

[GIS]

一起水电站550 kV GIS设备接地异常原因分析及改进措施研究

文/高小武 张震锋 张晓菁 刘力文 张咪
西安西电开关电气有限公司

GIS正常运行时，外壳上会产生相应的环流，引起GIS设备局部发热，加速绝缘老化，缩短开关设备运维周期，产生安全隐患，特别是GIS外壳与接地网回路中感应的入地电流威胁设备安全。通过对一起水电站550 kV GIS运行设备出现的接地问题进行基理分析，确定问题原因，提出解决方法并进行现场改进，并提出定期对现场设备进行检查，尽早发现问题，消除隐患，确保设备安全运行。

GIS设备是将高压开关设备的功能元件封闭在气体绝缘封闭的金属壳体内，内充SF₆或其他气体作为绝缘及灭弧介质，因占地面积小、运行可靠性高而广泛应用于我国电力系统各电压等级的变电站中。随着GIS开关设备的大量应用以及用户对电力系统使用安全性、稳定性以及连续性要求的提高，对GIS运行工况越来越重视，尽量减少GIS故障的发生。GIS设备在运行中，主回路通过一定电流时，GIS外壳上会产生感应电流。感应电流的磁场抵消外壳外部的导体电力磁场，使电磁对外部环境的影响减到最小。但另一方面，在外壳与接地网回路中感应的环流导致外壳设备局部发热，产生很大的系统损耗，减小设备使用寿命。同时在三相感应电流不平衡的情况下，导致外壳产生明显的感应电势，威胁设备运行安全^[1]。

根据GIS变电站的运行经验，许多GIS设备的故障往往都与其外壳的不平衡环流有关^[2]。本文就一起水电站GIS运行过程中出现的接地问题进行分析，给出相应的处理办法及解决措施。

GIS外壳感应电流产生原理

对于GIS开关设备因内充绝缘气体，外壳与其内部导体间的距离相对较小，两者的电磁耦合很强。紧凑性结构使得GIS外壳与内部对应导体构成一个空心变压器，导体为一次侧，外壳为二次侧，GIS正常运行时外壳产生明显感应电势。理论上三相工作电流是平衡的，但实际上GIS外壳总会产生不平衡感应电流。尤其当系统发生非全相的故障时，GIS外壳的不平衡感应电流更明显。

一般来说，GIS外壳产生的环流有两种路径，一种是GIS外壳与地网通过架台、接地引线等构成的回路产生感应电流，如图1所示。

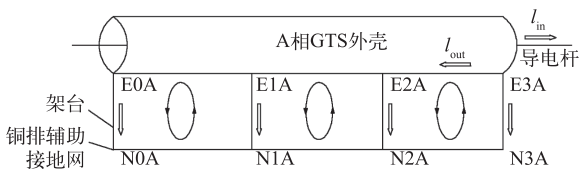


图1 外壳与地网构成的回路

另一种是GIS相间外壳通过短接排构成的回路

产生感应电流，如图2所示。

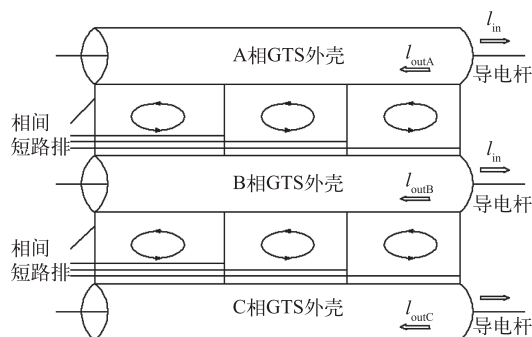


图2 GIS相间外壳构成的回路

一起水电工程GIS设备接地问题描述

某水电站500 kV GIS设备，对运行设备进行常规检测时，发现出线GIS母线外壳三相短接排红外测温显示温度过高，不满足标准规定的GIS外壳温升要求。GIS母线外壳设计温升为30 K（环境温度不超过40℃时），外壳最高温度不能超过70℃。该情况如不及时处理，长期温度过高可能导致绝缘件老化，密封圈性能下降，设备漏气等缺陷。温度统计及测试见表1。

图3、图4为某I线及II线中GIS现场红外测温显示温度、高温位置及对应简图。

表1 温度测试结果

线路名称	短接排过渡铝板与法兰连接点最高温度/℃	过渡铝板与短路排连接点最高温度/℃
I线位置	145	145
II线位置	130	198
相邻站III线位置	40	45

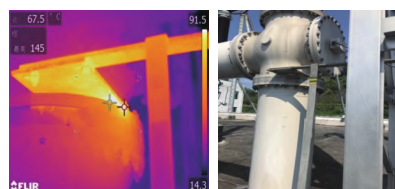


图3 I线红外测试

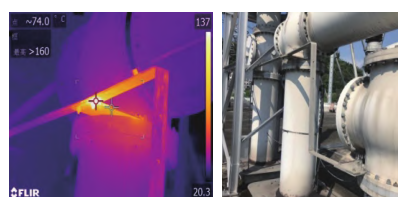


图4 II线红外测试

针对I线、II线及相邻站III线现场实物及结构对比，该工程I线、II线三相短接排过渡铝板与外壳法兰接触面积明显偏小。相邻站III线三相短接排过渡铝板与外壳法兰接触面积大。现场接地板数量统计见表2。

表2 相邻站与本站接地板及接触面积对比

接地对比	相邻站III线	本站I线	本站II线
短接排过渡铝板数量	4	1	1
短接排过渡铝板与法兰面接触面积 (接触面数量×接触面×厚度) mm ²	4×2×16×10=1 280	1×2×16×10=320	1×2×16×10=320

接地异常原因分析

由于GIS每一段外壳导体与相邻外壳导体构成的回路不同，每一段的感应电流值都不相同，不同位置接地引下线的入地电流值大小也不相同。此次主要针对I线、II线出现高温处进行仿真计算，因为I线、II线处结构相同，仅需计算I线即可。根据计算原理图，利用EMTP程序建立一个等效三维模型进行综合分析计算，计算中涉及的资料及参数仿真计算结果为：①根据现场550 kV GIS接地布置图；②额定电流为4 000 A；③额定短时耐受电流为63 kA；④短路电流持续时间为3 s。

1. GIS外壳感应电流仿真计算

根据变压器原理：GIS的母线流过电流 I_{in} 时，在其外壳和接地网构成的回路会产生感应电流 I_{out} 。将母线电流 I_{in} 看作变压器的一次电流；感应电流 I_{out} 看作变压器的二次电流。根据现场主接线布置，可得图5的等效电路。

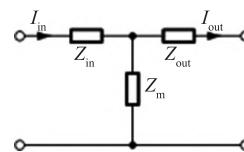


图5 GIS感应电流的等效模型

同时在变电站主接线中，GIS成多点接地的形

式，等效模型为一次穿芯一匝，二次多绕组级联的等效变压器，如图6所示。

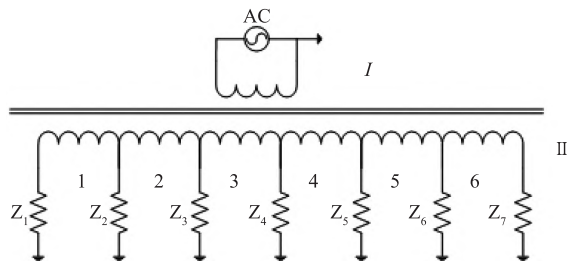


图6 多绕组级联的变压器电路

根据等效变压器原理，计算各等效元件参数，利用EMTP软件建立电路仿真模型，外壳感应仿真计算结果见表3。

表3 外壳感应电流计算结果

外壳回路编号	实际对应位置	感应电流/A				接触电压/V
		外壳电流	A相	B相	C相	
1	出线套管短接排	1 275.7	1 224.2	1 075.9		0.8
2	短接后接地	----		195.7		0.1
3	分支母线短接排		348.4	327.1		0.2
4	短接后接地			67.8		0.1

由表3可知，外壳感应电流最大为1 275.7 A，短接排上最大感应电流为1 224.2 A，入地电流最大为195.7 A，接触电压最大为0.8 V。

2. 短路故障时的接地计算

在实际情况中，GIS的故障基本可分为三类：一是GIS内部短路故障；二是靠近GIS的外部短路故障；三是远离GIS的外部故障。对于GIS的外部故障，由于分析时涉及的参数太多，因此分析起来比较复杂，而且对GIS的影响没有内部故障大，因此仅研究GIS内部短路故障。根据现场接地情况，由于GIS内分段接地，对于故障段采用图3～图7的形式表征；而对故障段之外的非故障段，这时外壳及接地系统感应本段流过的、部分的短路电流，这部分仍可采用变压器等效的形式计算。

计算模拟GIS内部发生短路故障时引起的接触电压。短路电流取63 kA。建立EMTP仿真电路计算，结果见表4。

从表4可知，短路故障时接触电压在人体可承受

范围内，最大为23.1 V；流过短接排的最大电流达到37.8 kA。

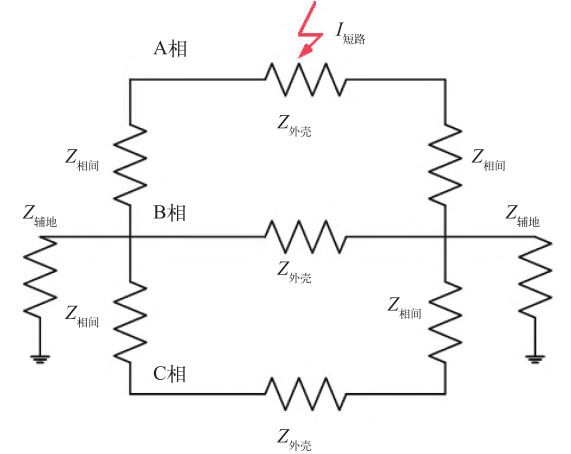


图7 GIS短路段的电路等效图

表4 GIS短路故障时的接地计算

外壳回路编号	实际对应位置	A相接触电压/V	感应电流/kA
1	出线套管短接排	23.1	37.8
2	短接后接地	12.5	20.4
3	分支母线短接排	15.4	23.5
4	短接后接地	8.8	13.7

3. 允许的最大接触电压

按照GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》要求，GIS正常运行时，外壳接触电压最大值不得超过24 V的安全电压值；发生短路故障时外壳上的电位降一般不应超过100 V。

$$E = \frac{174 + 0.17 \rho_s C_s}{\sqrt{t_s}} \geq \frac{174}{\sqrt{t_s}} \approx 100 \text{ V} \quad (1)$$

式中，E为接触电压允许值，V； ρ_s 为地表的电阻率； C_s 为表层衰减系数； t_s 为接地故障电流持续时间，3 s。

由以上接触电压的计算可知，短路故障时GIS上出现的最大接触电压为23.1 V，在允许的范围内。

3. 接地导体横截面积

接地导体横截面积根据GB/T 50065—2011《交流电气装置接地设计规范》可知

$$S \geq \frac{I}{C} \sqrt{t} \quad (2)$$

式中，S为接地导体的最小截面积， m^2 ；I为通过导体的故障电流，A；t为最长短路时间，s；C为接地

导体材料的热稳定系数，铝材取120，钢材取70，铜材取210。

由于该工程550 kV GIS中额定短路持续时间为3 s，通过式(2)计算可知：最大故障电流为37.8 kA时，需要的短接线截面积至少为546 mm²；由设计及试验经验得到不同材质的允许电流密度为：铜管为 $j=2.2\sim 2.5$ A/mm²；导电率 $\leq 45\%$ 铝管为 $j=1.1\sim 1.15$ A/mm²；导电率 $\geq 55\%$ 铝管为 $j=1.3\sim 1.35$ A/mm²。

根据产品设计经验，一般铜材取 $j=2$ A/mm²，铝材取 $j=1$ A/mm²，GIS正常运行时铝短接排持续通过1 224.2 A的电流所需的铝排截面积应为1 225 mm²。

该工程使用接地线规格为铝排，规格60×10mm²，接地截面积为600 mm²，不满足使用要求。因此，增加该处接地面积可以有效改善接地电流。

解决方法

根据计算结果和现场实际情况分析，该部位接地异常属于第二种情况，即GIS相间外壳通过短接排构成的回路，产生感应电流。因此需要对现场接地结构进行改进，增加接触面积和通流能力，解决现场发热问题。

现场接地线使用规格为铝排，改进后使用10×70规格的铜排。

1) 对作业区域铺设绝缘垫，放置绝缘梯，准备开始作业，作业部位如图8所示。

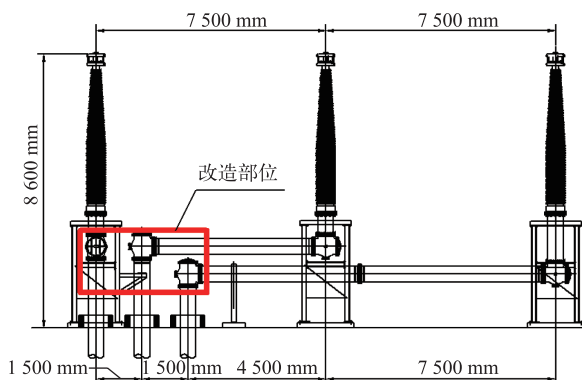
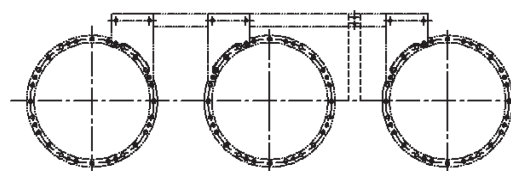


图8 改造作业部位

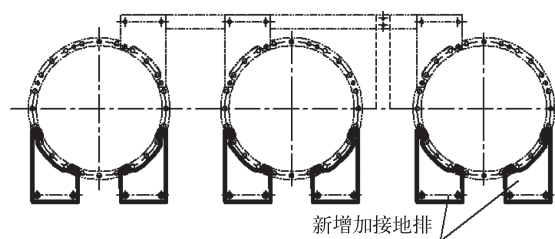
2) 在现场已经加装的接地线对称部位的分支筒螺孔处进行除漆处理，确保露出金属表面。改造部位结构如图9所示。

3) 对短接部位打磨光滑，并清理干净，然后涂抹导电脂，逐一安装新的接地线安装板，并对螺栓进行紧固，最后将新三相接地线加装在新的接地板上，如图10所示。



原接地排结构

图9 改造部位结构



新增加接地排

图10 改造结构

4) 将现场原接地线拆除，接线板拆下，按图9所示，对壳体和接线板接触部位分别进行打磨清理，去除锈迹和氧化层；然后对接触部位涂抹导电脂，安装新接地板；安装三相接地线，并对螺栓进行紧固。改造后的效果如图11所示。

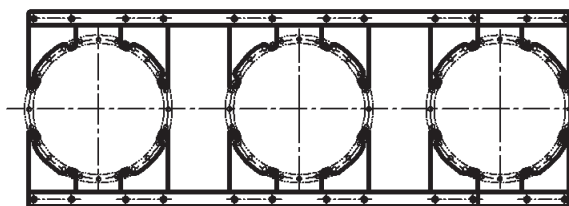


图11 改造后结构图

5) 改进后现场接地线照片如图12所示。



图12 改造后现场结构简图

6) 现场运行一段时间后，对改进后接地部位进

行复测，显示温度为46.9℃，如图13所示，缺陷消除，现场工作结束，改造后运行一切正常。

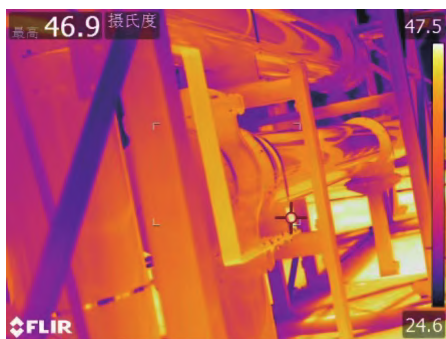


图13 改造后结构图

结束语

近年来，GIS设备接地要求在不断完善。《国家电网公司变电验收管理规定》中，将原来电压互感器、避雷器和快速接地开关等元件通过产品外壳接地，改进为采用专用接地线直接连接到接地网。

GIS接地系统是一个相对复杂的系统，由于感应电流需要经设备外壳，因此可靠性与设备紧密关联。任何一个环节的缺失，都可能导致接地异常。因此，针对现场设备定期进行红外测温，是很有效

的应对接地发热问题的手段。尽早发现问题，及时消除缺陷，确保设备安全运行。EA

(收稿日期：2024-05-21)

参考文献

- [1] 罗学森. SF₆气体绝缘全封闭组合电器(GIS)[M]. 北京：中国电力出版社，1998.
- [2] 徐国政，关永刚. GIS和GIL外壳环流及损耗简化分析和估算[J]. 高电压技术，2009，35(2)：247-249.
- [3] 黎斌. SF₆高压电器设计[M]. 北京：机械工业出版社. 2015.
- [4] 王文洪，何满堂. 252 kV GIS设备罐体发热缺陷的原因分析[J]. 高电压技术，2009，45(3)：148-150.
- [5] 施围，郭洁. 电力系统过电压计算[M]. 北京：高等教育出版社，2006.
- [6] 王亮，浅谈外壳感应电压[J]. 科学中国人，2014(6)：20.
- [7] 吴文辉，曹祥麟. 电力系统电磁暂态计算与EMTP应用[M]. 北京：中国水利水电出版社，2012.

