况, 本文在导杆通流为 2 500、3 000、3 500、4 000 A 4 种工况下进行仿真。

不同外壳部位的电流幅值见图 12, 如图 12 所示 GIS 外壳环流的幅值随导电杆实际通流的增大而增大。此现象可归因于, 在其他参数保持恒定的条件下, 导杆通流增加感应产生的磁通量增大, 相应地, 感应产生的环流数值也随之增大。外壳环流在空间位置上的分布呈现由首端到末端逐渐增大的趋势, 套管端部 GIS 外壳的环流数值最大, 而在外壳的中间部位环流值偏小。

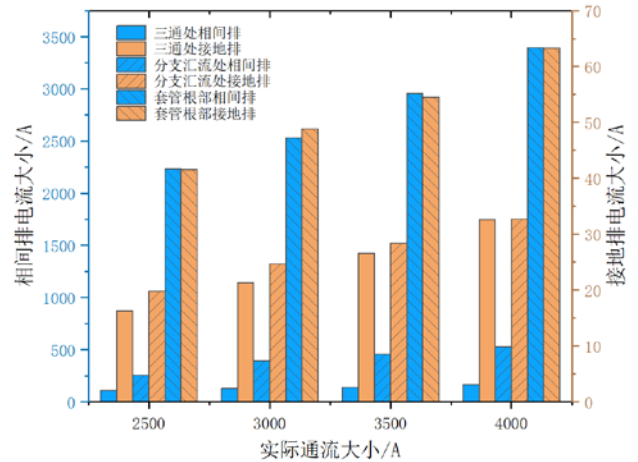


图 12 不同外壳部位的电流幅值

Fig. 12 Current amplitude in different housing parts

根据外壳环流的这一特性, 在套管根部增设相间汇流排并接地能很大程度地缓解分支处汇流排的通流压力, 进而解决该部位的发热问题。

4)在实际工程中, 外壳与汇流排之间的接触电阻会因为磨损、预紧力松弛而增大, 这将对导体的欧姆损耗以及整个设备的温度场分布产生显著影响。为了深入研究负荷电流和接触电阻对 GIS 汇流铜排温度场的影响, 文中设置了不同的负荷电流(1 000、2 500、3 000、3 200 A)条件, 并逐步增加接触电阻(从 10~90 $\mu\Omega$)条件, 探究负荷电流、接触电阻与温升之间的关系。

不同接触电阻及负荷电流条件下的汇流排温升见图 13, 如图 13 所示, 在低负荷电流条件下, 接触电阻的增加与温度上升之间存在近似线性的关联。然而, 在高负荷电流条件下, 接触电阻与温升的关系变得更加复杂, 当负荷电流升高时, 随着接触电阻的增加, 相间铜排的温度上升速率显著提高, 温度上升速率与接触电阻的增加之间存在非线性增强效应。此外, 随着负荷电流的增加, 汇流排温度的增长速率也随之增大。这些发现揭示了在不同电流作用下, 接触电阻与温度之间的

非线性关系。

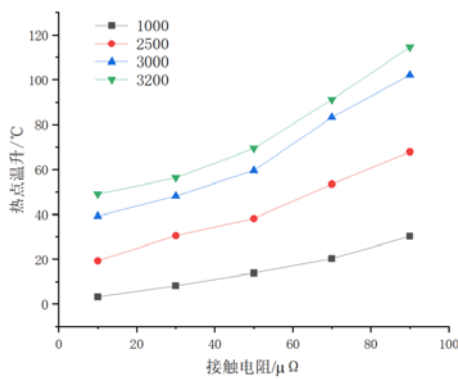


图 13 不同接触电阻及负荷电流条件下的汇流排温升

Fig. 13 Temperature rise of busbar under different contact resistance and load current conditions

鉴于此，在实际工程实践中，应采取适宜的措施以确保电气接触面的紧密连接，从而有效降低接触电阻^[24]。这对于维持系统的热稳定性、提高电气连接的可靠性和延长设备的工作寿命均有重要意义。

3.2 实验验证

为了验证仿真模型的准确性，文中对扬州—镇江±200kV 直流输电工程中少游换流站的 220 kV GIS 设备进行了外壳环流和温升的实验测试。构建了模拟现场工况的样机，测试形态见图 14，分别在三通处、三相分支外壳处设置两处相间汇流铜排，试验过程中分别施加 3 000、3 400 A 的工频交流电，以模拟实际运行工况。

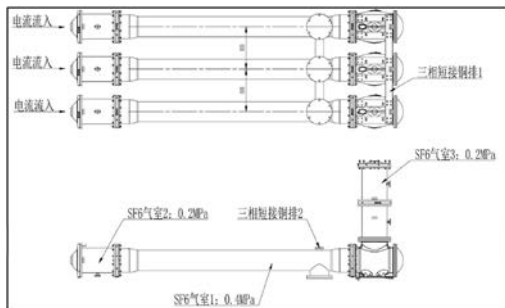


图 14 测试形态

Fig. 14 Test pattern

[键入文字]

3.2.1 GIS 外壳环流测量

GIS 外壳环流的测量采用罗氏线圈及积分器，将线圈感应电流换算为电流正弦波形图^[25]，待电流值稳定后，使用 Rohde&Schwarz RTH1004 型手持数字示波器读取电流数值，测量过程见图 15。



图 15 罗氏线圈电流测量图

Fig. 15 Roche coil current measurement diagram

环流仿真与测量数值对比见表 3，仿真结果与实际测量值相比存在一定偏差，但误差范围控制在 2% 以内，由此可见仿真模型具有较高的准确性。

表 3 环流仿真与测量数值对比

Table 3 Comparison of simulated and measured values of the circulating flow

导杆电 流/A	铜排规格 /mm	相	铜排电 流/A	实测电 流/A	相对误 差/%
3 000	50×6	AB	2 322.85	2 360	1.57
		BC	2 523.90	2 560	1.41
3 400	100×20	AB	2 882.43	2 920	1.29
		BC	3 121.90	3 181	1.86

偏差产生的主要原因在于本文的仿真仅考虑了基波的影响。该间隔实际运行过程中存在较大的谐波含量，导杆电流中包含多种频率成分，这些高频谐波成分会对外壳感应电压产生影响，导致仿真结果低于实际测量数值。为了提高仿真的准确性，未来的研究可以考虑引入谐波分类进行分析，以更全面地模拟实际的电流条件。此外，仿真模型的简化也可能对结果产生一定影响。模型中忽略了一些结构细节或材料特性，这些因素在实际中可能会对感应电压产生一定程度的影

响。

3.2.2 温升试验

根据 GB/T 11022—2011 标准要求, 文中进行 GIS 母线温升试验, 旨在评估设备在特定运行工况下的温升情况。试验过程中, 利用红外线测温仪对 GIS 外壳的关键部位及汇流铜排进行了温度监测。试验中施加 3 400 A 的工频交流电, 以模拟实际运行工况。根据标准规定, 若 GIS 设备在 1 h 内的温升值不超过 1 K, 则认为其温升已达到稳定^[26], 温升达到稳定值后试验结束, 读取温升数据。

测试中使用型号为 Fluke TiX580 的红外热像仪测量温度, 详见图 16。



图 16 红外热像仪温度测量图

Fig. 16 Infrared camera temperature measurement diagram

温升仿真与测量数值对比见表 4, 仿真结果中的数值略高于实验数据。这一差异归因于在对电力系统间隔的电流波形进行频谱分析时, 观测到电流中存在较高的谐波分量, 第 11 次和第 13 次谐波的幅值较大。这些谐波成分体现了非线性负载或系统内部动态效应对电流波形质量的显著影响。在仿真模型中, 仅考虑了基波分量, 忽略了谐波对损耗的附加影响, 这导致计算得到的损耗值低于实际值。鉴于损耗值与温升直接相关, 因此仿真预测的温升值低于实验观测到的值。然而仿真值与实验值之间的差异在 5% 以内, 仿真结果

仍具有较高的参考价值。

表 4 温升仿真与测量数值对比

Table 4 Comparison of temperature rise simulation and measured values

铜排类型	铜排规格/mm	仿真结果/°C	实验测试/°C	相对误差/%	温升/K
初始状态	50×6	175.0	183.00	4.37	153.0
临时操作	50×(4+6)	141.0	147.98	4.96	119.0
相间铜排	100×20	94.4	97.50	3.17	65.4
3 处汇流接地	100×20	40.5	41.60	2.64	10.5

4 结论

文中通过采用场—路耦合的分析方法, 深入探讨了气体绝缘开关设备(GIS)外壳环流产生的机理及其主要影响因素。在此基础上, 文中建立电磁—流—热耦合模型, 以探究 GIS 相间汇流排的异常温升现象。模型中综合考虑了包括重力作用、气体对流效应以及环境温度等多重因素, 对负荷电流和接触电阻对汇流排温升的影响进行了系统研究, 得到以下结论:

1)增大 GIS 外壳半径和合理增加接地点数目能有效减少 GIS 相间环流及入地电流。特别是, 在中间段首次引入接地点时, 环流幅值显著降低, 而接地数量的进一步增加也能在较小程度上减小环流。

2)外壳环流的空间分布特征表明, 其幅值从首端至末端呈现逐渐增大的趋势。基于此, 通过在套管根部增设相间汇流排并接地, 可以显著降低分支处汇流排的通流压力, 有效缓解发热问题。

3)在低负荷电流条件下, 接触电阻的增加与温度上升之间存在近似线性关系。然而, 在高负荷电流条件下, 这种关系转变为非线性增强效应。因此, 在工程实践中, 应重视接触面的处理, 以

降低接触电阻。

参考文献：

- [1] 王娜娜, 刘晓瑞, 王刚, 等. 1 000 kV GIS 布置关键问题探讨[J]. 智慧电力, 2019, 47(1): 1-5.
WANG Nana, LIU Xiaorui, WANG Gang, et al. Discussion on key issues of 1 000 kV GIS layout[J]. Smart Power, 2019, 47(1): 1-5.
- [2] 马波, 吴旭涛, 李秀广, 等. 基于振动信号的GIS隔离开关接触状态带电检测技术研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 73-77.
MA Bo, WU Xutao, LI Xiuguang, et al. Contact status live detection of GIS disconnecter based on vibration signal[J]. Smart Power, 2019, 47(12): 73-77.
- [3] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 7-10.
LIN Xin. Modern high-voltage electrical technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 7-10.
- [4] 黎斌. SF₆高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 109-111.
LI Bin. Design of high-voltage electrical appliances[M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 109-111.
- [5] 赵成勇, 陈晓芳, 曹春刚, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 82-87.
ZHAO Chengyong, CHEN Xiaofang, CAO Chungang, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under dc faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 82-87.
- [6] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.
XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.
- [7] 张豪, 刘亚培, 徐凯宏, 等. 252 kV GIS 变电站外壳环流特性分析及有限元计算方法[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 51-58.
ZHANG Hao, LIU Yapei, XU Kaihong, et al. Characteristic analysis and finite element calculation method for shell circulating current of 252 kV GIS substation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 51-58.
- [8] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 1-25.
XU Zheng. Voltage source converter based HVDC power transmission systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2013: 1-25.
- [9] CHEN Taiyu, LIU Hongshun, HU Dongyang, et al. Shell circulating current and transient ground potential rise in 220 kV GIS[J]. The Journal of Engineering, 2017, 2017(13): 2555-2558.
- [10] 赵义松, 宋成伟, 邢凯, 等. 高压GIS壳体环流及损耗计算模型研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 201-207.
ZHAO Yisong, SONG Chengwei, XING Kai, et al. Circulation and loss calculation model of high voltage GIS shell[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2021, 40(1): 201-207.
- [11] LIAO Xuejing, SU Xuhui, REN Chengjun, et al. Research on circulating current characteristics and the vibration mechanism on the GIS enclosure[C]//2019 2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Guangzhou, China: IEEE, 2019: 8727324.
- [12] 宁宇, 孙洪宇, 张伟, 等. GIS 高压母线段间连接缝隙造成的过热分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(s1): 217-224.
NING Yu, SUN Hongyu, ZHANG Wei, et al. Analysis of overheating caused by connection gaps between GIS high-voltage busbar segments[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(s1): 217-224.
- [13] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
FENG Cizhang, MA Xikui. An introduction to engineering electromagnetic fields[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [14] 刘亚培, 张豪, 刘书瀚, 等. 800 kV 三相分箱GIS变电站外壳感应电压及环流分析[J]. 电瓷避雷器, 2020(5): 38-46.
LIU Yapei, ZHANG Hao, LIU Shuhan, et al. Analysis of induced voltage and circulating current in 800 kV Three-Phase Sub-Box GIS substation[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(5): 38-46.
- [15] 杨芷宁. 基于SF₆动态击穿特性的GIS壳体暂态环流特性的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
YANG Zhining. Study on transient circulating current characteristics of GIS shell based on SF₆ dynamic breakdown characteristics[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [16] 李永建, 闫鑫笑, 张长庚, 等. 基于磁-热-流耦合模型的变压器损耗计算和热点预测[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21): 4483-4491.

- LI Yongjian, YAN Xinxiao, ZHANG Changgeng, et al. Numerical prediction of losses and local overheating in transformer windings based on magnetic-thermal-fluid model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4483-4491.
- [17] 崔兆轩, 林 莘, 钟建英, 等. C₄F₇N/CO₂ 混合气体特高压母线通流温升特性研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2491-2499.
- CUI Zhaoxuan, LIN Shen, ZHONG Jianying, et al. Study on the temperature rise characteristics of C₄F₇N/CO₂ mixed gas ultra high voltage bus[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2491-2499.
- [18] 周利军, 张讥培, 王朋成, 等. 环境因素影响下 GIL 温升特性的仿真计算分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 211-218.
- ZHOU Lijun, ZHANG Jipei, WANG Pengcheng, et al. Simulation and analysis of GIL temperature rise characteristics under effects of environmental factors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 211-218.
- [19] 程志远, 宋晓逸, 吴晓婷, 等. 无线充电系统旋转式电磁耦合器损耗计算及热点温度研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7): 1932-1942.
- CHENG Zhiyuan, SONG Xiaoyi, WU Xiaoting, et al. Loss calculation and hot spot temperature research of rotary electromagnetic coupler in wireless charging system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7): 1932-1942.
- [20] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [21] 刘 凯, 彭在兴, 王 颂, 等. GIS 内部过热工程仿真技术研究[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 13-18.
- LIU Kai, PENG Zaixing, WANG Song, et al. Research on GIS internal overheating engineering simulation technology[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 13-18.
- [22] 张婧俣, 张军强, 李 楠, 等. 基于有限元分析的 GIS 断路器温度场仿真研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(8): 53-61.
- ZHANG Jingyu, ZHANG Junqiang, LI Nan, et al. Simulation research on the temperature field of GIS circuit breakers based on finite element analysis[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2021, 37(8): 53-61.
- [23] 陈泰羽. 混合无功补偿变电站 GIS 外壳环流及暂态地电位升高研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- CHEN Taiyu. Research on GIS enclosure circulating current and transient ground potential elevation in hybrid reactive power compensation substation[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [24] 周 鑫, 鲁铁成, 罗容波, 等. 气体绝缘组合电器触头电接触状态检测与评估方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 217-224.
- ZHOU Li, LU Tiecheng, LUO Rongbo, et al. Detection and evaluation method of electrical contact state in gas insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 217-224.
- [25] 徐珩耀. GIS 触头发热带电检测及状态评估技术[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- XU Hangyao. Live detection of over-heated bus contact in GIS and state assessment technology[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [26] 吴 吉, 王增彬, 吕 鸿, 等. 考虑气流场影响的 GIS 温升计算与实验研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 815-823.
- WU Ji, WANG Zengbin, LV Hong, et al. Calculation of GIS temperature rise considering effect of gas flow and experimental study[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 815-823.
- 茅鑫同(1990—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 从事电网建设及直流技术管理工作(E-mail: hhu1990@163.com).
- 吴乐洋(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究电力设备多物理场耦合分析与在线监测(通信作者)(E-mail: leon810100@163.com)。