

80 kA 短路故障下特高压 GIS 内部燃弧效应评估与 结构失效风险分析

高浩予, 冯 英, 崔博源, 张鹏飞, 吴昱怡, 黄 河, 王浩然

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 随着电网负荷及站点关联程度提高, 短路电流水平随之增大, 推动 1 100 kV/63 kA GIS 在现有设备基础上向 1 100 kV/80 kA 发展, 对壳体耐电弧烧蚀性能也提出了更高的要求。目前, 该指标主要通过内部故障电弧试验考核, 然而, 受限于特高压 GIS 试验难度, 大多采用数值计算方式进行评估, 但数值计算较难反映热—力耦合效应的共同作用。此外, 受限于数值计算评估方式, 极端故障下特高压 GIS 设备燃弧效应演化与结构失效风险尚不清晰。针对此, 文中基于 Mayr-Schwarz 电弧模型, 提出了考虑热—力效应的 GIS 燃弧效应评估方法, 且对评估可靠性进行了验证。与试验结果相比, 评估误差率小于 1%, 表明所提出评估方法及经验参数选取具备较高可靠性。进一步, 基于所提出方法, 对 80 kA 短路故障下 1 100 kV/63 kA GIS 母线气室内部燃弧效应开展了分析。评估表明, 80 kA 短路电流持续 0.3 s 时刻, 气室气压最高可达 2.71 MPa, 超过该母线气室壳体最大压力允许值 1.95 MPa, 壳体将由焊缝处开裂, 建议开展壳体厚度、内径优化, 增设压力释放装置等措施。相关研究可为不同电压等级三相分箱结构 GIS 壳体抗燃弧性能优化必要理论基础。

关键词: 特高压 GIS; 内部放电故障; 燃弧效应评估; 结构失效风险分析

Assessment of Internal Arcing Effects and Structural Failure Risk Analysis of UHV GIS Under 80 kA Short-circuit Fault

GAO Haoyu, FENG Ying, CUI Boyuan, ZHANG Pengfei, WU Yuyi, HUANG He, WANG Haoran
(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: As the grid load and the degree of interconnection between substations increase, the short circuit current level rises accordingly, driving the development of 1 100 kV/63 kA GIS toward 1 100 kV/80 kA based on existing equipment, which places higher demand on the arc ablation resistance performance of the enclosure. Currently, this performance is mainly evaluated through internal fault arc tests. However, due to the difficulty of conducting tests on UHV GIS, most assessments are performed by using numerical calculations. Nevertheless, numerical methods struggle to capture the combined effects of thermal-mechanical coupling. Furthermore, due to the limitations of numerical assessment methods, the evolution of arcing effects and the risk of structural failure in UHV GIS equipment under extreme fault conditions remain unclear. To address the issue, in this paper the GIS arcing effect assessment method considering thermal-mechanical effect is proposed on the basis of Mayr-Schwarz arc model and the assessment reliability is verified. Compared with the test result, the assessment error rate is less than 1%, indicating that the proposed assessment method and the selection of empirical parameters possess high reliability. Furthermore, based on the proposed method, the internal arcing effects of 1 100 kV/63 kA GIS busbar compartment at 80 kA short circuit fault is analyzed. The assessment result shows that in case of 80 kA short circuit current for 0.3 s, the maximum pressure in the gas compartment can be up to 2.71 MPa, exceeding the enclosure maximum allowable pressure of 1.95 MPa of the busbar compartment enclosure, and the enclosure will be cracked from the weld seam. Such measures as optimization of thickness and internal diameter of enclosure as well as addition of pressure relief device are suggested. The relevant work can provide a necessary theoretical basis of arcing resistance performance of three-

收稿日期:2025-12-12; 修回日期:2026-02-20

基金项目:国家电网有限公司技术研究服务项目(SGZB0000TGJS2500985)。

Project Supported by Technology Service Project of SGCC(SGZB0000TGJS2500985).

phase independent encapsulated GIS at different voltage levels.

Key words: UHV GIS; internal discharge; arc effects assessment; structural failure risk analysis

0 引言

GIS 具备空间集约化、高可靠性、低损耗、强环境适应性等多种优势,被广泛应用于各电压等级电网建设。随着电网负荷增大,超特高压站点布局密集程度、关联程度提高,各区域电网短路电流水平呈升高趋势,推动特高压 GIS 在现有 1 100 kV/63 kA 设备基础上向 1 100 kV/80 kA 发展^[1-6]。壳体,作为 GIS 设备的承压边界与力学骨架,伴随开断容量提升,其耐电弧烧蚀性能也提出了更高的要求,当发生内部放电燃弧极端故障时,应可承受放电所产生压力、温度多场耦合应力的共同作用,不发生炸裂现象,保障周围人员及设备安全^[7]。

壳体的耐电弧烧蚀性能往往通过内部故障电弧试验校核,然而,考虑到特高压 GIS 试验成本高、实施难度大,且国家标准《额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备》(GB/T 7674—2020)中并未将其作为必做型式试验项目,规定可通过计算燃弧所产生压力变化的方式对壳体强度设计进行评估^[8]。目前,针对特高压等级 GIS 设备,制造厂大多依托 GB/T 7674—2020 中附录 D 推荐公式开展内部故障电弧效应评估,见式(1)。对于抗燃弧性能评估判据,标准中明确要求,如果最大电弧电流和电弧持续时间下引起的压力升高,不超过外壳可承受最大压力值,则可表明外壳强度设计足以应对该极端情况。其中,当短路电流不小于 40 kA 时,壳体 0.3 s 内不可发生破裂;当短路电流小于 40 kA 时,壳体 0.5 s 内不可发生破裂。

$$\Delta p = C_{\text{equ}} \cdot \frac{I_{\text{arc}} \cdot t_{\text{arc}}}{V_{\text{com}}} \quad (1)$$

式(1)中: Δp 为燃弧故障前后压力变化值; I_{arc} 为电弧电流,通常与设备额定短时耐受电流一致; t_{arc} 为电弧持续时间; V_{com} 为气室容积; C_{equ} 为设备系数,数值由制造厂通过类似设备的等效试验来获得。然而,不同制造厂对于设备系数取值不同,因此,相同条件下所获得评估结果存在差异^[9-10]。

进一步,为提高燃弧效应评估准确度,基于理想气体状态方程,学者们围绕 GIS 内部燃弧效应提出了多种数值计算评估方法,分析了燃弧故障下壳体内部压力变化规律^[11-13]。但数值计算过程中,并未考虑燃弧放电所产生高温影响,难以与壳体所承受真实应力工况有效等价。此外,受限于数值计算评

估方式,极端短路故障下 1 100 kV/63 kA GIS 设备燃弧效应演化与结构失效风险点也尚不清晰。因而,亟需构建考虑热—力耦合作用的 GIS 内部故障电弧效应评估方法,并针对 1 100 kV/63 kA GIS 设备开展特定评估,以为 1 100 kV/80 kA GIS 研发与安全裕度优化提供必要理论基础。

鉴于此,文中基于改进 Mayr-Schwarz 电弧模型理论,构建了燃弧演化与气室压力、温度变化的关联关系,提出了考虑热—力耦合效应的 GIS 内部燃弧效应评估方法,且对评估可靠性进行了验证。进一步,基于所提出方法,对 80 kA 极端短路故障下 1 100 kV/63 kA GIS 内部故障电弧效应与结构失效风险开展了评估与分析。

1 内部放电故障电弧演化与燃弧效应表征

GIS 气室内部发生短路故障时,通常伴随放电电弧出现,由于较大短路电流及功率,将会释放出大量热能,造成气室内部压力及温度快速升高,导致壳体所承受压力随之上升,安全裕度被迅速消耗。因而,厘清放电故障电弧演化特性,构建准确的电弧内能表征模型已成为开展燃弧效应评估的必要基础。

1.1 基于改进 Mayr-Schwarz 理论的电弧等效表征

针对电弧演化模拟,目前已有定值燃弧电阻模型、指数燃弧电阻模型、Mayr-Schwarz 电弧模型、重燃弧电阻模型、双温度磁流体电弧模型等多种表征方法,然而,不同方法所适用工况稍有差异。相较于其他经典模型,Mayr-Schwarz 电弧模型则相对平衡,在电弧电流以及电弧电压基础上,额外引入电弧电导参数,并通过构建电弧电导与电弧功率、热惯性关联关系,将电弧瞬时变化中热特性与能量耗散纳入考虑,常用于接地故障分析^[14]。由于 GIS 内部放电多属于弧光接地故障,且其电弧发热是导致气压变化的最主要原因,因而,文中选择改进 Mayr-Schwarz 电弧模型理论以模拟该类故障。

假定电弧内能为 $Q_{\text{arc}}(t)$,电弧耗散功率为 $P_{\text{out}}(g)$,结合弧隙能量平衡原理与热平衡原理,电弧内能与电弧电流、电压及耗散功率关系可表示为

$$\frac{dQ_{\text{arc}}}{dt} = u(t)i(t) - P_{\text{out}}[g(t)] \quad (2)$$

基于电弧热惯性时间常数 $\tau(g)$,耗散功率可进一步与电弧内能关联,可表示为

$$Q_{\text{arc}}(t) = \tau[g(t)]P_{\text{out}}[g(t)] \quad (3)$$

设导电状态量 $x(t) = \ln g(t)$, 以 x 为自变量, 对式(2)进行链式求导, 可变换为

$$\frac{dQ_{\text{arc}}}{dt} = \frac{\partial Q_{\text{arc}}}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{1}{g} \frac{\partial Q_{\text{arc}}}{\partial x} \frac{dg}{dt} \quad (4)$$

依据改进 Mayr-Schwarz 模型的局部线性化假设, 存在关系

$$\frac{\partial Q_{\text{arc}}}{\partial x} \approx \tau(g)P_{\text{out}}(g) \quad (5)$$

与式(2)、(4)联立, 可获得关于电弧电导的表达式为

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau(g)} \left[\frac{u(t)i(t)}{P_{\text{out}}(g)} - 1 \right] \quad (6)$$

为实现对电弧演化的更精确表征, 改进 Mayr-Schwarz 模型将热惯性时间常数、电弧耗散功率与电弧电导变化进行了关联, 可表示为

$$\begin{cases} P_{\text{out}}(g) = P_s g^\alpha \\ \tau(g) = \tau_s g^\beta \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, P_s 、 τ_s 、 α 、 β 均为 Schwarz 参数, 结合企业试验数据及经验公式, α 、 β 可分别取 0.2、0.28^[15], P_s 、 τ_s 可由电弧长度 l_{arc} 、稳态下近似电弧电压 U_0 、电弧电流有效值 I_0 以及电源角频率 ω 表示:

$$P_s = 2.85 \times 10^{-6} \frac{I_{\text{arc}} U_0 I_0 \omega}{l_{\text{arc}}} \quad (8)$$

$$\tau_s = 2.85 \times 10^{-6} \frac{I_{\text{arc}}}{l_{\text{arc}}} \quad (9)$$

代入式(7)并与式(6)联立, 电弧电导表达式可进一步表示为

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_s g^\beta} \left[\frac{u(t)i(t)}{P_s g^\alpha} - 1 \right] \quad (10)$$

为与电源电路联立分析, 由于电弧电压 $u(t)$ 由弧柱电压与两端电极附近电压降构成, 假定电压降为 U_c , 电弧电压可表示为

$$u(t) = \frac{i(t)}{g(t)} + U_c \quad (11)$$

将整体系统等效为电源、电阻与电感串联回路, 设外电源电压为 U_s , 系统等效串联电阻、电感分别为 R 、 L , 则电弧电流满足

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_s(t) - u(t) - Ri(t)}{L} = \frac{U_s(t) - \frac{i(t)}{g(t)} - U_c - Ri(t)}{L} \quad (12)$$

由此, 式(10)、(12)可构成关于电弧电导 g 、电弧电流 i 的二维非线性方程组。评估过程中, 当依据国家标准及设备实际参数设置, 给定初值 $g(0)$ 以及 $i(0)$ 时, 便可通过数值积分获得电弧电导、电流、电压的变化趋势。进一步, 电弧的瞬时发热功率 P_{arc} 及总

能量 Q_{all} 可表示为:

$$P_{\text{arc}}(t) = u(t)i(t) \quad (13)$$

$$Q_{\text{all}} = \int_{t_0}^{t_1} P_{\text{arc}}(t) dt \quad (14)$$

式(14)中, t_0 和 t_1 分别为燃弧的起始时刻与终止时刻。进一步, 考虑电弧热量的耗散与热量对流, 耗散能量可表示为

$$Q_{\text{loss}} = \int_{t_0}^{t_1} P_{\text{out}}[g(t)] dt = \int_{t_0}^{t_1} P_s g^\alpha(t) dt \quad (15)$$

综上, 电弧内能 Q_{arc} 可表示为

$$Q_{\text{arc}} = Q_{\text{all}} - Q_{\text{loss}} = \int_{t_0}^{t_1} \left[u(t)i(t) - 2.85 \times 10^{-6} \frac{I_{\text{arc}} U_0 I_0 \omega}{l_{\text{arc}}} g^{0.2}(t) \right] dt \quad (16)$$

1.2 燃弧演化与气室压力、温度关联关系

GIS 气室内部发生短路故障时, 综合考虑电弧能量与周围环境的复杂作用机理, 并非全部电弧能量均被用于加热绝缘气体, 造成气室压力升高。因而, 为描述气室内部发生燃弧故障时的压力、温度变化, 引入能量利用系数 k_p 这一概念^[16], 表征电弧加热气体能量 Q_{heat} 占电弧内能 Q_{arc} 的比例, 可表示为

$$k_p = \frac{Q_{\text{heat}}}{Q_{\text{arc}}} \quad (17)$$

针对三相分箱结构 GIS 设备, 其内部主要由金属、绝缘件以及绝缘气体构成, 实际燃弧演化过程中, 相对于 SF_6 绝缘气体, 金属热导率较高, 放电所产生部分热量将被高压导体、壳体所吸收, 并向外部空气扩散, 不同制造厂通过试验获得了能量利用系数的经验取值, 大多处于 0.3~0.7 之间, 文中能量利用系数拟取值为 0.5。

此外, 根据热力学原理及国外推荐经验公式^[17], 在恒定体积 SF_6 气体中比热与温度的关系可表示为

$$C_v(T) = 855.4 + 0.12T - \frac{25.8 \times 10^6}{T^2} \quad (18)$$

假定气体初始温度为 T_0 , 质量为 m , 温升后温度为 T_1 , 其与转化为气体内能的能量 Q_{heat} 存在关系

$$Q_{\text{heat}} = m \int_{T_0}^{T_1} C_v(T) dT = m \int_{T_0}^{T_1} \left(855.4 + 0.12T - \frac{25.8 \times 10^6}{T^2} \right) dT \quad (19)$$

由式(19)可得, 在已知气体初始温度 T_0 , 质量 m 以及转化为气体内能的能量 Q_{heat} 的前提下, 通过数值计算方法, 可获得温升后温度 T_1 。

进一步, 假定燃弧演化过程遵循理想气体状态方程, 在气室体积、气体质量不变的情况, 气室压力将随温度变化, 可获得初始气压 P_0 与燃弧终止气压 P_1 关系为

$$P_1 = P_0 \cdot \frac{T_1}{T_0} \quad (20)$$

2 基于多场耦合的 GIS 燃弧热—力效应评估方法

在所获得电弧内能表征模型基础上, 本节进一步提出了二维电弧形态和发热功率等效方案, 进而将其应用于流—热—固多场耦合计算, 实现对放电故障下 GIS 内部燃弧效应的评估。具体评估等效原理如下。

2.1 二维故障电弧热效应等效表征

为应用于多场耦合仿真, 提出故障电弧热效应等效方法, 包括电弧形态和电弧发热功率两部分。对于电弧形态, 将其近似为一个矩形结构, 短边根据工程经验设定为 5 mm, 长边根据实际仿真电弧的起点和终点位置设置确定。

对于电弧发热功率, 考虑到当发生内部故障短路时, 电弧电流有效值、近似电弧电压保持相对稳定, 电弧热功率变化较小, 其将作为稳定热源持续散热, 因而, 加热气体部分的电弧发热功率 P_{heat} 可表示为

$$P_{\text{heat}} = \frac{Q_{\text{heat}}}{t_1 - t_0} \quad (21)$$

进一步, 考虑到三维结构与二维仿真差异, 基于单位气体体积所分担的热量不变的原则, 对发热功率按体积比例等比例修正, 可表示为

$$P_{\text{heat-2d}} = P_{\text{heat}} \frac{V_{2d}}{V_{3d}} \quad (22)$$

式(22)中: $P_{\text{heat-2d}}$ 为二维仿真时等比例缩小的发热功率; V_{2d} 为二维仿真的网格总体积(网格厚度 10 mm); V_{3d} 为三维气室的总体积。

2.2 GIS 内部燃弧效应评估方法

结合上述表征模型, 构建 GIS 内部燃弧效应评估方法, 该方法可适用三箱分型结构、不同电压等级 GIS 设备。具体评估流程与实现方法见图 1。

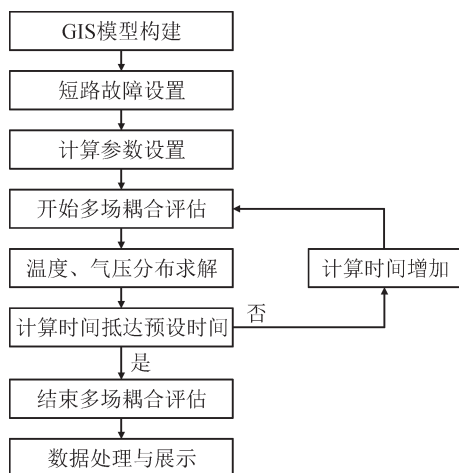


图1 GIS内部燃弧效应评估流程

Fig. 1 Evaluation process for internal faulting arc effect in GIS

1) GIS 模型构建, 基于真型 GIS 设备结构, 构建仿真评估模型, 并设置 GIS 壳体材质、高压导体材质、绝缘气体类型、初始温度和初始压力等环境参数。

2) 短路故障设置, 依据所选择故障类型特征, 设置电弧起点、终点, 以及电弧电流有效值、电压以及持续时间等电弧参数。

3) 计算参数设置, 依据计算要求, 进行计算域、边界条件、计算步长、时间长度、网格等参数设置。

4) 开始多场耦合评估, 基于 Navier-Stokes 方程, 建立连续性方程和动量守恒方程以及能量输运方程, 开展流—热多场耦合计算。

5) 温度、气压分布求解, 依据所设置仿真参数, 采用瞬态计算方法, 获得 GIS 内部气压、温度变化。

6) 结束多场耦合评估, 比较计算时间与预设时间, 若抵达预设时间, 则结束评估, 若未抵达, 则在计算时间上增加单位步长时间, 并再次开展计算。

7) 数据处理与可视化, 提取气室内部特征位置的温度和压强变化, 通过色差图像、动画动图展示。

2.3 内部燃弧效应评估方法可靠性验证

进而, 参照真型设备内部故障电弧试验设置, 基于所提出方法开展仿真分析, 通过与真型试验结果比对, 实现对评估可靠性的验证。

厦门理工学院研究人员对单相短路故障下 GIS 内部气压变化情况进行了研究^[18]。试验样机选用某公司 252 kV GIS 设备(气体容积 0.452 m³), 试验电流与设备额定短时耐受电流一致, 为 63 kA。结合压力传感器数据与防爆膜动作情况, 试验表明, 随着燃弧持续时间增长, 气室内部气压随之升高。同时, 在发生单相短路故障 121 ms 后, 气室内部气压由 0.53 MPa 升高至 1.22 MPa, 造成防爆膜(动作压力 1.22 MPa)动作。进而, 根据真型试验所选用 GIS 设备实际尺寸及故障设置方式, 构建仿真模型, 见图 2。蓝色网格密集处代表电弧路径, 与实际试验引弧丝布置方式一致。

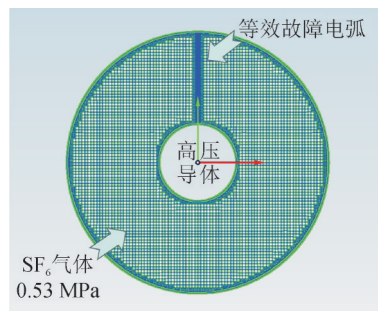


图2 单相接地短路故障设置

Fig. 2 Single-phase ground fault setting

燃弧评估所使用参数见表 1, 与真型样机内部故障电弧试验所使用参数一致。

表1 燃弧效应评估参数设置

Table 1 Setting evaluation parameters

参数类型	选取数值
近似电弧电压/V	600
电弧电流有效值/A	63 000
电弧持续时间/s	0.121
能量利用系数	0.5
气体介质类型	SF ₆
初始温度/K	293
初始气压/MPa	0.53

仿真获得内部故障电弧作用下,气室内部气压变化情况,以及终止时刻气压分布情况分别见图3、4。

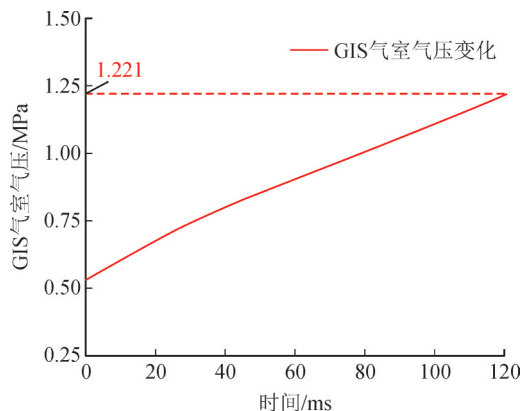


图3 63 kA 短路电流下GIS气室气压变化

Fig. 3 Variation of GIS gas chamber pressure under 63 kA short-circuit faults

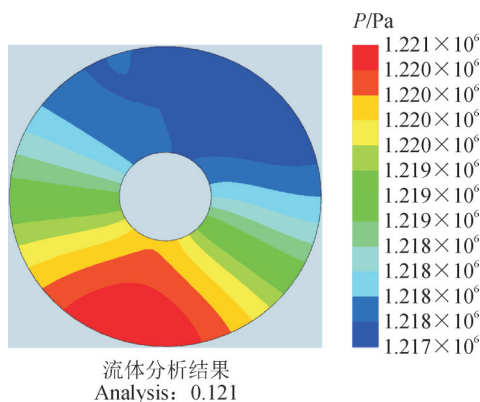


图4 燃弧终止时刻气室气压分布

Fig. 4 Pressure distribution of GIS gas chamber when faulting arc extinguish

如图3,气室气压将随燃弧持续时间增长而同步增长,且两者近似呈正比关系,与厦门理工学院研究人员试验所获得变化规律基本吻合^[18]。同时,由图4可得,燃弧终止时刻,气室内部最高气压为1.221 MPa,最低为1.217 MPa,各区域气压分布相对均匀,差异较小,主要由于气压压力变化在空气中以机械纵波的形式传递,传播速度与声速一致^[19],因GIS气室相对较小,因而,压力分布可在较短时间内

便达到相对均匀状态。此外,与真型试验气室气压变化结果比对,相同121 ms时刻,评估所获得气室内部气压为1.221 MPa,与真型试验气室内部压力1.22 MPa相比,误差率小于1%,表明所提出评估方法及经验参数选取具备较高的可靠性。

3 80 kA 极端短路故障下特高压GIS内部故障电弧效应评估

受限于过往数值计算方式限制,极端短路故障下特高压GIS设备燃弧效应演化与结构失效风险点尚不清晰。因而,拟进一步基于所提出方法,对80 kA短路电流下1 100 kV/63 kA GIS设备燃弧效应开展评估,以为1 100 kV/80 kA GIS研发与壳体耐电弧烧蚀性能优化提出针对性方案。

评估对象选用某公司1 100 kV/63 kA GIS典型母线气室,故障设置方面,于高压导体与壳体间设置电弧,模拟单相短路故障。燃弧效应评估所使用参数见表2。短路电流为80 kA(有效值),短路电流持续时间为0.3 s。

表2 燃弧效应评估参数设置

Table 2 Setting evaluation parameters

参数类型	选取数值
近似电弧电压/V	600
电弧电流有效值/A	80 000
电弧持续时间/s	0.3
能量利用系数	0.5
气体介质类型	SF ₆
初始温度/K	293
初始气压/MPa	0.5

仿真获得,80 kA短路电流下,GIS气室内部气压变化情况,以及终止时刻气压变化及温度分布情况分别见图5、6。

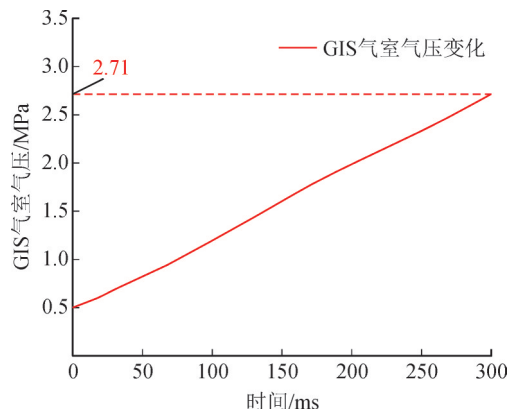


图5 80 kA 短路电流下GIS气室气压变化

Fig. 5 Variation of GIS gas chamber pressure under 80 kA short-circuit faults

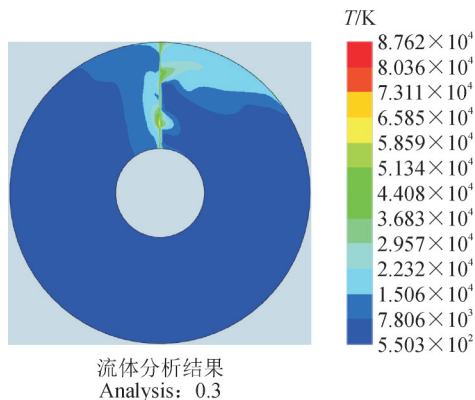


图6 燃弧终止时刻气室温度分布

Fig. 6 Pressure distribution of GIS gas chamber when faulting arc extinguish

如图5,随着燃弧时间增长,气室内部气压成比例升高,燃弧终止时刻,气室内部气压最高可达2.71 MPa。同时,随着短路电流有效值的增大,燃弧效应所造成气压升高速率也随之提高,相较于63 kA短路工况下5.71 MPa/s气压升高速率,80 kA短路工况下升高速率可达7.37 MPa/s,提高约28.54%,增长幅度与短路电流有效值增长幅度26.98%基本一致,表明短路电流有效值与气压升高速率呈现一定正相关关系。此外,由燃弧终止时刻气室温度分布可得,相较于压力传播速度,温度传播则相对需要一定过程,除故障电弧自身温度相对较高外,其他区域气体平均温度相对较低,约250℃。考虑到铝合金熔点可达600℃,且燃弧发展时间较短,气室内部温度短暂升高并不会使壳体发生融化。因而,综合上述分析结果表明,内部放电所造成温度上升可能并非造成壳体破裂的主导因素,需重点关注骤升压力的影响作用。

进一步,基于评估结果,在不考虑电弧烧蚀造成壳体许用应力下降的前提下,从壳体可耐受压力方面,对该型号1100 kV/63 kA GIS壳体结构失效风险进行评估。该气室壳体为焊接成型,其强度通常于型式试验阶段采用破坏水压试验考核,试验压力一般为设计压力3倍,考虑到其设计压力为0.65 MPa,因此,其壳体最大压力允许值一般按照1.95 MPa设计。根据评估结果,80 kA短路电流持续0.3 s时刻,气室气压最高可达2.71 MPa,超过壳体最大压力允许值,将首先由焊缝处开裂。因而,随着短路电流水平提高,建议针对其耐受压力性能开展优化,以实现壳体抗燃弧性能提升。

对于该型号母线,其气室总体呈现圆筒状,在壳体材质及几何形状不变情况下,其耐受压力性能主要受到壳体厚度及内径的共同影响,具体为随着

壳体厚度增加,壳体壁厚内部单位体积上所承受压力值将减小,且随着壳体内径增大,壳体内壁所承受单位面积上所承受压力值将减小,壳体可耐受压力及抗燃弧性能将同步提升。此外,结构设计方面,在GIS设备上增设压力释放装置,也可有效、经济性地防止内部放电故障下壳体由于气压激增破裂,实现设备运行可靠性的提升。

4 结论

1)基于改进Mayr-Schwarz电弧模型理论,提出了故障电弧热功率等效模型与燃弧内能表征方法,相较于传统电弧模型,新模型可较好反映电弧弧柱的热惯性以及温度、直径和压力的变化,并进一步,通过引入能量利用系数与理想气体状态方程,构建了燃弧演化与气室压力、温度变化的关联关系。

2)提出了考虑热-力多场耦合效应的GIS的内部燃弧效应评估方法,可适用于三相分箱结构、不同电压等级GIS设备。进而,通过与真型样机内部故障电弧试验结果比对,对评估可靠性进行了验证。比对表明,评估所获得气压变化情况与真型试验结果具备较高一致性,误差率小于1%,表明所提出评估方法及经验参数选取具备较高可靠性。

3)以某公司1100 kV/63 kA GIS设备为例,对80 kA极端故障下特高压GIS结构失效风险开展了分析。评估结果表明,相较于内部放电所造成温度变化,骤升压力可能是造成壳体破裂的主导因素。此外,80 kA短路电流持续0.3 s时刻,气室气压最高可达2.71 MPa,超过该焊接母线气室壳体最大压力允许值,将首先由焊缝处开裂,建议通过开展壳体厚度、内径优化,增设压力释放装置等措施,提升其抗燃弧性能及运行可靠性。

4)目前所采用改进Mayr-Schwarz电弧模型理论虽具有较高的应用普适性,但GIS内放放电电弧演化复杂,较难实现对其特性的真实等效,后续可在厘清放电机理基础上,对所使用电弧模型进行针对性修正,以进一步提高评估准确性及可靠性。此外,文中仅针对典型母线气室开展了燃弧效应评估,不同气室结构存在差异,燃弧演化也相应不同,建议未来研究将不同气室结构特征纳入评估考虑范畴。

参考文献:

- [1] 廖泉森,何川,张鸿皓,等. 基于短路电流约束学习的机理—数据驱动电力系统优化运行方法研究[J]. 电力系统保护与控制

- 制,2026,54(1):143-155.
- LIAO Quansen, HE Chuan, ZHANG Honghao, et al. Research on mechanism - data - driven optimal operation method for power systems based on short-circuit current constraint learning[J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(1): 143-155.
- [2] 吴科成, 吴亚雄, 陈卓. 考虑安全效能成本的短路电流抑制措施综合优化配置方法研究[J]. 高压电器, 2025, 61(5): 279-290.
- WU Kecheng, WU Yaxiong, CHEN Zhuo. Research on comprehensive optimal allocation method of short-circuit current suppression measures considering safety-performance-cost[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(5): 279-290.
- [3] 周广昊. 大型电网短路电流限制措施及择优方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2025.
- ZHOU Guanghao. Research on short - circuit current limiting measures and optimal selection methods for large power grids[D]. Changchun: Jilin University, 2025.
- [4] 秦译为, 张逢鹤, 宋如楠, 等. 新型电力系统下电弧故障诊断技术及发展趋势[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 1-9.
- QIN Yiwei, ZHANG Penghe, SONG Runan, et al. Arc fault diagnosis technology and trend of development in novel power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 1-9.
- [5] 叶中飞, 王栋, 张力, 等. ± 800 kV 输电线路短路电流分析及间隔棒安全状况评估[J]. 电测与仪表, 2025, 62(10): 31-38.
- YE Zhongfei, WANG Dong, ZHANG Li, et al. Analysis of short-circuit current and spacer safety condition assessment in ± 800 kV transmission line[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(10): 31-38.
- [6] 贾文达, 曹志伟, 王继豪, 等. GIS 操作电磁骚扰的三维全波仿真及电弧模型影响分析[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6): 134-142.
- JIA Wenda, CAO Zhiwei, WANG Jihao, et al. Effect of the arc model on electromagnetic interference caused by GIS switch operations in 3D full wave simulation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 134-142.
- [7] 施文耀. 热胀式 SF₆ 断路器的压力特性的计算探讨[J]. 高压电器, 2005, 41(3): 188-191.
- SHI Wenyao. Calculation of gas pressure characteristics in thermal expansion SF₆ GCB[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(3): 188-191.
- [8] 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备: GB/T 7674—2020[S]. 2021.
- Gas - insulated metal - enclosed switchgear for rated voltages of 72.5 kV and above: GB/T 7674—2020[S]. 2021.
- [9] 郭文元, 杨永民. 自能气吹灭弧装置的能量利用系数[J]. 高压电器, 1994, 30(3): 21-23.
- GUO Wenyuan, YANG Yongmin. Energy utilization coefficient of self-blast arc extinction device[J]. High Voltage Apparatus, 1994, 30(3): 21-23.
- [10] 刘亚坤. SF₆ 封闭式组合电器气室安全设计研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- LIU Yakun. Study on safety design of SF₆ gas insulation substation (GIS) chambers[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [11] ZHANG Xiang, PIETSCH G, GOCKENBACH E. Investigation of the thermal transfer coefficient by the energy balance of fault arcs in electrical installations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 425-431.
- [12] BESLIJA D, GORENC D, MURATOVIC M, et al. Enhanced method for pressure rise calculation in SF₆ GIS due to fault arcs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1619-1624.
- [13] 张亮, 陈丽安, 王文勇. 252 kV GIS 内部燃弧故障压升计算及壳体烧穿概率研究[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 44-51.
- ZHANG Liang, CHEN Li'an, WANG Wenyong. Calculation of pressure rise and study on enclosure burn-through probability due to internal arc faults in 252 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 44-51.
- [14] GAO Youhua, DU Hanwen, SONG Jia, et al. Study on the VFTO in 800 kV GIS based on Mayr - Schwarz arc model[C]//2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - switching Technology (ICEPE-ST). China: IEEE, 2017: 42-44.
- [15] 刘凯. 短间隙电弧热等效方法及放电下绝缘卡套热力特性分析研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- LIU Kai. Study on heat equivalent method for discharging arc in short gaps and application in the thermal - stress characteristic analysis for dielectric fitting[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [16] HOFFMANN - MUCKE H, BARON D. Current status of pressure calculation methods for the development of relief concepts in buildings in the event of arc faults in type - tested SF₆ - free switchgear[C]//28th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2025). Switzerland: IEEE, 2025: 2171-2175.
- [17] 张凯, 史峰涛, 左琪, 等. GIS 设备短路电弧效应与压力释放装置设计[J]. 电工技术, 2024(13): 102-104.
- ZHANG Kai, SHI Fengtao, ZUO Qi, et al. Short circuit arc effect of GIS equipment and design of pressure release device[J]. Electric Engineering, 2024(13): 102-104.
- [18] 张亮. 252 kV GIS 内部燃弧故障分析与壳体结构设计[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2021.
- ZHANG Liang. Internal arcing fault analysis and enclosure structural design of 252 kV GIS[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2021.
- [19] JIN Biao, CAO Hongchao, SHENG Tianyu, et al. Development of flexible piezoelectric hair-like dual-mode sensor for detection of airflow and acoustic particle velocity[C]//2023 22nd International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers). Japan: IEEE, 2023: 1575-1578.
- 高浩予(1997—), 男, 工学博士, 工程师, 主要研究方向为 GIS/GIL 设备故障演变机理(E-mail: hygaoeee@163.com)。
- 冯英(1983—), 男, 工学博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为高压开关设计、故障诊断、运行管理及试验技术(通信作者)(E-mail: fengying@epri.sgcc.com.cn)。