

户外高压隔离开关触头发热机理分析及预防过热故障措施探讨

户外高压隔离开关触头接触不良发热,会导致过热,甚至会发展成为电网事故。从高压隔离开关触头接触电阻影响温升的原因和过热对触头寿命损伤的原理进行分析,探讨了触头发热机理。通过触头温升试验,验证触头发热因素的复杂性和不确定性。从管理措施和技术措施两方面提出预防过热故障的方法,提高户外高压隔离开关的运行可靠性,从而确保电网的安全稳定运行。

赵庆 茅大钧/上海电力学院自动化工程学院

0 引言

高压隔离开关作为电气一次系统高压主要设备,是运行单位使用量最大的高压开关设备之一,主要起电力隔离作用。当触头流通电流大于高压隔离开关额定电流的60%时,触头接触点易发热,严重时引起过热故障,甚至导致被迫停电的恶性事故,发热引发的事故正在引起变电站和电厂等运行单位的重视。因此,对于高压隔离开关发热的问题,应制定有效的预防措施,及时发现设备发热缺陷,通过正确的处理,将发热缺陷消除在初始状态,确保电网的安全运行^[1]。



赵庆/硕士研究生

关键词/Keywords

户外高压隔离开关·
触头·
发热·
温升试验·
预防方法·

1 高压隔离开关触头发热机理探讨

户外高压隔离开关触头按照结构类型主要分为插入型和钳夹型,因为插入型触头在高压隔离开关的种类中比较常见,如GW4型和GW5型高压隔离开关触

头。针对插入型触头在运行中存在因动静触头接触不良引起的发热问题,本文对触头温升机理和预防过热的措施进行粗略的分析和探讨。

1.1 插入型触头接触电阻增大的原因

1) 插入型触头的触指制造工艺不完善,触指的自清洁能力差,容易产生污垢堆积和氧化,造成接触不良,导致触头接触电阻增大。触指选用的铜基材料不良、镀银层厚度不够,运行时经过磨损容易产生漏铜现象,造成接触电阻增大而发热。

2) 安装不当造成动静触头接触不良,动触头插入深度不到位使触指受力偏离理想值过大,接触压力不足,均影响触头的接触电阻,接触压力越小接触电阻越大,为日后接触点过热埋下隐患。

3) 紧固触指的弹簧有导磁特性,通过电流时易产生涡流过热,通过触头的大电流时间过长造成弹簧过热。而弹簧退热后,弹簧的弹性系数下降导致对触指的紧固力下降,使触头接触不良,导致接触电阻增大。

4) 触头接触面不光整有杂物或者接触面渗进雨水和尘埃使其氧化,铜银接触处处理不当产生电化腐蚀,这些腐蚀物皮膜均使接触电阻增大,造成连接处过热,并且随着温度升高,氧化反应加快,腐蚀物皮膜加厚,接触电阻越来越大,过热越加严重,产生恶性循环^[2]。

上海市“科技创新行动计划”高新技术领域重点科研项目(14511101200)。

1.2 触头温升的计算

触头接触电阻受触头材料、接触压力、接触面积等因素的影响,文献[3]给出了计算接触电阻的经验公式

$$R_j = \frac{k_j}{(0.102F)^m} \quad (1)$$

式中, R_j 为接触电阻, $\text{m}\Omega$; F 为接触压力, N ; m 为与接触形式、压力范围和实际接触点的数目等因素有关的指数; k_j 为与接触材料、表面状况等有关的系数,其值由实验确定。影响接触电阻的系数 k_j 和 m 如表1所示。

表1 影响接触电阻的系数 k_j 和 m

接触材料	k_j	接触形式	m
Ag-Ag	0.06	点接触	0.5
Al-Cu	0.98	线接触	0.7
Cu-Cu	0.08~0.14	面接触	1
Al-黄铜	1.9	—	—

由式(1)可得,触头的接触电阻与触头材料相关系数大小成正比,与接触压力和接触形式的系数成反比。因此采用良好的触头材料,保持触头正确的接触形式和适当的接触压力可以降低触头的接触电阻。

运行中的高压隔离开关触头的接触方式多为线接触,实际上的接触是由多个点接触构成,每个点接触接触电阻约为 $10 \mu\Omega$ 。刚投入使用的高压隔离开关回路接触电阻不超过 $130 \mu\Omega$,随着使用时间的积累,回路电阻能达到 $2\,000 \mu\Omega$ 。

当触指接触点电阻增大,通入电流后,接触点温度迅速增大。文献[4]给出了短路电流通过触头时,接触点温升计算公式

$$\tau_k = \frac{I_k^2 R_k^2}{8LT} \quad (2)$$

式中, τ_k 为接触点温升, K ; I_k 为热稳定电流, A ; R_k 为接触点接触电阻, Ω ; L 为系数, $2.4 \times 10^{-8} \text{ V}^2/\text{K}^2$; T 为触头平均温度, K 。不妨假设接触点接触电阻 R_k 分别为 $10 \mu\Omega$ 、 $20 \mu\Omega$ 、 $40 \mu\Omega$ 和 $60 \mu\Omega$, 环境温度为 25°C 。由式(2)计算和结合图形化处理可得到在不同接触电阻条件下,接触点温升随电流变化趋势,如图1所示。

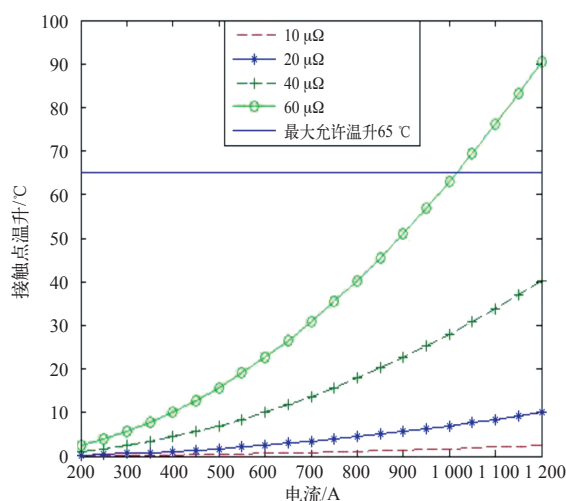


图1 接触点温升随电流变化趋势

由图1可得,接触点温升随电流增大而增大,电流越大接触点温升增加的幅度(曲线斜率)越大;接触点温升随接触电阻增大而增大,接触电阻越大,接触点温升增加的幅度越大;通入电流达到额定电流的75%时,触头易发生过热。可见触头的接触电阻和电流的变化导致过热,触头过热又导致接触电阻增大,进而加剧接触点发热,超过最大允许温升 65°C 后,会导致触头过热烧损。根据文献[5]可知温升改变对触头寿命影响的公式

$$K_i = 2^x \quad (3)$$

$$x = \frac{\Delta T_{i1} - \Delta T_{i2}}{\Delta T_i} \quad (4)$$

式中, K_i 为寿命老化系数; ΔT_{i1} 为触头初始温升; ΔT_{i2} 为改变后的温升; ΔT_i 为温升函数倍常数(为初始温升的函数,此估算经实验结果证实,如图2所示)。根据高压隔离开关运行规范,触头温度达到 130°C 时,运行人员就要做紧急处理。假设环境温度为 25°C ,此时触头温升为 105°C ,高于最大

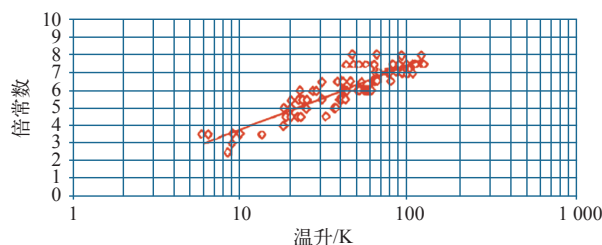


图2 温升函数倍常数

允许温升65℃。由式(3)和式(4)计算可得触头的老化系数 K_t 为0.025,即此时触头的寿命是正常使用寿命的0.025倍。

1.3 触头因过热受损的情况实例

高压隔离开关在运行中,通常因为触头的动静触头接触不良,接触部分的接触电阻会增大并引起发热,如果不及时处理,长期运行会产生过热,烧损触头。宁波变电站GW 4-110/1250型户外高压隔离开关动静触头因过热导致受损的情况如图3所示,图3中箭头指向部位是铜基裸露处。

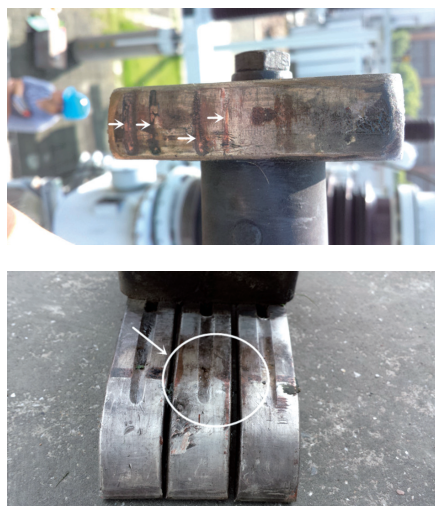


图3 动、静触头过热受损情况

根据现场检查情况,结合运行记录分析,因设备运行时间过长,机械操作不当导致触头镀银层脱落,加速了触头铜基材料的氧化速度,进而导致接触电阻增大。并且该变电站建在沿海城市,空气中含有有一定的腐蚀气体,在一定的条件下加速接触面的腐蚀,进一步增大接触电阻。接触电阻增大,导致接触点发热,甚至过热烧损。而镀银层脱落导致发热的现象在平时巡检时很难被发现,需要在停电操作检查时才能发现,因此要增加巡检的频率,及时掌握触头发热情况的变化。

1.4 温升试验

宁波供电局采用热电偶测温方法对GW 5-

110/1250型户外高压隔离开关进行温升试验,试验严格遵守的两个重要依据为DL/T 486—2010《高压交流隔离开关和接地开关》和DL/T 593—2010《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》。由于隔离开关触头结构的对称性,触头发热多是因为接触不良造成接触电阻增大引起的,所以试验中在触头对称的接触点附近分别布置一个热电偶测温元件,如图4所示,测温时能实现实时监测,测点温度走势如图5、图6所示。



图4 温升试验触头测点分布



图5 第一次试验过程中测点温度走势

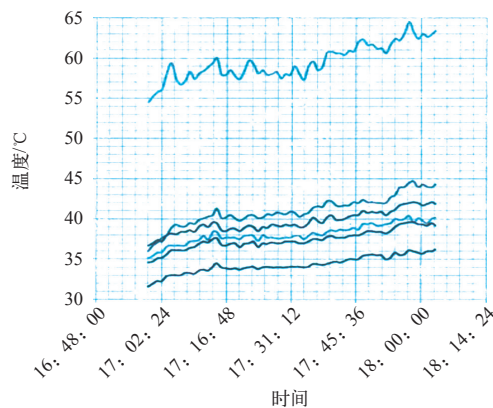


图6 第二次试验过程中测点温度走势

调整触头回路电阻后，分别对隔离开关三相通入405 A和803 A的电流进行温升试验。实验结果如表2、表3所示。

对实验结果进行分析，实验过程中动静触头的接触点数和触头单侧接触电阻难以计算，表2、3中测量电阻为回路电阻，测量温度为触头单侧

表2 第一次试验结果

第1次通流	项目	A相隔离开关		B相隔离开关		C相隔离开关	
	回路电阻/ $\mu\Omega$	149.1		48.2		133.4	
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	60.3	42.2	45.3	40.8	41.2	55.4
	通405 A电流，室温34.5 $^{\circ}\text{C}$ ，风速0.09~1.02 m/s，光照34 161~39 472 lx						

表3 第二次试验结果

第2次通流	项目	A相隔离开关		B相隔离开关		C相隔离开关	
	回路电阻/ $\mu\Omega$	48.6		35.6		103.8	
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	41.9	36.1	40.1	39.5	43.9	63.0
	通803 A交流电流，室温31.6 $^{\circ}\text{C}$ ，风速0.17~1.41 m/s，光照26 885~33 837 lx						

的最高温度值。同一触头对称面的温度之所以不同，是因为接触情况的影响，接触不良的一面，接触电阻大，温度高，如第1次通流的A相和第2次通流的C相。同时，试验结果显示通入电流为405 A的触头部分测点温度大于通入803 A的温度，是因为第1次通流下的触头回路电阻明显大于第2次通流下的触头回路电阻，试验现场的环境对触头散热有显著的影响。根据文献[6]可知，试验环境风速每升高0.1 m/s，温升下降2 $^{\circ}\text{C}$ ，风速越大，触头强迫对流散热速度越高；环境温度越高，触头自然对流散热强度越小；试验中，触头直接暴露在阳光下，光照强度越大，触头的附加温升越高。可见，户外高压隔离开关的温升的影响因素是复杂多变的。两次试验过程中测点温度变化如图5、图6所示，图中测点温度曲线呈振荡上升趋势，最终趋于平衡。之所以曲线有振荡是因为试验在室外进行，环境中的风速不稳定，触头对流散热的强度随之变化。由于在一定时间内接触电阻不会改变，电阻损耗产热最终趋于平衡，达到热稳定状态。

2 高压隔离开关触头发热事故的预防措施

为了避免因高压隔离开关触头发热引发的过热故障和电网停电事故，有必要采取一定的发热预防措施，包括管理措施和技术措施。

2.1 采取管理措施的建议

- 1) 严格把握设备出厂关，确保设备质量。针对高压隔离开关的出厂质量检测十分重要，将设备的质量问题解决在安装运行前，对设备日后良好运行奠定了坚实的基础。例如检查触头的镀银层厚度是否符合电力标准规范^[7]，如不符合，立即联系厂家更换。出厂前对高压隔离开关进行温升试验，测量回路电阻是否满足技术标准^[8]。
- 2) 确保现场安装质量，在安装高压隔离开关时，施工人员要根据气候条件对触头连接处施加适当的压力。采用扭矩扳手判断压力，一般环境下，压力大些；环境温度高时，压力小一些。对于环境温度变化较大的情况，要及时调整接触压力，严格按照接触电阻的要求施加压力^[7]，确保设备安装质量。
- 3) 运行阶段建立规范的巡检制度，加强巡视和红外测温，确保高压隔离开关运行操作标准规范。在加强现场巡查的基础上，每年迎峰度夏前，采用必要的技术方法对高压隔离开关触头温度进行在线测温，达到监控和预警的作用^[9]。同时，运行人员在正常操作时，要按照技术规范进行，避免不当的操作破坏接触面镀银层和导致接触不良增大接触电阻。
- 4) 建立定期检修维护制度，避免检修不足。例如高压隔离开关在运行过程中，因为灰层等杂

