

[高压电器]

高压回路导体的接触面电阻

文/国网福建检修分公司 陈金文

高压回路实际的运行中，接触面的接触电阻小且保持稳定，对设备的安全稳定运行至关重要，而现实中回路的接触面处往往会出现局部高温，严重影响设备的安全稳定运行。文章就回路导体的接触面电阻偏大的危害及处理进行了分析。

高压回路导体接触不良导致发热

1) 2005年7月~2007年7月，某500 kV换流站直流场公共部分低压侧刀开关处发热，温度达117℃，导致直流双极停运达4次，如图1所示。

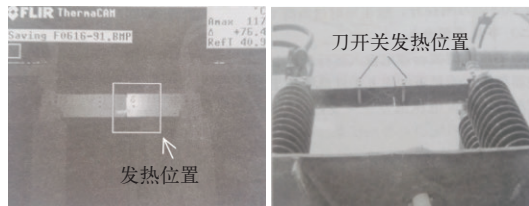


图1 低压侧刀开关处发热

2) 某500 kV变电站内的500 kV断路器上的接线板与线夹接触不良，温度达52.8℃，如图2所示。

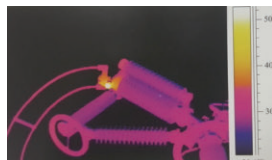


图2 500 kV断路器接线板异常发热

3) 某500 kV变电站内的500 kV罐式断路器接线头接触面接触不良，导致异常发热，温度达78.8℃，影响设备运行，如图3所示。



图3 500 kV罐式断路器接线头异常发热

4) 某500 kV变电站内的500 kV隔离开关前臂交叉点接触不良，导致异常发热，最高温度181.7℃，危及电网的安全运行，如图4所示。

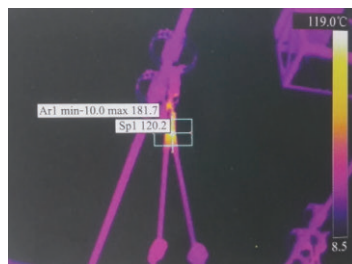


图4 500kV隔离开关前臂交叉点异常发热

5) 某220 kV变电站2#变压器C相66 kV侧内部导体连接不良，长期发热，最后导致导体融化滴落造成接地故障。

高压导电回路上，设备之间都需要可靠的电气连接，连接处将不可避免地存在接触电阻，任何一个连接处的接触面电阻偏大导致发热，都会对回路的安全、稳定运行造成很大的影响，严重时需停电处理，将给电网带来很大的风险及经济损失。下面，对接触面电阻及检查处理进行分析，为电气检修人员提供一些参考。

高压回路接头发热原理及检查处理

1. 回路接头发热原理

回路接头发热的实质为电流通过等效的接触

电阻而产生热量,即电阻损耗性发热。假设环境温度保持在一个相对恒定的温度,如接触面接触电阻产生的热量与散发的热量平衡,接触面电阻就会维持在一个稳定的温度;但接头在环境侵蚀的作用下接触电阻值升高,则发热量变大,接触面温度就越高;故对于回路的接头其接触电阻保持越稳定越好。

2. 回路接触面发热处理

下面就如何降低接触面的接触电阻从各个影响因素进行分析。

1) 接触面面积的大小。导体接触面面积的多少主要反映在微观的金属点与金属点接触数量的多少,一般情况下,点接触电阻>线接触电阻>面接触电阻,增大接触面,增加接触并联的点数,有利于降低接触电阻大小。但这也不是绝对的,一般情况下,在对触头施加的压力相同的情况下,点接触形式点数最小,单位面积承受压力大,越容易破坏表面膜,所以有可能使膜电阻减小到最小;反之,面接触的单位面积承受压力就最小,对膜电阻的破坏力最小,膜电阻值有可能最大。在实际中,需要综合考虑接触面积及接触压力进行分析判断后进行处理。

2) 接触面的平整度。接触面的平整度体现在相同的面积、压力下,不同平整度的接触点数会不同,精加工的接触点数量会大于粗加工的接触点数量,因而精加工的接触电阻会小于粗加工的接触电阻;但也应保证导体接触面加工后,接触面的面积不能降低太多,导电体面积减少值符合要求,一般铜质不超过原截面积的3%,铝质不超过5%。

3) 接触面的压力大小。接触压力对收缩电阻值和表面膜电阻值的影响最大,接触压力的增加使接触点的有效接触面积增大,即接触点数增加,从而使收缩电阻减小。当接触面的接触压力超过其材质的屈服强度时,就会产生塑性变形,表面膜会被破坏而出现裂缝,增加了接触面积,也会使得收缩电阻因表面膜电阻的减小而下降,从而使接触电阻大大下降。相反,当接触不到位,如隔离开关的接触触头失去了弹性变形等原因使接触压力下降时,接触面积减小,收缩电阻增大,对表面膜电阻受接触压力的破坏作用减弱,使表面膜电阻增大;收缩电阻、表面膜电阻二者的增大使得导体接触面的接触电阻上升。

实际检修作业中,部分检修人员在对导体接头螺栓的紧固力上存在一定的误区,认为连接导

体的螺栓拧得越紧越好;其实不然,如铝质母线弹性系数小,当螺母的压力达到某个临界压力值时,材料的强度差,再继续增加不当的压力,将会造成接触面部分变形隆起,反而使接触面积减少,接触电阻快速增大。

4) 接触面间的温度大小。对金属材料而言,当温度升高时,其电阻率就会有所增大,材料的硬度有所降低,从而使接触的有效面积增大,这一点对于导体的接触面也适用。温度升高使接触面增大,接触面的增加使得接触电阻减小,两者是互为补偿的作用,故这两方面的因素对接触电阻变化较小。但是,发热会加速导体与其表面的活性气体发生氧化反应,即膜电阻增加了接触电阻,这种接触电阻可成百成千倍地增大,引起恶性循环。例如,当发热温度超过一定值时,隔离开关的刀头的弹簧接触部分弹性元件性能变差,使得接触压力下降,接触电阻变大,最后会导致恶性循环,引发事故。

因温度的变化,不同金属的膨胀效应会引起导体体积的变化,导致接触面的缝隙加大,也会导致接触电阻增加,进而也会形成恶性循环。

5) 接触面间的腐蚀作用。导体金属接触面一般长期允许运行的温度都比较低,接触面的金属虽然不与周围介质直接接触,但周围介质中的氧等活性气体会从接触点周围逐渐侵入,并与金属接触面起化学作用,形成金属氧化物,附着在金属表面上形成表面膜电阻,使得有效接触面积减小,接触电阻值升高,接触面温度上升。同时,温度越高,活性气体活动力越强,会更深入地侵入到金属接触面内部,引发更严重的腐蚀。不同金属的两接触面接触时,往往能够发生这种腐蚀,例如铜、铝导体直接连接,两金属面间在空气中的水分、二氧化碳及其他杂质作用下极易形成电解液,从而形成以铝为负极,铜为正极的电池,使铝、铜产生电化学腐蚀,造成铜、铝连接处的接触电阻增加,高温下腐蚀就会加剧,产生恶性循环,使连接质量进一步恶化,最后导致接触点温度过高,甚至会发生冒烟、烧毁等事故。为了降低接触电阻受电化学腐蚀的影响,在选择接触面的导体材料时,还要考虑到金属材料的电化学连接顺序。假设规定氢的电化点位为0,在它后面的金属具有不同的负电位,在它前面具有不同的正电位,在连接时,应取电化顺序中位置靠近的金属,减少化学电势。例如,不宜采用铝-铜,钢-铜,

连接处需加铜铝过渡片，在电镀层及涂层时也要注意电化顺序。

6) 接触所用金属材料的影响。导体金属接触面所用材料的电阻系数、强度对导体的接触电阻也影响较大。例如，材料的强度越小，在同样的接触压力下，接触面间的实际接触面就越大，接触电阻就越小；材料的电阻系数越低，接触电阻值也就越低。同样，不同材料的金属导体接触也会出现如上所述电化学腐蚀的影响，应采取相应的防范措施。

3. 高压回路各接触面接触电阻的测试

3.1 接触面接触电阻的测量原理

在变电站内线路或设备年检时，接触面发热缺陷处理均先会对导体接触面的接触电阻进行测试，以此来了解接触面的连接质量及其导电性能。测试回路接触面的接触电阻，可以采用四线法进行测量。高压回路上，导体接触面的接触电阻一般都比较小，直流部分接触电阻要求在 $10\ \mu\Omega$ 以内，交流部分接触电阻要求在 $30\ \mu\Omega$ 以内，采用四线法测量能够很好地消除引线电阻对接触电阻的影响。如图5所示， R_1 、 R_2 分别代表两根电压引线电阻及接触面阻值的大小， R_3 、 R_4 代表电流回路上两根电流引线电阻和接触面的阻值大小。由于电压表V两端输入阻抗很大，通过电压表V内的电流几乎为零，故AC点等电位，BD点等电位，而 R_1 、 R_2 不影响电压的测量，故电压表的读数能够正确地反映接触电阻 R_k 两端的电压差。在串联电路中，由于恒流源的存在，电流回路各个点的电流相等，AB点几乎没有分流电流的存在， R_3 、 R_4 不影响电流的测量，电流表的读数 I 为被测接触电阻流过的电流，所以 U/I 的比值即为接触面的接触电阻 R_k 。

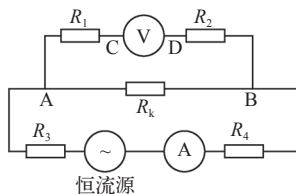


图5 四线法测量导体接触面接触电阻

高压导电回路的导体接触面通过的是大电流，则测试接触电阻值时要用大电流进行测试，使接触面上的氧化膜和尘埃受热融化，这样测的电阻才能真实地反映在大电流通流时接触电阻值的大小。

3.2 接线板接触面接触电阻的测试方法

(1) 不构成回路的情况

对于不构成回路的接触面，除了该接触面，

没有其他点相接触，测试的接线如图6所示，注意在测试的过程中，电压测试的线应尽可能地靠近接触面。

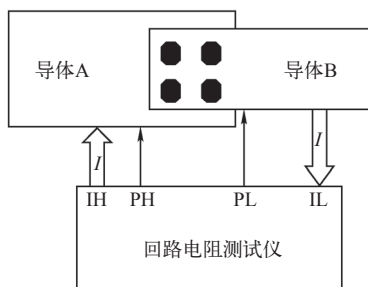


图6 导体接触面接触电阻测量

对于不构成回路的导电回路，有多个接触面需要测量时，可以采用如图7所示的测试接线图。假设导电回路上有2个接触面电阻需要测量，那么可以把电流线加在不构成导电回路的两端，移动两根电压测试线，对接触的电阻进行测试，这些可以显著提升测试工作的效率。

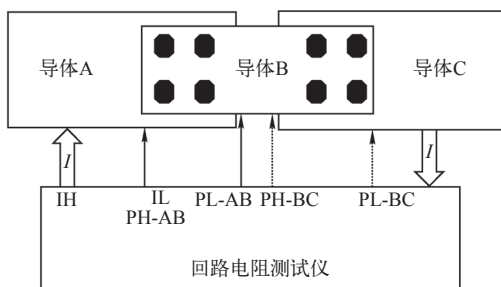


图7 多个导体接触面接触电阻测量

注意当导电回路上有串联CT时，应把其二次接线拆除或退出相应的保护，防止一次侧所加电流过大，损坏或导致二次回路的器件误动作，例如CT二次保护回路的保护设定当一次电流过50 A时发跳闸信号，当回路电阻测试仪加在导电回路上的电流为100 A时，保护回路就会报跳闸信号。

(2) 构成回路的情况

对于构成回路的接触面，除了该接触面，还有其他点相接触，测试的接线如图8所示，等效电路如图9所示。注意在测试的过程中，电压测试的线也应尽可能地靠近接触面。假设要测量1、2两点的之间的电阻 R_{12} ，仅测量1、2两个点的电阻值不能测量出正确的电阻值，还需增加一个测试点。其中，选择测试点时，应尽量靠近被测接触面，而测试点3可以任意选取，测量3次，在1~2之间测量电阻值为A，在2~3之间测量电阻值为B，在3~1之间测量电阻值为C。

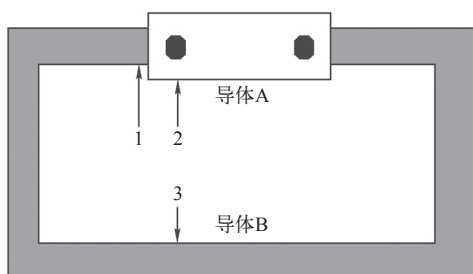


图8 回路导体接触面接触电阻示意图

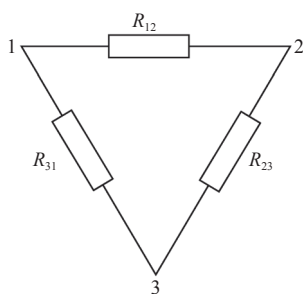


图9 回路导体接触面接触电阻测量等效电路

则1、2两点接触面的接触电阻值 R_{12} ，2、3两点接触面的接触电阻值 R_{23} ，3、1两点接触面的接触电阻值 R_{31} 为

$$\begin{cases} R_{12} = A + \frac{1}{2} \times \frac{A^2 - (B - C)^2}{-A + B + C} \\ R_{23} = B + \frac{1}{2} \times \frac{B^2 - (C - A)^2}{A - B + C} \\ R_{31} = C + \frac{1}{2} \times \frac{C^2 - (A - B)^2}{A + B - C} \end{cases}$$

如果 A 、 B 和 C 的数值差异太大，测量仪器的分辨率引入的误差和计算的舍入误差将严重影响测量的结果，甚至计算结果出现负值，这时可以采用附加短路线的方法，使得 R_{12} 、 R_{13} 和 R_{23} 保持在同一数量级，减少 A 、 B 和 C 值的差异。

3.3 导体安装及发热时接触面处理注意事项

1) 对高压铝线导体的接触面需用砂布或钢丝刷进行打磨处理，去除接触面上的毛刺、油污和氧化膜，处理后接触面应平整；利用干净的棉纱浇上酒精，把接触面擦拭干净，再均匀涂抹一层薄薄的导电膏；对于镀银的接触面，若有发黑点，可用纱布轻轻打磨并擦拭干净即可，切记不可用钢丝刷，否则会损坏镀银层；若无发黑，只需用无水酒精擦拭干净即可。

2) 在测试高压导电回路接触面的接触电阻值时，要用大电流测试，可一定程度上把接触面内微观上点与点之间的表面膜击穿，较为接近模拟的实际工作状态，同时也能减少导体接触面的接触电阻值。

3) 接触面涂导电膏，若把万用表两端接在一条由导电膏组成的线内，会发现导电膏其实不是良导体，它是利用了隧道效应而导电的原理。导电膏并不是涂抹得越多越好，太多反而会在运行一段时间后增加接触面的接触电阻。在基建验收时，加强把关，对导电膏涂抹过多的接触面应要求进行返工处理，导电膏的涂抹厚度应保持在 $0.15 \sim 0.20 \text{ mm}$ 。

4) 接触面涂中性凡士林。其作用为把接触表面上微小的坑坑洼洼的空间用中性凡士林填充，减少导体接触面与空气的接触，中性凡士林只能涂薄薄的一层，其厚度与导电膏厚度相当即可，目前很少采用该方法。

5) 加强对电气设备的日常巡视和定期保养，对各相接头所测温度进行横向对比，发现潜在的隐患并及时进行定期跟踪检查及处理。

6) 在对高压设备进行例行维护时，应逐个对导体接触面的接触电阻进行测量，发现接触面电阻偏大时应及时处理，确保消除隐患。

7) 尽量避免铜铝接头连线，无法避免时应采用铜铝过渡片，或在铜铝接线头处垫上锡箔，或在铜线接触面上搪锡后再与铝线接触面相连接。

8) 巡视测温时，应注意导体及设备发热不止本文所提及的电阻损耗性发热，还有铁磁损耗性发热、介质损耗性发热，应注意区分。

结束语

高压回路上，导体把各个电网设备连接起来，组成一张电力输送及分配的网络。这个网络收集各个地区所发电能，并输送到用户端，其重要性不言而喻。导体接触面过热造成的危害，轻则造成电网损耗增大，重则造成强迫停运或跳闸。因此对导电回路的维护极其重要，特别是导电回路上的各接触面维护，要以严谨负责的态度，采用科学合理的处理工作做好维护工作，确保电气设备及电网保持安全、稳定运行。EA

(收稿日期：2019.05.08)

(编辑：朱金凤)