

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.08.011

GIS回路电阻特性研究

高 凯¹, 卢有龙¹, 徐 鹏¹, 许乐然², 夏昊天², 关永刚²

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: GIS回路中导电接触状态关系到GIS的安全运行。文中通过对GIS回路电阻特性的研究,指出了通过直流法测量回路电阻来评估GIS回路接触状态的不足,发现直流法在测量回路电阻时存在一定随机性,且直流法通流时间短、电流幅值小、没有交流电动力的影响,与实际运行时的设备状况相差较大,不能准确反映GIS回路接触的真实情况,也不能用于对GIS回路电接触劣化程度进行准确评估。为了探究实际运行中导体发热和电动力产生的振动等因素对电接触的影响,文中在GIS设备中通过交流电流进行温升试验,并利用交流法计算了温升过程中回路电阻。通过数据对比发现:交流法得到的回路电阻可以有效区分不同接触状态;回路电阻大小与导体温度和通过电流大小有密切关系。电流越大回路电阻测量初始值越小。研究表明,运行中GIS回路电接触状态与导体温度、电流大小、电流类型以及通流时间等都有关系。

关键词: GIS; 回路电阻; 交流法; 直流法; 电接触

Study on Loop Resistance Characteristics of GIS

GAO Kai¹, LU Youlong¹, XU Peng¹, XU Leran², XIA Haotian², GUAN Yonggang²

(1. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The contact state in GIS loop is related to safe operation of GIS. By studying resistance characteristics of GIS circuit, this paper points out the shortage of measuring resistance of GIS circuit by DC method to evaluate contact state of GIS circuit. DC method has some randomness in measuring circuit resistance and DC method has short flow time, small current amplitude and no influence of AC power. Equipment condition in DC method test is quite different from that in actual operation, so it cannot accurately reflect real situation of GIS circuit contact, nor can it be used to accurately evaluate electrical contact deterioration degree of GIS circuit. In order to explore influence of factors such as conductor heating and electric vibration on electric contact in actual operation, this paper conducted temperature rise test by alternating current in GIS equipment, and calculated the circuit resistance in the process of temperature rise by using alternating current method. Through data comparison, it is found that circuit resistance obtained by AC method can effectively distinguish different contact states. Resistance of the circuit is closely related to temperature of conductor and passing current. The larger the current, the smaller the initial value of circuit resistance measurement. The results show that electrical contact state of GIS loop in operation is related to conductor temperature, current size, current type and flow time.

Key words: GIS; loop resistance; AC method; DC method; electrical contact

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated

switchgear, GIS)占地面积小、维护方便、可靠性较高,被广泛应用在电力系统中^[1-4]。由于材料、工艺、运输及安装等方面容易出现问題,使得GIS内部可能

存在一些缺陷^[5],随着使用时间的增加,早年投入运行的GIS设备缺陷逐渐显现,接触故障时有发生且呈上升趋势^[6]。广东电网统计分析得出,GIS由于触头接触不良造成的故障占29%^[11],可见,对于GIS触头接触状况的有效检测非常必要。

现有对GIS触头接触状况的检测方法有测量回路电阻、分析外壳振动频谱^[7]、红外热诊断^[8]及检测内部放电情况等方法。目前工程上使用最多的是直流法测量回路电阻^[9-10],回路电阻值可以在一定程度上反映出开关设备主导电回路的电接触状态^[11],是表征开关设备可靠性的最为重要和直接的参数之一^[12]。

GIS回路电阻主要由连接件的接触电阻和导电杆的体电阻构成^[13],其中接触电阻是主要成分。接触电阻又由膜电阻和收缩电阻两部分组成。接触电阻的影响因素也较多,主要有导体材料性质、接触形式、接触压力、温度等^[14]。

国家标准规定,在开关设备主回路的回路电阻测量中,应该用直流来测量每极端子间的电压降或电阻,试验电流应该取100 A到额定电流之间的任一方便的值^[15]。文[16]认为仅仅通过传统的回路电阻测试并不一定能有效发现接触不良缺陷,需要结合其他检测手段进行综合评估。国家标准中也提出了单凭主回路电阻增大不能看作是触头接触不良的可靠证据,此时,试验应当在更大的(尽可能接近额定电流的)电流下重复进行。但实际中使用接近额定电流的直流进行回路电阻测量成本太高,故有学者提出使用冲击电流法测量回路电阻。

文[17]通过仿真计算进行了基于超级电容器的冲击电流法用于断路器回路电阻测试的可行性研究;文[18]提出利用超级电容器产生千安级的冲击放电电流,由于在冲击电流峰值点处导数为零,电压在电感上的分量为零,且电容可以忽略,从而可以提取电流到达峰值点时的电压电流值计算回路电阻;文[19]基于冲击电流法提出依据回路电阻随测试电流增长的变化率大小来判断GIS触头电接触状态是否良好;文[20]分析了电流类型和电流作用时间对断路器回路电阻测试的影响,认为冲击电流法比直流压降法更能反映触头的真实接触状况。

传统直流法与冲击电流法测量时的设备状况与投入运行时的设备状况有较大差别。运行中的GIS设备长期受振动与温度的影响,而直流法不能模拟通过交流时的振动情况,且由于电流较小、通流时间较短也无法体现出温度的影响,冲击电流法虽然能够使电连接件产生短时间的振动,但与工况

差别仍然较大。

实际中有时会发生检修测试时回路电阻正常但投入运行后导电连接件温度过高以致发生故障的情况,可能原因是实际运行中回路的接触状况在振动与温度等因素的长期影响下发生了改变。因此,文中进行了温升试验以探求GIS回路电阻在长时间通过较大交流电流条件下的特性及其影响因素。

1 试验方案

为了研究现有直流法存在的缺陷和回路电阻在通过交流大电流时的变化特性及其影响因素,进行了两类试验。第一类试验中GIS通过交流大电流,以触头温度为自变量,在温升过程中多次使用直流法测量回路电阻;第二类试验中仅在温升试验前、试验刚结束时以及设备冷却静止一段时间后用直流法测量回路电阻,在温升过程中实时测量电压电流波形,以进行后续“交流法”的分析探讨。

所用试验平台见图1,选取两节GIS分支母线,额定电流为2 kA,中间段有动静触头,旁侧有开关操作机构。两套管端部导体接大电流升流器,升流器最大电流为3 kA,最大容量为60 kVA。中间段管母结构及温度测点布置见图2。图2中 R 是热敏电阻,用于测量触头上部的温度。试验中,用回路电阻测试仪测量回路电阻,电流值设定为200 A。



图1 GIS试验平台

Fig. 1 GIS test platform

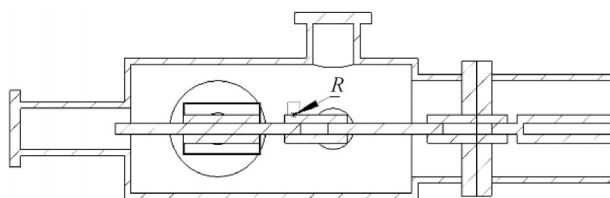


图2 内部结构及温度测点位置

Fig. 2 Internal structure and location of temperature measuring points

第1类试验中触头接触状况设置为4种情况,分别为完全插入、接触不良1、接触不良2以及接触

不良3,通过减小动触头的插入深度来增大接触电阻,模拟接触不良的状况。试验前用回路电阻测试仪对这4种状态的回路电阻进行5次测量,结果平均值分别为235.5、329、407、487 $\mu\Omega$ 。

第2类试验中触头接触状况设置为3种情况,分别为完全插入、接触不良4以及接触不良5。触头位置调节好之后用回路电阻测试仪对这3种状态的回路电阻进行5次测量,结果平均值分别为231、349.3、421 $\mu\Omega$ 。

2 直流法测量结果

第1类试验中,为了探究GIS的回路电阻在通过交流大电流运行中是否会发生变化,以触头温度为自变量,在温升试验过程中多次使用直流法测量回路电阻。对GIS设备通过1 600 A交流电流,每当触头温度升高5 K,将GIS回路与交流大电流发生器断开,立即用回路电阻测试仪测量回路电阻,之后马上再连接GIS回路与交流大电流发生器,继续进行温升试验,如此反复,直到温升稳定或触头温度达到150 $^{\circ}\text{C}$,温升试验结束并测量此时的回路电阻。

以触头温度为横坐标,回路电阻为纵坐标,第1类试验的测试结果见图3。

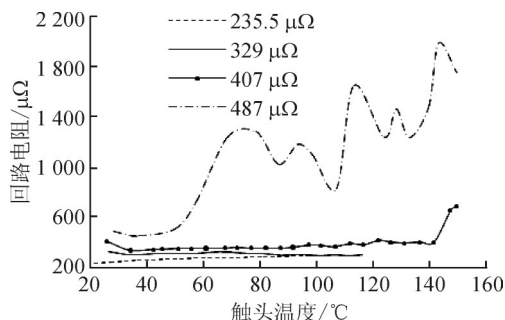


图3 第1类试验回路电阻变化曲线

Fig. 3 Loop resistance curve of test 1

由于接触不良3的回路电阻变化幅度较大,使得其他3种情况变化不明显,故将初始回路电阻为235.5、329、407 $\mu\Omega$ 3种情况重画于图4中。

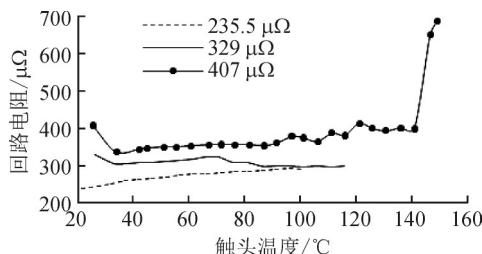


图4 第1类试验回路电阻变化曲线

Fig. 4 Loop resistance curve of test 1

图3、4中虚线为触头完全插入情况下的电阻变化曲线,通流之前回路电阻值为235.5 $\mu\Omega$,电阻变

化比较平滑,回路电阻随着温度的升高,缓慢上升。此情况下回路电阻变化原因主要是导体电阻率随着温度升高而升高导致回路电阻略有增大。

图3、4中实线为接触不良1情况下的电阻变化曲线,通流之前回路电阻值为329 $\mu\Omega$ 。回路电阻在刚通过交流电流后有一个较为明显的下降,可能原因是设备通过交流电流后,电动力产生振动,触指与触头接触变得均匀,使得接触状态有了一定程度的改善。此后回路电阻随着温度的升高缓慢上升,可能原因有两方面:一方面,温度升高导体电阻率上升,使得回路电阻有升高趋势;另一方面,温度升高、接触面材料相对变软、导体受热膨胀导致接触压力变大,加之交流电流下电动力作用,接触面增加,使得回路电阻有下降趋势。当触头温度超过70 $^{\circ}\text{C}$,回路电阻有一定程度的下降,随后进入一个相对稳定的状态。

图3、4中带点实线为接触不良2情况下的电阻变化曲线,通流之前回路电阻值为407 $\mu\Omega$ 。在开始阶段,与接触不良1情况相似,回路电阻值有下降现象。之后一段时间内,回路电阻都保持在一个较为稳定略有上升的趋势。但当触头温度超过90 $^{\circ}\text{C}$ 之后,回路电阻值产生了波动,触头接触进入了一个稍不稳定的状态。当触头温度超过140 $^{\circ}\text{C}$ 之后,回路电阻值发生跃变,从397.8 $\mu\Omega$ 骤升到650.6 $\mu\Omega$,温升5 K内回路电阻值升高了252.8 $\mu\Omega$ 。

图3中的点划线为接触不良3情况下的电阻变化曲线,通流之前回路电阻值为487 $\mu\Omega$ 。在开始阶段,与接触不良1和2情况类似,回路电阻值有下降现象,但随后进入了不稳定的波动状态,最终回路电阻值达到了初始阻值的3到4倍。此种接触状况下回路电阻波动幅度较大,表明接触状态很差且不稳定。

由第1类试验的测量结果可以看出,GIS回路的接触状态在通过交流大电流后可能会发生较大的变化,与振动、温度和通流时长等都有关系。而在实际设备检修时所采用的直流法中,通流电流远小于运行时的电流,通流时间又较短,没有电动力的影响,测量时的状况与运行时的状况相差较大,因此,并不能保证准确反映回路的真实接触状态。

为了进一步考察不同测试时刻对直流法测量结果的影响,在第2类试验中,在400、800、1 200、1 600 A 4种不同交流电流的温升试验前、试验刚结束以及冷却静置一段时间后用直流法测量了触头完全插入、接触不良4和接触不良5三种接触情况下的回路电阻。试验测试结果见表1。

表1 试验前后直流法测量回路电阻结果
Table 1 Result of the circuit resistance before and after temperature rise test measured by dc method

项目	电流/A	试验前/ $\mu\Omega$	试验后/ $\mu\Omega$	冷却后/ $\mu\Omega$
完全插入	400	231.0	234.7	231.3
	800	231.3	243.7	230.7
	1 200	230.7	257.8	236.3
	1 600	236.3	277.1	238.4
接触不良 4	400	349.3	321.8	337.2
	800	337.2	309.1	327.9
	1 200	327.9	288.8	294.0
	1 600	284.6	280.8	254.2
接触不良 5	400	421.0	358.4	624.0
	800	624.0	366.0	675.0
	1 200	675.0	414.0	675.0
	1 600	675.0	314.7	357.0

表1中,试验前数据是在进行标准温升试验前室温环境下用回路电阻仪5次测量数据的平均结果,试验后数据是在进行温升试验结束后立刻用回路电阻仪5次测量数据的平均结果,冷却后数据是设备完全冷却到室温条件下回路电阻仪5次测量数据的平均结果。对于任意一种接触情况只在试验最开始调节触头接触位置,之后不同电流的温升试验过程中回路电阻值会发生变化,但不再调节触头位置。

由表1结果可以看出,在完全插入情况下,直流法测试结果较为稳定,试验前和冷却后回路电阻值相差不大,仅在试验后略微增大。在接触不良情况下,回路接触电阻首先在试验后呈现出了明显的下降,试验前和冷却后回路电阻大致相当,但均有较大的波动。例如,在接触不良4情况下,试验前平均回路电阻值为324.8 $\mu\Omega$,波动为64.7 $\mu\Omega$,试验后平均回路电阻值为300.1 $\mu\Omega$,波动为41 $\mu\Omega$,冷却后平均回路电阻值为303.3 $\mu\Omega$,波动为83 $\mu\Omega$;在接触不良5情况下,试验前平均回路电阻值为598.8 $\mu\Omega$,波动为254 $\mu\Omega$,试验后为平均回路电阻值363.3 $\mu\Omega$,波动为99.3 $\mu\Omega$,冷却后平均回路电阻值为582.8 $\mu\Omega$,波动为318 $\mu\Omega$ 。试验前和冷却后在测量回路电阻时都是在相同的触头接触位置和环境条件下进行的,只是期间经历过一次升温 and 冷却的过程。但是,试验前和冷却后测得的电阻值也没有表现出统一的变化规律。例如,在接触不良4情况下,冷却后测得的回路电阻较试验前略有减小,而在接触不良5情况下,400 A时冷却后测得的回路电阻624 $\mu\Omega$ 较试验前增加了203 $\mu\Omega$,1 600 A时冷却后测得的

回路电阻357 $\mu\Omega$ 较试验前减少了318 $\mu\Omega$ 。

以上两类试验结果说明,直流法测量回路电阻值存在一定随机性,并不能很好地反映GIS的真实接触状态,也不宜用于对GIS回路电接触的劣化程度进行准确评估。

3 交流温升过程中回路电阻的变化规律

为了探究GIS设备实际运行中长期通流条件下温度和振动对电接触的影响,文中开展了上文所述的第2类试验,试验中记录了GIS回路的电压和电流波形,并尝试用“交流法”对温升试验过程中回路电阻特性进行了分析。

试验中使用柔性罗氏线圈测量回路电流波形,用电压差分探头测量GIS母线段两端的电压波形。柔性罗氏线圈灵敏度为1 mV/A,测量范围为6 kA,电压差分探头测量范围为70 V,采集卡同步采样频率为200 kHz。试验设备连接见图5。

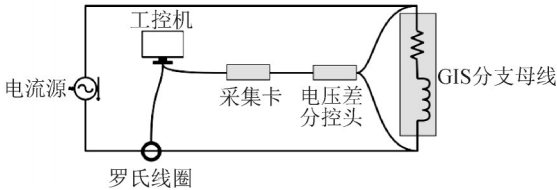


图5 采集系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of acquisition system

3.1 交流法计算回路电阻原理

直流法测回路电阻使用的是直流电流,比较简单,不会受回路中电感等因素的影响。通过交流电流时,回路中的电感、电容以及外壳涡流都会对回路电压的测量产生影响。一般情况下,GIS回路中的电容较小可以忽略。该试验中采用的GIS样机为铁质外壳,因此外壳的涡流损耗不可忽略。交流下GIS回路的等效电路见图6。其中,主导电回路电阻表示GIS回路中通流导体的等效电阻;外壳等效电阻表示外壳因涡流损耗而等效到主回路的电阻。

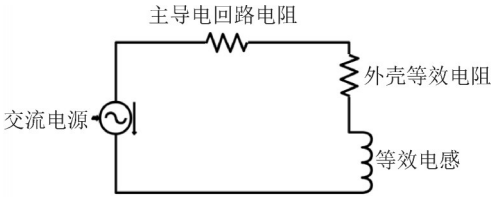


图6 GIS回路等效电路图

Fig. 6 GIS equivalent circuit diagram

假设GIS回路等效电感为L,回路总等效电阻为R,回路两端交流电压为u,通过的交流电流为i,见图7。

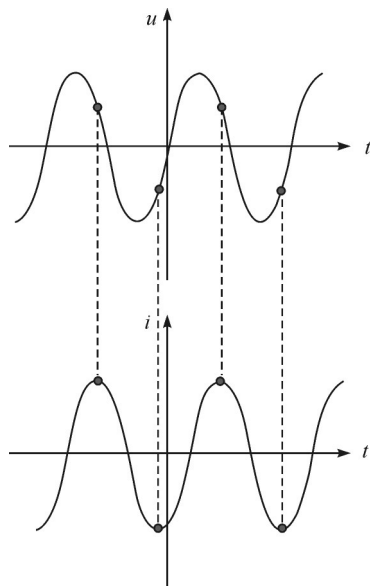


图7 交流法原理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of principles of alternating current method

GIS回路的电压电流关系为

$$L \frac{di}{dt} + Ri = u \quad (1)$$

结合图7与式(1)可知,当电流波形到达极值点处时, $di/dt=0$,即电源电压在电感上的分压为0,因此,利用此时的电压瞬时值与电流瞬时值,可以计算出回路电阻值。

此方法使用的前提条件为回路中电容值较小可以忽略。文中使用电容电感检测仪测量回路电感值与电容值后发现与回路中电感相比,电容值很小,可以忽略其影响。

3.2 试验结果和分析

当通过交流电流有效值为400、800、1 200、1 600 A时,用交流法计算得到的3种接触情况的回路电阻结果分别见图8-11。

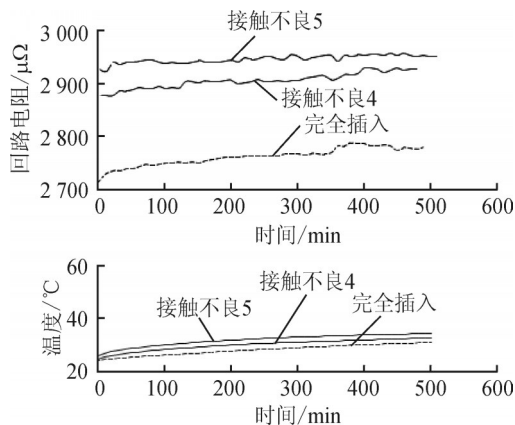


图8 交流法计算出的回路电阻(交流电流400 A时)

Fig. 8 The circuit resistance calculated by the AC method (alternating current is 400 A)

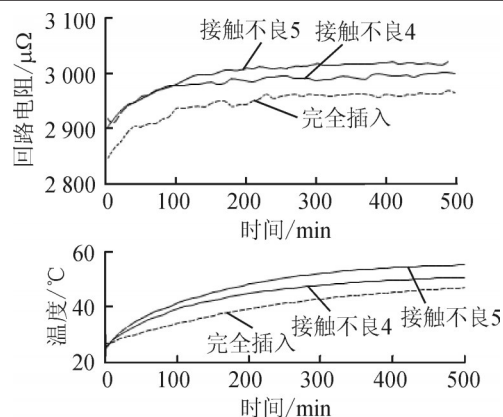


图9 交流法计算出的回路电阻(交流电流800 A时)

Fig. 9 The circuit resistance calculated by the AC method (alternating current is 800 A)

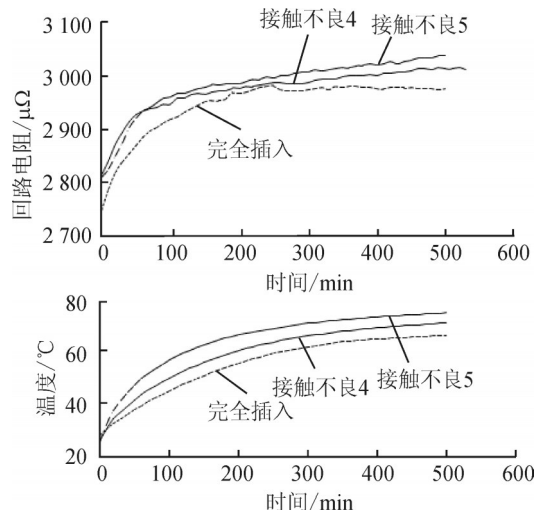


图10 交流法计算出的回路电阻(交流电流1200 A时)

Fig. 10 The circuit resistance calculated by the AC method (alternating current is 1200 A)

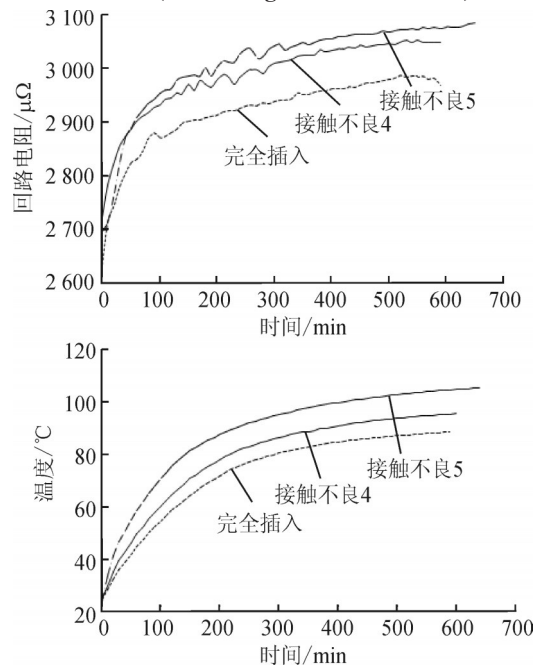


图11 交流法计算出的回路电阻(交流电流1600 A时)

Fig. 11 The circuit resistance calculated by the AC method (alternating current is 1600 A)

图8-11的曲线表明,交流法得到的回路电阻在温升试验过程中随着温度的升高不断增大,但与温度相比,电阻曲线开始阶段上升的更快,也更早的进入缓慢增长的阶段。这说明,导电接触对温度变化很敏感。同时在温度相对稳定阶段,3种接触情况对应的回路电阻曲线没有出现明显波动现象,也没有彼此交叉,在不同电流下,不同接触情况对应的回路电阻的彼此大小关系相同,即接触不良5的回路电阻大于接触不良4的回路电阻大于完全插入时的回路电阻。GIS实际运行中可以认为基本处于温升稳定的状态,因此,温升试验后期的回路电阻曲线可以反映该接触状态在GIS实际运行中的特性。

在3种接触情况下,用交流法计算得到的不同电流下的回路电阻随触头温度的变化曲线分别见图12-14。

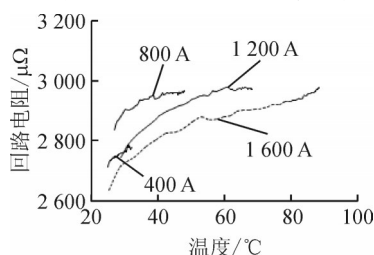


图12 完全插入时不同电流下的回路电阻变化曲线

Fig. 12 Loop resistance curve with different current in

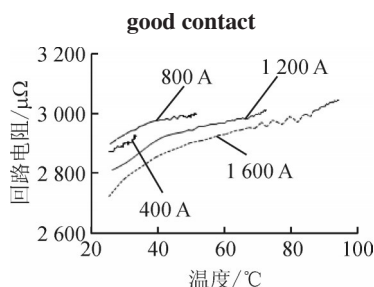


图13 接触不良4时不同电流下的回路电阻变化曲线

Fig. 13 Loop resistance curve with different current in

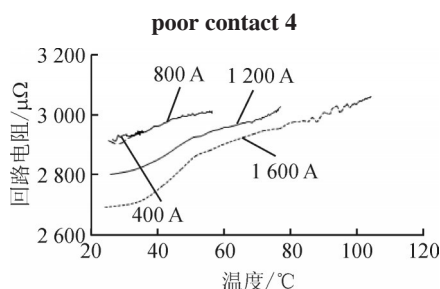


图14 接触不良5时不同电流下的回路电阻变化曲线

Fig. 14 Loop resistance curve with different current in

poor contact 5

图12-14的曲线表明,回路电阻随温度升高而增加,即温升越高回路电阻越大。但相同接触状态下,不通电流下回路电阻在触头相同温度下并不相同,除了400 A的曲线外,其他曲线表现出电流越大回路电阻越小的特征。因此,除了温度外,还有其

他因素影响回路电阻。实际上,在其他条件不变的情况下,不同电流影响的与回路电阻有关的因素应该是交流电动力的大小。电动力越大可能对GIS中触指形式的导电接触因为振动而改善的作用越大。

4 结论

通过以上研究可以发现:

1)直流法测量回路电阻存在一定随机性,在温升试验前、试验刚结束以及冷却静置一段时间后测得的结果存在变化较大、随机性较强的情况。直流法通流时间短,电流远小于运行电流,没有电动力的影响,测试时的设备状态与实际投入运行的设备差别较大,不能准确反映设备运行时的状况。

2)在设备温升稳定后,交流法计算出的回路电阻在几种电流下均能够有效区分不同接触情况。在温升过程中,回路电阻随着温度的升高而增大,且较温度更快趋于稳定。接触状态一定的情况下,电流越大,交流法计算出的回路电阻值越小,可能与电流大产生更大的电动力和振动有关。

3)实际运行中GIS回路电接触状态与导体温度、电流大小、电流类型以及通流时间等都有关系。因此,对GIS的电接触状态进行评估时,应当适当考虑这些因素的影响。

参考文献:

- [1] 王俊波,苗银银,罗容波,等. GIS触头接触状况检测现状分析[J]. 高压电器,2013,49(12): 137-140.
WANG Junbo, MIAO Yinyin, LUO Rongbo, et al. Analysis of present situation of GIS contact detection[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 137-140.
- [2] 周秀,马波,马飞越,等. 一起220 kV变电站126 kV GIS母线故障原因分析[J]. 青海电力,2018,37(3):61-64.
ZHOU Xiu, MA Bo, MA Feiyue, et al. Analysis of a 126 kV GIS bushing fault in a 220 kV substation[J]. Qinghai Electric Power, 2018, 37(3): 61-64.
- [3] 杜鑫. 一种GIS设备回路电阻测试方法探索与实践[J]. 电气技术,2017(10):119-122.
DU Xin. Measurement study and practice on the resistances in GIS contact circuit[J]. Electric Engineering, 2017(10): 119-122.
- [4] 赖俊驹,彭浩,姜昀芃,等. 不拆解接地线的GIS导电回路电阻快速测量方法研究[J]. 电测与仪表,2019,56(15): 113-118.
LAI Junju, PENG Hao, JIANG Yunpeng, et al. Research on fast measuring method of GIS circuit resistance without removing grounding wire[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(15): 113-118.
- [5] 张森林. GIS接触电阻与温升关系研究[D]. 北京:华北电

- 力大学, 2015.
- ZHANG Senlin. Study on the relationship between contact resistance and temperature rise of GIS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [6] 孙国霞. 基于电接触理论的GIS母线接头过热性故障的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- SUN Guoxia. Research of GIS busbar connector overheating fault based on electrical contact theory[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [7] 刘媛, 杨景刚, 贾勇勇, 等. 基于振动原理的GIS隔离开关触头接触状态检测技术[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1591-1599.
- LIU Yuan, YANG Jinggang, JIA Yongyong, et al. Connection state diagnosis method of GIS disconnecter based on mechanical vibration[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1591-1599.
- [8] 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.
- [9] 黎海凡. 测量高压GIS站特定主设备回路电阻的方法[J]. 水电与新能源, 2019, 33(5): 60-63.
- LI Haifan. A measurement method for the loop resistance of specific primary equipment in high-voltage GIS station[J]. Hydropower and New Energy, 2019, 33(5): 60-63.
- [10] 陈志平. GIS回路电阻测试装置改进及现场应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- CHEN Zhiping. Improvement of GIS loop resistance testing device and its application in the field[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [11] 甘路平. 高压开关回路电阻超标的分析与处理[J]. 电工技术, 2019, 49(9): 135-136.
- GAN Luping. Analysis and treatment of overshoot resistance of a high voltage switch circuit[J]. Electric Engineering, 2019, 49(9): 135-136.
- [12] 王俊波, 邱太洪, 李慧, 等. 一种基于超级电容器的断路器回路电阻测试装置设计[J]. 电子设计工程, 2019, 27(16): 29-32.
- WANG Junbo, QIU Taihong, LI Hui, et al. Design of circuit breaker loop resistance testing device based on super capacitor[J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(16): 29-32.
- [13] 王祥, 王伟, 刘浩, 等. 影响超级电容回路电阻测试仪放电电流的参数分析[J]. 电工技术, 2019, 50(9): 137-139.
- WANG Xiang, WANG Wei, LIU Hao, et al. Analysis of the parameters affecting discharge current of super capacitance loop resistance tester[J]. Electric Engineering, 2019, 50(9): 137-139.
- [14] 许军, 李坤. 电接触的接触电阻研究[J]. 电工材料, 2011, 2(1): 10-13.
- XU Jun, LI Kun. The research on resistance of electrical contact[J]. Electrical Engineering Materials, 2011, 2(1): 10-13.
- [15] 高压开关设备和控制设备标准的共同技术要求: GB/T 11022—2011[S]. 2011.
- Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards: GB/T 11022—2011[S]. 2011.
- [16] 何良, 王红梅, 张旭波, 等. 一起220 kV GIS设备发热异常检测及解体分析实例[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 236-240.
- HE Liang, WANG Hongmei, ZHANG Xubo, et al. Detection and disassembly analysis on an abnormal heat fault of 220 kV GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 236-240.
- [17] 王俊波, 邱太洪, 李国伟, 等. 基于冲击电流的断路器回路电阻测试可行性研究[J]. 电子设计工程, 2019, 27(17): 85-88.
- WANG Junbo, QIU Taihong, LI Guowei, et al. Study on circuit resistance test of breaker based on impulse current[J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(17): 85-88.
- [18] 罗容波, 王岩, 黄松波, 等. 基于冲击电流的GIS导电杆回路电阻测量方法研究[J]. 高压电器, 2013, 49(10): 46-50.
- LUO Rongbo, WANG Yan, HUANG Songbo, et al. Measuring loop resistance of GIS conductor Pole with impulse current method[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10): 46-50.
- [19] 李雷, 罗容波, 王俊波, 等. 基于千安级冲击电流的GIS电接触特性状态评估研究[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 49-54.
- LI Lei, LUO Rongbo, WANG Junbo, et al. Assessment of GIS electrical contact state by means of kiloampere grade impact current[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 49-54.
- [20] 王俊波, 武利会, 李国伟, 等. 电流特性对断路器回路电阻测试的影响分析[J]. 电子设计工程, 2019, 27(18): 184-188.
- WANG Junbo, WU Lihui, LI Guowei, et al. Effect of current characteristics on circuit resistance measurement of circuit breakers[J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(18): 184-188.
- 高凯(1975—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力设备状态检测与诊断技术。
- 许乐然(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为GIS设备状态在线监测(E-mail: hilbert_transform@vip.163.com)。