

330 kV GIS 外壳异常发热机理与改进措施研究

王生杰¹, 马永福¹, 马国祥², 包正红¹, 陈尧¹, 吴对平¹, 王理丽¹

(1. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 西宁 810008; 2. 国网青海省电力公司, 西宁 810008)

摘要: 气体绝缘金属封闭开关(GIS)经长期投入使用后发热缺陷突出, 其中设备外壳波纹管及其附件处异常发热较为常见。文中针对变电站 330 kV GIS 主变分支母线外壳异常发热情况, 结合精确红外测温发现发热点主要集中在波纹管本体、波纹管导流排、导流排压接螺栓、波纹管位移标尺和法兰间长拉杆等位置, 采用波纹管通流检测、解体检查和外壳入地电流检测, 分析发热故障产生原因并提出相应的处理措施。研究结果对于 GIS 外壳发热缺陷的分析、处理和预防具有一定的工程参考价值与借鉴意义。

关键词: GIS 设备; 外壳环流; 红外测温; 发热缺陷; 入地电流

Research on Enclosure Overheat Mechanism and Improvement Measures of 330 kV GIS

WANG Shengjie¹, MA Yongfu¹, MA Guoxiang², BAO Zhenghong¹, CHEN Yao¹, WU Duiping¹, WANG Lili¹

(1. State Grid Qinghai Electric Power Research Institute, Xining 810008, China; 2. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China)

Abstract: Gas insulated switchgear (GIS) has prominent heat defects after long-term use, with overheat at the enclosure bellows and its accessories of the equipment being more common. In this paper, according to the main transformer branch bus enclosure overheat of 330 kV GIS in converter substation, combined with accurate infrared temperature measurement, it is found that the hot spots are mainly concentrated in the bellows body, bellows binding bar, crimping bolt of binding bar, bellows displacement scale and long tie rod between flanges. The causes of the heat defect are analyzed and the corresponding measures are put forward by using the bellows flow-through detection, disassembly inspection and the enclosure grounding current detection. The research results have certain reference value for the analysis, treatment and prevention of GIS enclosure heat defects.

Key words: GIS; enclosure circulating current; infrared temperature measurement; heat defect; grounding current

0 引言

气体绝缘金属封闭开关(GIS)由于运行稳定、占地面积小、安全性高、清洁要求低等原因已在电力系统中得到广泛应用^[1-3]。伴随 GIS 使用量升高和电压等级提升, 其对电力系统供电可靠性和稳定性的影响日益突出, 有必要加强对 GIS 各类缺陷的分析、排查和预防。

国内外在电力系统输变电设备的带电检测技术方面已有大量研究^[4-5]。针对 GIS 的缺陷诊断, 目前常采用红外热像检测^[6]、局放的特高频及超

声波检测^[7-8]、SF₆ 气体组份及纯度检测^[9-10]、直流偏磁检测等各类检测手段, 进而有效降低了 GIS 故障率, 保障了电网的稳定运行。

异常发热是 GIS 在运行过程中出现较多的一类缺陷, 可以分为内部发热和外部发热。由于 GIS 密封性强、体积小、通流量大等特点, 设备内部散热条件不佳, 一旦内部导体接触不良容易造成内部热缺陷, 严重时可能导致设备短路、停运甚至爆炸^[11]; 外部缺陷下的局部发热最为常见, 对于三相分箱结构 GIS 常见的外部热缺陷有: 波纹管及其附件异常发热, 相间导流排异常发热, 电

流互感器导流排、外壳异常发热，外壳接地排异常发热等。其成因主要来自于设备运行时外壳产生的环流及外部回路接触不良^[12-13]，根据经验，环流的大小甚至可达到与高压导体所通电流同一数量级^[14]。这些缺陷容易加速 GIS 部件老化，降低密封性能，引起设备故障，严重威胁其安全稳定运行^[15-16]。

文中以某变电站 330 kV GIS 主变分支母线外壳发热为例，通过红外测温寻找发热点具体位置，采用波纹管通流检测、解体检查和外壳入地电流检测，分析发热故障产生原因并提出相应的处理措施。为 GIS 外壳发热缺陷的成因分析及故障处理提供借鉴和技术支撑。

1 缺陷概况

某变电站 330 kV GIS 1 号主变分支母线为为一倍半布置形式，包含 2 台断路器及出线分支母线，分支母线单相长度约 300 m，中间跨越 3 个门型桁架，其额定电流为 4 000 A、短时耐受电流为 50 kA。工程于 2013 年安装并投入运行。

全站一次设备例行带电检测时发现该站 330 kV GIS 设备外壳存在异常发热情况，经简单处理后在复测时发现异常发热仍持续存在，其中 1 号主变分支母线波纹管发热现象尤为严重。据此，相关部门开展了专项带电检测分析工作。

1 号主变分支母线采用的长拉杆波纹管补偿结构见图 1，波纹管两侧法兰之间共有 4 个铜质导流排、4 根铁质拉杆和 1 个铁质位移标尺，设计通过 4 个铜质导流排进行跨接通流。现场检测发现 1 号主变分支母线多处波纹管软连接片出现局部发热现象，大多数在 60 °C 以上，最高的超过 130 °C。

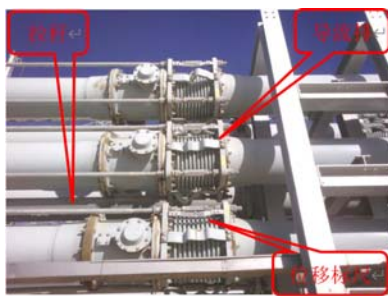


图 1 1 号主变分支母线波纹管结构图

Fig. 1 No.1 main transformer branch bus bellows structure diagram

2 现场检测

2.1 现场电流及红外检测

为判断波纹管附件发热与外壳环流的关系，对 1 号主变分支母线波纹管法兰间可能通流的位置进行了红外和电流联合测试^[17]。经过检测，发现热点温度与电流检测数据存在以下特征。

1)对该分支母线进行精确红外测温，发现共有 53 个波纹管存在异常发热点，最高热点温度为 160.2 °C(环境温度为-14.2~4.8 °C，连续多日测量)，典型发热图像见图 2。发热点主要集中在波纹管导流排、导流排压接螺栓、波纹管位移标尺和法兰间长拉杆等位置。

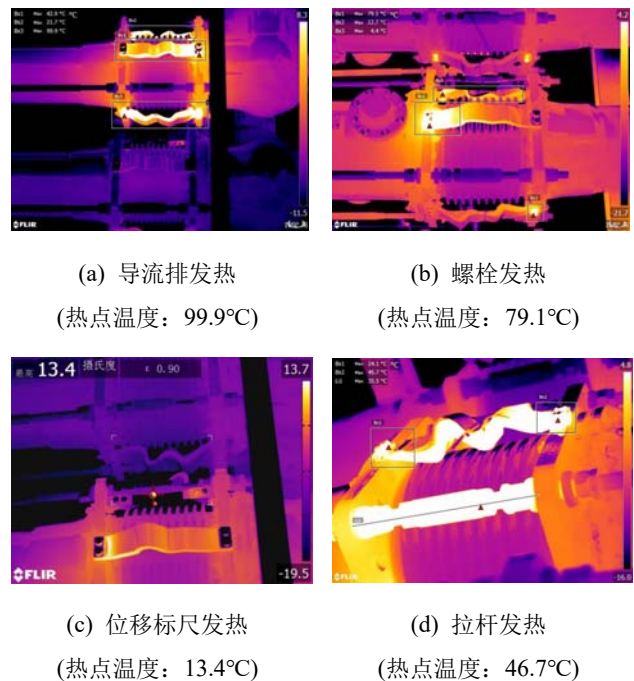


图 2 典型发热图像

Fig. 2 Typical heating image

2)热点温度与母线负荷电流成正相关关系^[1]。波纹管法兰间 4 个导流排中的电流之和与负荷电流值在同一数量级，但前者幅值较小，现场检测中 C24 波纹管负荷电流为 1 650 A 时，导流排合计电流为 1 578 A，占比高达 96%，为现场检测最高值。

3)同一波纹管各导流排通流不均衡。为表征 4 个导流排间的电流幅值偏差，引入波纹管电流偏差率概念进行分析，偏差率=导流排最大电流差值/平均电流值，偏差率越小表明电流越均衡，偏差率为 0 时电流绝对均衡。根据通流检测结果

对各波纹管电流偏差率进行统计，发现偏差率在 1.0 及以上的波纹管数量为 25 个，占比 52%，见图 3。表明多数波纹管导流排存在通流不均的情况，检测发现电流越大导流排发热越明显。

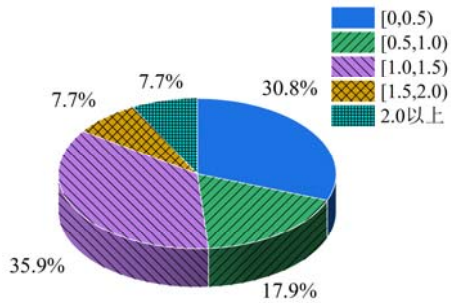


图 3 各波纹管电流偏差率

Fig. 3 Current deviation rate of each bellows

4)外壳环流在波纹管与导流排跨接处通流不畅通。拉杆和位移标尺均为铁材质并且拉杆与法兰之间、标尺与卡块之间接触电阻较大，二者通流能力较螺栓压接的铜材质导流排小。现场检测发现拉杆电流大于等于 50 A 的波纹管数量为 4 个，占比 7.5%，见图 4，其中最大拉杆电流为 318.4 A。测得最大位移标尺电流为大于等于 1 A 的波纹管数量为 1 个，占比 2%，表明外壳环流在波纹管处流通受阻，从而选择高阻态拉杆和位移标尺通流。

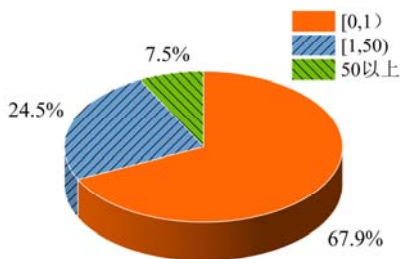


图 4 各波纹管拉杆电流

Fig. 4 Each bellows tie rod current

2.2 解体检查结果

根据上述电流检测结果，初步判断波纹管及其附件发热的主要原因为外壳环流在波纹管与导流排跨接处通流不畅、在导流排间通流不均。为进一步分析通流不畅和通流不均的原因，对发热较为典型的 C19 波纹管导流排进行了解体检查，发现如下典型问题。

1)导流排与波纹管法兰压接处法兰表面漆面

打磨宽度为 5 cm，导流排压接面宽度为 7 cm，见图 5。法兰漆面打磨宽度不够，并且漆面厚度较厚，导致导流排与法兰面未有效接触，会造成该部位接触电阻增大。

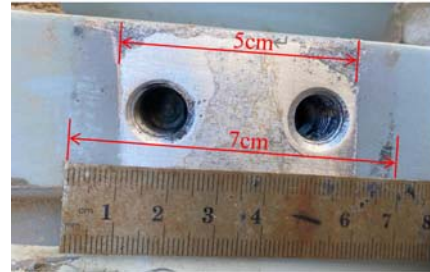


图 5 导流排与法兰接触面法兰一侧

Fig. 5 Flange side of the contact surface between the binding bar and the flange

2)导流排与波纹管法兰压接处导流排内表面和法兰内表面氧化锈蚀现象严重，前期检修处理时喷涂的导电液参杂氧化物在接触面形成明显堆积痕迹，也会造成该部位接触电阻增大，见图 6。



(a) 导流排发热

(b) 螺栓发热

图 6 压接面氧化锈蚀

Fig. 6 Corrosion of the crimping surface

3)导流排与法兰压接面呈点状接触，接触面积严重不足、接触电阻增大，会导致通流能力急剧下降，见图 7。



(a) 1 号导流排北侧

(b) 1 号导流排南侧

图 7 压接面点状接触

Fig. 7 Point contact of the crimping surface

4)导流排与法兰通过两颗螺栓和一块铁质垫板压接，见图 8。现场安装及检修处理时未使用力矩扳手，两颗螺栓紧固力矩不一致时，容易造成压接质量下降，进而导致接触电阻增大。



图 8 压接位置图

Fig. 8 Crimping position diagram

5)螺栓未使用弹簧垫圈, 在设备运行状态下外壳长期振动时容易造成螺栓松动, 现场发现多处螺栓松动的情况, 这也是部分压接面经过检修处理后再次松动发热的主要原因。

2.3 外壳入地电流检测

现场对 1 号主变分支母线所有滑动支撑构架和钢构架与外壳接触情况进行了检查, 发现外壳与钢构架之间为直接搭接或经金属垫板连接, 电气通路导通; 外壳与滑动支撑钢构架间设计安装有绝缘橡胶, 但现场发现多处橡胶掉落导致外壳漆皮被磨破后外壳与构架电气导通的情况, 见图 9。即外壳与地电位钢构架间存在多点无序接地现象。



图 9 外壳在滑动支撑构架处漆皮被刚蹭

Fig. 9 The patent leather of the enclosure has scratched against the sliding support frame

外壳多点无序接地, 接地位置钢构架中势必会有电流, 三相短接接地排入地电流势必会增大; 局部环流过大, 可能会导致同一负荷下同一位置不同相波纹管导流排的电流之和不同。据此, 现场开展了上述两个推测的验证工作。

1)对 1 号主变分支母线 15 个钢构架共计 21 处接地点进行入地电流检测, 结果见图 10, 从图 10 发现钢构架总入地电流大于 50 A 的共有 8 处, 占比 38.1%, 测得最大入地电流为 310.5 A。

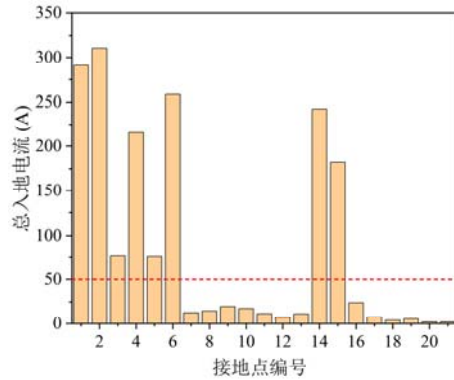


图 10 1 号主变分支母线钢构架接地点入地电流检测

Fig. 10 No.1 main transformer branch bus steel frame grounding current detection

2)对 1 号主变分支母线 14 处滑动支撑构架入地电流进行检测, 发现滑动支撑钢构架总入地电流大于 50 A 的共有 1 处, 占比 7%, 其中出线套管北 1 滑动支撑构架与 C 相外壳间橡胶皮脱落、外壳漆皮被磨破, 此处入地电流达到 78.7 A, 其余橡胶皮完好的位置入地电流均为 mA 级。

3)分别对 1 号主变分支母线 7 处短路接地排和 2 号主变分支母线 4 处短路接地排进行入地电流检测, 结果见图 11, 发现 1 号主变分支母线短路接地排入地电流范围为 2.27~93.9 A, 2 号主变分支母线短路接地排入地电流范围为 79.8 mA~57.6 A。1 号主变间隔短路接地排入地电流幅值整体较 2 号大。

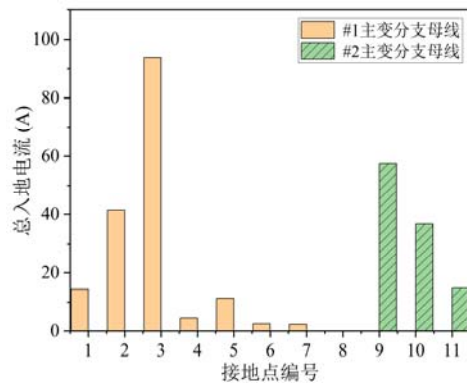


图 11 1 号和 2 号主变分支母线短路接地排入地电流检测

Fig. 11 No.1 and No.2 main transformer branch bus Short-circuit ground bar grounding current detection

4)在同一负荷(三相导体电流近似一致)下对同一位置不同相波纹管导流排电流之和进行检测, 不同波纹管各相导流排电流之和占负荷电流的比重见图 12。发现某一时刻 21 号波纹管 A 相

导流排电流之和(拉杆等通流幅值为 mA 级,忽略不计)的幅值占负荷电流幅值的比重比 B 相大 17%, 此为现场检测到的比重差最大值; 某一时刻 11 号波纹管 C 相导流排和拉杆电流之和为 1 192 A, 而此刻负荷电流为 1 100 A 左右, 波纹管通流幅值超过了负荷电流。以上两现象表明 A21 和 C11 波纹管均处于局部环流较大的网络中。

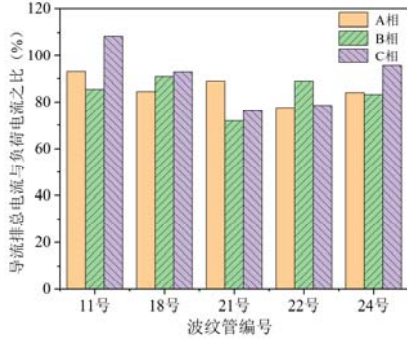


图 12 不同波纹管各相导流排电流之和占负荷电流的比重

Fig. 12 The ratio between the current of each phase of different bellows binding bar to the load current

3 理论分析

3.1 波纹管导流排通流仿真

波纹管导流排在电热耦合作用下产生温升, 电场设置中考虑材料电阻率随温度的变化、集肤效应、导流排和法兰压接面接触电阻, 而忽略邻近效应^[18]; 固体传热场中考虑材料导热系数、热膨胀系数、恒压热容随温度的变化, 以及焦耳热源与压接面压力影响下的接触热阻, 由于导流排采用非导磁材料, 涡流远小于载流^[18], 热源中忽略磁场作用下的涡流损耗。电场影响固体传热场中的焦耳热源, 而热场影响电应力分析中的材料电阻率, 因此电场与热场为双向耦合关系, 见图 13。

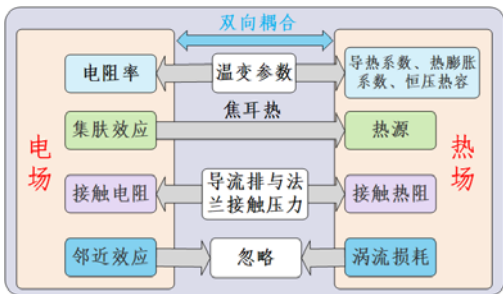


图 13 耦合仿真流程

Fig. 13 Coupled simulation flow

依据 330 kV 的 GIS 主变分支母线导流排及两侧法兰的真型尺寸, 在有限元软件中构建几何模型, 导流排编号为 1-4 号, 见图 14。其中法兰材料为 6061 铝合金, 导流排材料为纯铜。模型边界条件类型见表 1。

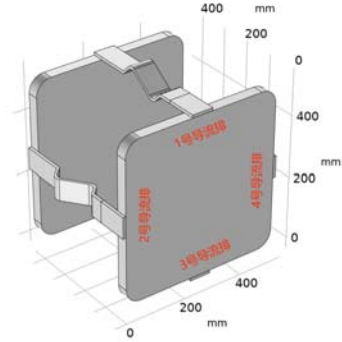


图 14 仿真模型

Fig. 14 Simulation model

表 1 模型边界条件类型

Table 1 Type of model boundary conditions

物理场	接触边界	非接触边界
电场	接触电阻	两侧法兰面设置电流密度, 其他边界为电绝缘
热场	接触热阻	热对流、热辐射

为研究导流排通流大小与发热之间的关系, 对模型施加不同大小的电流, 得到导流排最高温升与负荷电流的关系见图 15。验证了热点温度与母线负荷电流成正相关关系, 进一步表明电流过大是导致波纹管导流排发热的直接成因。

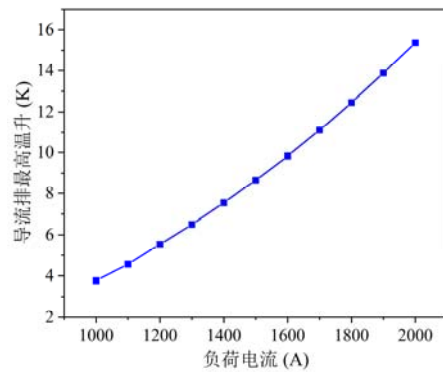


图 15 导流排最高温升与负荷电流的关系

Fig. 15 Relationship between binding bar maximum temperature rise and load current

以施加 2 000 A 电流情况为例, 分析四个导流排的电流以及温升的分布规律。正常情况下, 导流排的温升分布见图 16, 此时导流排和法兰压

界面接触良好,且两者表面均无严重的氧化锈蚀现象,即各导流排电导率及各压接面的接触压力相同。由图 16 可知,导流排在中部弯曲部位温升较高,4 个导流排之间的温升分布及大小未有明显差别,最高温升均为 15.4 K。

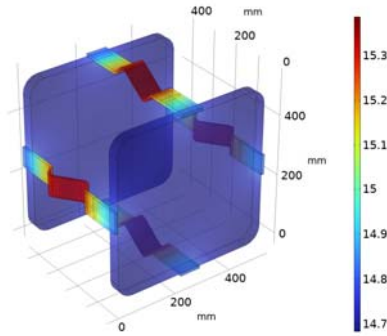


图 16 正常情况下导流排温升分布

Fig. 16 Binding bar temperature rise distribution under normal condition

若 1 号导流排由于法兰漆面打磨宽度不够、压接面接触面积不足或螺栓松动等原因造成接触电阻增大,则该导流排压接面的接触压力减小,其余导流排接触压力不变,此时各导流排的温升分布见图 17。1 号导流排最高温升为 16.9 K,其余导流排最高温升为 20 K,各导流排温升相较正常情况均有所升高,且 2、3、4 号导流排上升幅度更大。

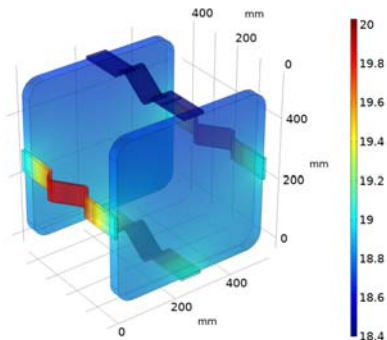


图 17 接触压力变化时导流排温升分布

Fig. 17 Binding bar temperature rise distribution when the contact pressure changes

若 1 号导流排由于表面氧化锈蚀现象严重等原因造成电导率减小,其余导流排电导率保持不变,此时各导流排的温升分布见图 18。1 号导流排最高温升为 18.4 K,其余导流排最高温升为

19.8 K,各导流排温升相较正常情况均有所升高,且 2、3、4 号导流排上升幅度更大。

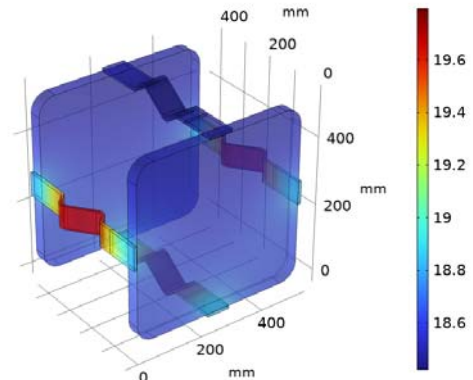


图 18 电导率变化时导流排温升分布

Fig. 18 Binding bar temperature rise distribution when the conductivity changes

正常情况、1 号导流排接触压力变化以及电导率变化情况下的波纹管导流排电流大小及偏差率见表 2。当 1 号导流排压接面的接触压力减小时,流过该导流排的电流小于正常情况,电流会选择其余接触电阻相对较小的导流排流过,进而导致通流不均衡,电流偏差率增大,剩余导流排发热明显。导流排发热会加快材料热老化,造成表面氧化锈蚀现象,减小电导率,同样引起通流不均,致使发热更加严重。

表 2 不同情况下导流排的电流大小及偏差率

Table 2 Current magnitude and deviation rate of binding bar under different conditions

情况	正常运行	接触压力改变	电导率改变
1号导流排 电流/A	498.46	350.68	381.03
2号导流排 电流/A	498.46	547.51	537.44
3号导流排 电流/A	501.26	550.60	540.46
4号导流排 电流/A	501.83	551.22	541.07
偏差率	0.006 7	0.400 0	0.320 0

导流排电流偏差率随 1 号导流排电导率变化的关系见图 19,电流偏差率随导流排电导率的减小而线性增大;导流排电流偏差率随 1 号导流排与法兰接触压力变化的关系见图 20,电流偏差率与接触压力呈负相关,两者近似呈指数关系。

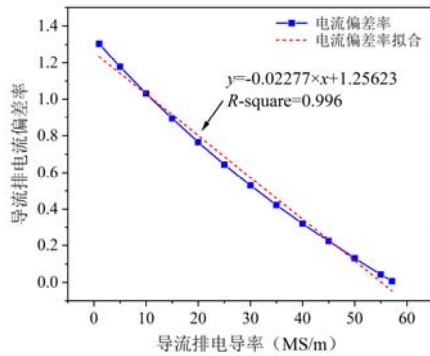


图 19 导流排电流偏差率随电导率变化的关系

Fig. 19 The relationship between the current deviation rate of the binding bar and the conductivity

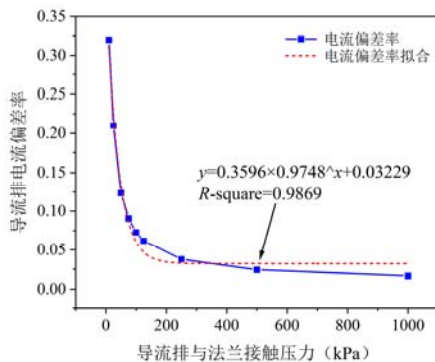


图 20 导流排电流偏差率随接触压力变化的关系

Fig. 20 The relationship between the current deviation rate of the binding bar and contact pressure

总结波纹管现场电流检测、红外检测及导流排通流仿真结果可知，导流排和法兰压面接触电阻增大，导流排电导率减小导致外壳环流在波纹管与导流排跨接处通流不畅，进而导致波纹管处发热。通流不畅会造成：一是螺栓等接触部位发热；二是电流从拉杆和位移标尺等高阻部位流过，进而导致该部位发热；三是电流会选择阻值相对较小的导流排流过，进而导致通流不均衡，电流越大的导流排发热越明显。

3.2 外壳多点无序接地致热分析

将运行中的 1 号主变分支母线外壳等效为导线，其接地示意图见图 21，该结构采用多点短路接地方式进行接地，全分支共有 8 个短路连接板，其中 7 个在短接三相外壳后接地，1 个仅短接外壳但未接地，见图 22。

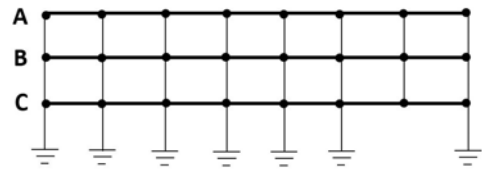


图 21 1 号主变分支母线外壳接地示意图

Fig. 21 No. 1 main transformer branch bus enclosure grounding diagram



图 22 1 号主变分支母线 7 号波纹管处短接板未接地

Fig. 22 No. 7 bellows short-circuit board of the No. 1 main transformer branch bus is not grounded

由于母线外壳每隔一段距离加装了相间短接板，每相母线的外壳又是全连式的，在三相平衡的条件下，若不考虑外壳环流损耗，所有的外壳电流都可以通过另两相外壳返回，即三相环流在短接板处抵消，理论上没有不平衡的感应电流经短接板互连后的接地引线流入大地^[19-20]。但实际运行过程中在考虑外壳环流损耗的情况下^[21]，三相外壳环流在短接板处会形成不平衡电流，该不平衡电流会在母线外壳短接后的接地引下线种产生入地电流，幅值相对较小^[22]。

外壳多点无序接地，会打破原有外壳环流平衡状态，使得“外壳—短路接地排—地网”构成的电流回路网络极其复杂。由于环流本身带有相位角且相角差不固定，多个环流的叠加会造成电流回路网络内部局部环流过大，严重时超过波纹管导流排的通流能力，导致发热现象发生。

为分析外壳多点无序接地情况下入地电流大小及局部环流对波纹管的致热作用，构建的仿真模型见图 23。仿真得到各无序接地点处的入地电流大小见图 24，有三处接地点入地电流超过 100 A，其中 A 相 5 号波纹管无序接地点处入地电流最大，为 247.3 A。仿真结果与图 10 现场钢构架接地点入地电流检测结果相似。部分波纹管处于

局部环流过大的网络中, 无序接地前后各波纹管通流大小及各自导流排的温升情况(假设无电流偏差)见表 3。

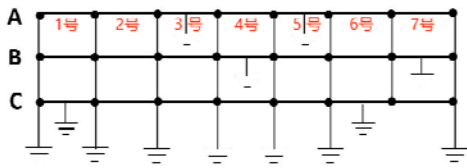


图 23 外壳多点无序接地示意图

Fig. 23 Enclosure multi-point unordered grounding diagram

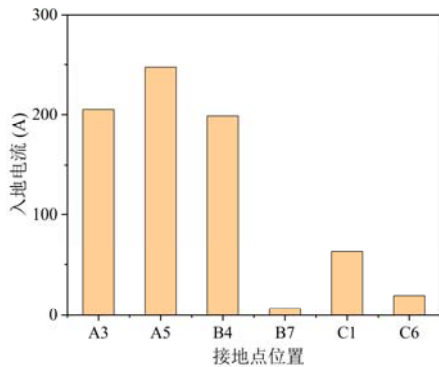


图 24 外壳无序接地点处入地电流

Fig. 24 Enclosure unordered grounding current

表 3 无序接地前后波纹管通流及温升情况

Table 3 Current and temperature rise of bellows before and after unordered grounding

波纹管位置	正常接地	无序接地	导流排温升/K
	电流/A	电流/A	
B相4号	980	1671	7.12
C相4号	506	948	2.47
A相3号	1 179	1 627	4.84
C相2号	575	1 027	2.81

由仿真结果可知, 1 号主变分支母线存在多处外壳与钢构架直接接地的情况, 导致外壳多点无序接地, 打破电流网络平衡、造成外壳局部环流增大, 致使波纹管及其附件发热。

4 处理措施

1)针对压接面接触电阻过大问题, 可对法兰漆面、法兰和导流排对接面进行深度打磨, 考虑导流排与外壳法兰材质不同, 可在电气接触面增加铜铝复合垫和喷涂导电膏, 确保导流排与法兰完全有效接触, 以减小接触电阻。同时建议使用

防松垫进行安装, 以固定力矩对螺栓进行紧固, 以免后期松动^[23]。处理前后效果比对见表 4。处理后波纹管电流偏差率减小 60%, 外壳环流在导流排间通流更加均衡, 避免了某些导流排由于电流过大造成发热。

表 4 C19 波纹管处理前后效果比对

Table 4 Comparison of C19 bellows before and after treatment

检测位置	处理前		处理后		效果
	电流	是否发热	电流	是否发热	
1号导流排	1 107.0 A	是	395.0 A	否	减小64%
2号导流排	21.9 mA	否	518.0 A	否	升高
3号导流排	787.0 mA	否	82.6 mA	否	减小90%
4号导流排	103.0 A	否	464.0 A	否	升高
偏差率	3.7		1.5		减小60%

2)针对 1 号主变分支母线外壳在刚构架、滑动支撑等处多点无序接地问题, 建议对汇流排与 GIS 母线法兰连接面进行打磨处理, 适当增加三相汇流接地排^[24], 增加外壳与刚构架之间的绝缘垫片, 减小外壳感应电流的不平衡, 避免局部环流过大。同时现场未接地的外壳短接板必须按要求接地。

需要注意, GIS 母线两端(出线套管、断路器侧)汇流接地排流经的感应电接近负荷电流, 不可拆除处理。如拆除将产生较高的感应电压, 危害人身安全。在一次停电的情况下, 方可拆装处理 GIS 母线两端(出线套管、断路器侧)三相汇流接地排流。

5 结论

文中针对 330 kV GIS 分支母线外壳存在异常发热现象, 深入分析发热成因, 并针对性地提出相应处理措施, 对于 GIS 外壳发热缺陷的分析、处理和预防具有一定的参考价值与借鉴意义。得到以下结论:

1)红外测温结果表明发热点主要集中在导流排、压接螺栓、位移标尺和法兰间长拉杆等位置。导流排在中部弯曲部位温升较高, 正常情况下各导流排温升无明显差别。电流偏差率随导流排电导率的减小而线性增大; 与压接面接触压力呈负

相关,两者近似呈指数关系。外壳多点无序接地时,接地位置钢构架及短路接地排入地电流增大;局部环流过大导致同一负荷下同一位置不同相波纹管导流排电流之和不同。

2)异常发热的主要原因是法兰漆面打磨宽度不够、压接面接触面积不足或螺栓松动等原因造成接触电阻增大,导流排表面氧化锈蚀现象严重造成电导率减小,致使外壳环流在波纹管与导流排跨接处通流不畅、在导流排间通流不均,电流越大的导流排及其附件发热越明显。分支母线外壳多点无序接地,打破电流网络平衡、造成外壳局部环流增大,致使波纹管及其附件发热。

3)针对发热缺陷,可对法兰漆面、法兰和导流排对接面进行深度打磨、增加铜铝复合垫并喷涂导电膏,使用防松垫圈以固定力矩对螺栓进行紧固的措施降低压接面接触电阻和导流排电阻率,处理后波纹管电流偏差率减小60%,外壳环流在导流排间通流更加均衡,避免了某些导流排由于电流过大造成发热。对汇流排与GIS母线法兰连接面进行打磨处理,适当增加三相汇流接地排等方式可避免局部环流过大。

参考文献:

- [1] 黄孟丹,肖纯,杨芷宁,等. GIS设备发热研究进展[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 24-33.
HUANG Mengdan, XIAO Chun, YANG Zhining, et al. Research progress of GIS equipment heating[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 24-33.
- [2] 胡智莹,耿秋钰,魏来,等. 直流GIS/GIL中驱赶电极与微粒陷阱的协同抑制作用及优化设计方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(12): 3338-3349.
HU Zhiying, GENG Qiuyu, WEI Lai, et al. Synergistic inhibitory effect and optimal design method of driving electrode and particle trap in DC GIS/GIL[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(12): 3338-3349.
- [3] 王超,李文栋,陈泰然,等. 550 kV GIS盆式绝缘子小型化设计(一)——几何形状优化[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1847-1855.
WANG Chao, LI Wendong, CHEN Tairan, et al. Compact design of 550 kV Basin-Type spacer in gas insulated switchgear (part I) —— structure optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1847-1855.
- [4] 王少华,叶自强,梅冰笑. 输变电设备在线监测及带电检测技术在电网中的应用现状[J]. 高压电器, 2011, 47(4): 84-90.
WANG Shaohua, YE Ziqiang, MEI Bingxiao. Application status of online monitoring and live detection technologies of transmission and distribution equipment in electric network[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 84-90.
- [5] 王永泉,杨朝旭,周淳,等. 应用LabVIEW软件开发的气体绝缘金属封闭开关设备声振联合检测系统[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(6): 131-140.
WANG Yongquan, YANG Chaoyu, ZHOU Chun, et al. A GIS acoustic and vibration joint detection system developed via LabVIEW software[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(6): 131-140.
- [6] 邵进,胡武炎,贾风鸣,等. 红外热成像技术在电力设备状态检修中的应用[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 126-129.
SHAO Jin, HU Wuyan, JIA Fengming, et al. Application of infrared thermal imaging technology to condition-based maintenance of power equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 126-129.
- [7] 曾雄杰,刘旭明. GIS设备局放类型图谱以及现场局放测试诊断图谱的应用[J]. 高压电器, 2013, 49(11): 31-36.
ZENG Xiongjie, LIU Xuming. Illustrated catalogue application of PD Types and on-site diagnostic of PD test in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 31-36.
- [8] 刘学,李鹏. 基于声电综合的GIS设备带电检修技术研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(32): 169-172.
LIU Xue, LI Peng. Research on on-line maintenance technology of GIS equipment based on acoustic and electrical synthesis[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(32): 169-172.
- [9] 颜湘莲,王承玉,宋杲,等. 气体绝缘开关设备中SF₆气体分解产物检测与设备故障诊断的研究进展[J]. 高压电器, 2013, 49(6): 1-9.
YAN Xianglian, WANG Chengyu, SONG Gao, et al. Recent progress in detection of SF₆ decomposition products and fault diagnosis for gas insulated switch-

- gears [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(6): 1-9.
- [10]雷圣峰. 基于超高频法和 SF₆ 分解产物浓度的 GIS 局部放电诊断方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
LEI Shengfeng. Research on GIS partial discharge diagnosis method based on UHF method and SF₆ decomposition product concentration[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [11]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(北京), 2018.
XU Hangyao. Live detection of over-heated bus contact in GIS and state assessment technology[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [12]宋东波, 黄洁, 陈庆涛, 等. 几起 GIS 外部导流排异常发热的分析[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 248-252.
SONG Dongbo, HUANG Jie, CHEN Qingtao, et al. Analysis of several external binding bar overheat of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 248-252.
- [13]翁钰荃, 林明伟, 梁桂新. GIS 设备常见发热缺陷的分析及其预防措施[J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(12): 255-256.
WENG Yuquan, LIN Mingwei, LIANG Guixin. Analysis of common heat defects of GIS equipment and its preventive measures[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2021, 11(12): 255-256.
- [14]刘龙, 魏建巍, 江经华, 等. 基于多物理场的三相共箱型隔离开关温度场仿真研究[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 86-92.
LIU Long, WEI Jianwei, JIANG Jinghua, et al. Simulation study on temperature field of three-phase enclosed disconnecter based on multi-physics coupling[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 86-92.
- [15]刘帆, 汪洋, 白尧. GIS 外部典型发热机理和防治措施研究[J]. 湖北电力, 2015, 39(10): 12-14.
LIU Fan, WANG Yang, BAI Yao. Research on mechanism and restraining method of GIS typical external overheat[J]. Hubei Electric Power, 2015, 39(10): 12-14.
- [16]王文洪, 何满棠. 252 kV GIS 设备罐体发热缺陷的原因分析[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 148-150.
WANG Wenhong, HE Mantang. Analysis of tank heating fault of 252 kV GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 148-150.
- [17]何迪, 王泓学, 张思宾, 等. 基于红外热像检测的 GIS 设备发热缺陷分析[J]. 电工技术, 2021(16): 72-74.
HE Di, WANG Hongxue, ZHANG Sibin, et al. Analysis of heating defects of GIS equipments based on infrared thermographic inspection[J]. Electric Engineering, 2021(16): 72-74.
- [18]关向雨. 气体绝缘母线接头接触失效机理研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
GUAN Xiangyu. The study on contact failure mechanism of gas insulated bus connector[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015.
- [19]张亚婷. 800 kV 分体结构 GIS 母线外壳环流特性的研究[J]. 电磁避雷器, 2008(6): 31-35.
ZHANG Yating. Characteristics of the circulating current on 800 kV insulated phase bus enclosure[J]. Insulators and Surge Arresters, 2008(6): 31-35.
- [20]徐国政, 关永刚. GIS 和 GIL 外壳环流及损耗的简化分析和估算[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 247-249.
XU Guozheng, GUAN Yonggang. Simplified analysis and calculation on circulating current and power loss in enclosure of GIS and GIL[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 247-249.
- [21]赵明, 李靖翔, 赖皓. 气体绝缘全封闭组合电器环流发热原因分析及改进措施研究[J]. 电工技术, 2020(5): 109-110.
ZHAO Ming, LI Jingxiang, LAI Hao, et al. Study on the reason of circulating heating in gas insulated fully-enclosed composite electrical apparatus and improvement measures[J]. Electric Engineering, 2020(5): 109-110.
- [22]郭磊, 范冕, 姚裕安. 550 kV GIS 外壳感应环流特性的仿真分析[J]. 湖北工业大学学报, 2012, 27(1): 74-78.
GUO Lei, FAN Mian, YAO Yu'an. Simulation analysis on the circulating current in bus enclosure of the 550 kV GIS[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2012, 27(1): 74-78.
- [23]王彦强. GIS 设备发热故障与预防措施分析[J]. 电子技术, 2022, 51(9): 298-299.
WANG Yanqiang. Analysis of GIS equipment heating fault and preventive measures[J]. Electronic Technology, 2022, 51(9): 298-299.
- [24]陈宁, 姜鑫鑫, 周声华, 等. GIS 外壳感应电流的

影响及典型发热案例分析[J]. 电力与能源, 2023, 44(2): 127-128.
CHEN Ning, JIANG Xinxin, ZHOU Shenghua, et al.
Analysis on the influence of induced current on GIS shell and typical heating cases[J]. Power & Energy, 2023, 44(2): 127-128.

王生杰(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事电气试验及带电检测工作(E-mail: 601989834@qq.com)。

马永福(1994—), 男, 工程师, 主要从事变电设备诊断试验及技术创新工作(通信作者)(E-mail: 1069671957@qq.com)。