

[开关设备]

# 主回路电阻计算及测量在GIS工程中的应用

文/西安西电开关电气有限公司 火恒章

根据IEC及GB标准，高压开关产品从新产品研发到产品出厂，直至交付用户使用的过程中，需经过型式试验、出厂试验及现场试验。在试验过程中，为保证设备正常运行及人员安全，主回路电阻测量是必需的。基于工程实际情况，阐述了主回路电阻的计算、测量及注意事项等。

气体绝缘金属封闭开关设备（Gas insulated metal-closed switchgear, GIS）是电力系统中的重要组成设备，其正常运行对电网的安全运行起到了重要的作用。其中GIS的导电回路电阻控制是GIS质量和运行状态的一项重要技术指标。探讨了如何科学正确地计算、测量和控制GIS的主回路电阻等，为GIS设备本身和电网的安全运行提供可靠的保障。

## 主回路电阻测量的目的

在型式试验及出厂试验前，主回路电阻测量是为了确定产品的装配质量是否正确、接触面镀银层是否有损伤及固定接触面是否可靠等方面；在现场试验中，主回路电阻测量是为了检查开关产品运输及安装后性能是否稳定。

## 主回路电阻偏大的危害

在GIS产品中，如果出现主回路电阻偏大，将有可能使触头发热严重、造成触头烧坏，长期运行会影响产品可靠性。在型式试验中，进行短时耐受电流和峰值耐受电流试验时，如果主回路电阻偏大会导致导体烧毁，进而使试验失败，图1为试验失败后导体损坏情况。



图1 试验失败后导体损坏

## 零部件电阻值的计算

在新产品研制阶段，即型式试验前，对新研发的元件需确定其直流电阻值，电阻的计算有以下几种方式。

1) 对于规则的导体，其电阻由式（1）确定

$$R = \rho L / S \quad (1)$$

式中， $\rho$  为导体材料在20℃时的电阻； $L$ 为导体长度； $S$ 为导体截面积。

2) 对于不规则导体或触头可采用类比结合实测的方法确定。

3) 对于接触电阻，其电阻按式（2）确定

$$R_c = K_c / (0.102F)^m \quad (2)$$

式中， $R_c$ 为接触电阻； $F$ 为接触压力。

与材料、表面状况有关的系数 $K_c$ 及接触形式

有关的参数 $m$ 列于表1中。

表1 影响接触电阻的系数 $K_c$ 及 $m$

| 接触材料           | $K_c$   | 接触形式 | $m$ | 表明状况 |
|----------------|---------|------|-----|------|
| 铜镀银—铜镀银        | 80      | 点接触  | 0.5 | 未氧化  |
| 铜—铜<br>(包括铜搪锡) | 120~160 | 线接触  | 0.7 | 未氧化  |
| 铜—铝            | 980     | 面接触  | 1   | 未氧化  |
| 黄铜—铝           | 1 900   |      |     | 未氧化  |

接触电阻虽然可按式(2)计算所得,但影响其值的因素较多,如材料性质、接触形式、环境温度和接触表面加工情况等,计算可能不十分准确,因此可通过多次测量的平均值加以校正,取其校正后的值为管理值;同时应用中还采用测量接触电压的方法来实测接触电阻,图2为接触电阻的测量电路图,接触电阻可按式(3)计算所得

$$R_j = \frac{U_m R}{U_{in} - U_m} \quad (3)$$

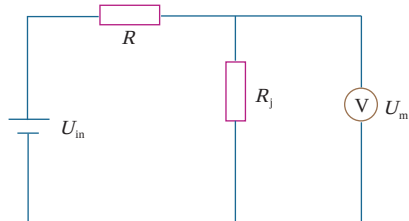


图2 接触电阻的测量电路图

$R$ —已知的电源电阻  $R_j$ —电接触器的接触电阻  
 $U_m$ —测量的电接触电压  $U_{in}$ —电源电压

## 常用主回路电阻测量方法——直流电压降法

根据IEC 62271-203、GB 7674标准规定,主回路电阻测量通常采用直流电压降法,测量所用的电流应等于或高于直流100 A,以获取足够的准确度。

工厂常采用直流电压降法,如图3所示,测量所用的电流通常选用100 A(测量时也可选200 A、300 A或500 A),并且测量主回路时的电流不应引起产品的发热,否则会引起电阻的增大,测量值并通过欧姆定律 $R=U/I$ 换算为相应的主回路电阻值。

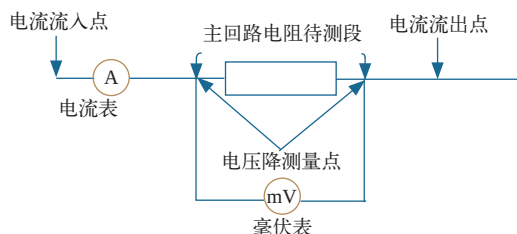


图3 直流电压降法主回路电阻测量示意图

出厂时,尽可能在完整的单元下进行主回路电阻测量,现场测量电阻应与出厂单元保持一致,这样更能够对比现场安装前后电阻的测量数据。

## 直流电压降法测量电阻步骤

- 1) 解除所有接地开关ES和快速接地开关FES的接地板。
- 2) 在主设备无电的情况下,合上待测回路上的隔离开关(DS)、断路器(CB)、接地开关(ES)和快速接地开关(FES),使之测量回路导通。
- 3) 确认主回路所有气室均不能为真空状态,测量段通以100 A电流(测量时也可选200 A、300 A或500 A)。
- 4) 清除被测部分接触面的油漆及金属氧化物,固定测量线,检查接线是否正确,测试接线应接触紧密良好,尤其是毫伏表的接线。
- 5) 依次按A、B、C相的顺序,逐相、逐段进行所有的测量。
- 6) 接通仪器电源,按程序操作,待电流稳定后读出毫伏表实测数据,并做好记录,同时记录环境温度。
- 7) 关闭试验电源,拆除试验测试线,将产品恢复到需要的状态。

## 主回路电阻值的判定标准

对于出厂试验,主回路每极电压降或电阻的测量,应该尽可能在与相应的型式试验相同的条件下进行(即在产品周围空气温度和测量部位相同的条件下进行)。如果环境温度差异大,其电阻值应按式(4)换算到20℃时进行比较判定

$$R = R_0 [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (4)$$

式中,  $R_0$ 为实际值,单位为 $\mu\Omega$ ;  $T_0$ 为测量时的环境温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$ ;  $T$ 为基准温度,即20 $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha$ 为电阻温度系数,20 $^{\circ}\text{C}$ 时铜取0.003 9、铝取0.004 03;  $R$ 为20 $^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值,单位为 $\mu\Omega$ 。

出厂试验时所测得电阻值不应超过1.2  $R_U$ ,  $R_U$ 为温升试验前测得电阻值或理论计算值。

现场试验测得的电阻值不应超过出厂试验时同一测量位置的最大允许值。

为便于现场测量的数值与出厂试验数据相比较,现场选用的测量回路及测量方法应与出厂试

验测量回路及方法保持相同。

经验表明，如果对某段主回路电阻产生怀疑，试验应当在更大的测量电流下重复进行；如果三相回路长度及结构基本相同，则可以通过三相类比法比较回路电阻是否近似相等，若其中的两相近似相等，另一相电阻差异大，则应重新检查差异大的一相。

### 主回路电阻在工艺方面注意事项

1) 触头镀银层质量问题易引起电阻的偏大，检查过程中若发现镀银层有问题则将其更换。同时镀银后的零部件采用热震动的方式进行附着力检查，并做好储存及转运过程的质量控制。

2) 工艺采取对导体及触头控制配合公差的原则进行装配。

3) 导电回路用润滑脂在SF<sub>6</sub>气体状态下不会因劣化反应造成电阻变化，但是必须适量使用，如果润滑脂堆积过量，也会引起电阻偏大。

4) GIS现场安装基础复合图样要求是保证其安装质量的前提，安装的同时需要保证各个对接面就位，装配难度大，易造成母线触头相互“憋劲”，导致电阻增大，故消除基础偏差对电阻测量可达到很好的效果。同时严格按照工艺要求进行控制装配，用母线对中工装调整相间距等尺寸，确保每个间隔内部尺寸合格。

### 主回路电阻测量时的注意事项

1) 被试产品及导体等主设备不允许带电运行测量电阻。

2) GIS产品或其他产品可充气或不充气，但不能在抽真空的状态下进行测量。

3) 测量时，电压线和电流线不要缠绕在一起，相互间尽量远点，电压线要接在断口的触头端，电流线接在电压线的外侧。

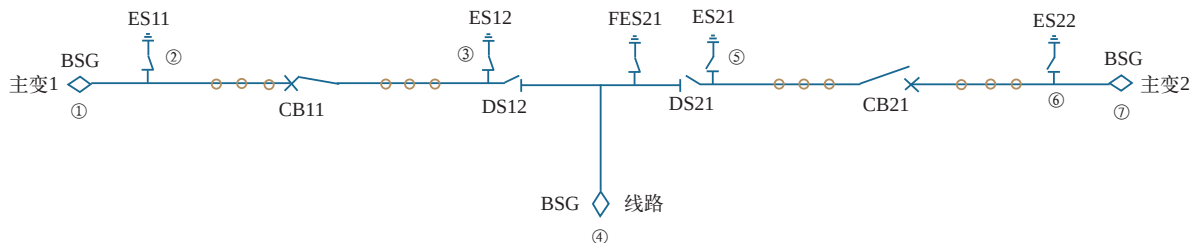


图5 现场电阻测量点用接线图

4) 不允许在测试回路断开的情况下通100 A测量电流，否则接线打火，易损坏仪器。

5) 测量时，为防止开关合闸，应断开被试开关的操作电源。

6) 如发现被测开关或导体回路的电阻增大或超标，可将开关进行数次分合闸操作后再进行测试，如果电阻变化不大，可分段进行查找，确定有问题的部位。

7) 对于GIS工程出厂试验，主回路电阻测试是在绝缘试验前进行，电阻值与测试段选取有关测量时，电压测量点应在直流100 A电流流经范围之内，如果电压测量范围与直流100 A电流流经范围在主回路外有重合部分，则主回路电阻测量值应减去主回路外有重合部分（如接地开关ES和快速接地开关FES）电阻值，如图4所示。测量①②两点的电阻，如果从ES14及ES11取点，则应减掉这两处ES的电阻值。

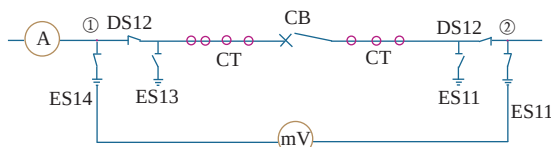


图4 直流电压降法主回路电阻测量示意图

DS—隔离开关 CB—断路器 CT—电流互感器

ES—接地开关 A—电流表 mV—毫伏表

①—电阻测量点 ②—电阻测量点

### 主回路电阻直流压降法测量在工程中的应用

GIS工程，布置形式多样，以一种常用GIS接线形式阐述了主回路电阻直流压降法的测量。对于封闭在GIS壳体中的测量点可以通过与该点相连的接地开关ES或快速接地开关FES合闸后进行电流及电压测量，也可通过外露导体进行电流及电压测量，具体步骤如下。

1) 以工程主接线和布置图进行位置测量段划分。目前550 kV GIS工程是以间隔为单元进行装配及测量主回路电阻，位置测量段划分如图5、图6所示。

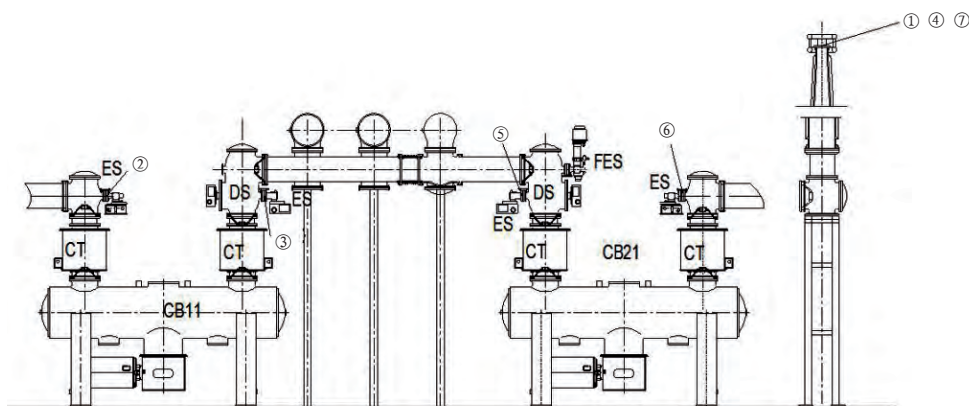


图6 现场电阻测量点用接线图

2) 例如测量图5中②至③两点的电阻，整个此段开关在非真空的状态下，并且在与此有关的整个主设备不带电的情况下，让ES11、ES12及CB11合闸，从②③两点取点，相应加入电流和电压进行测量，如图5、图6。依据IEC及GB标准关于主回路电阻的出厂试验要

求，电阻测量值应不超过温升试验前测的或理论计算值的20%。为了更严格控制电阻值，可设定出厂试验时电阻测量值不超过电阻计算值的10%。

3) 测量电阻及记录现场的环境温度，将数据填写至表2中。

表2 主回路电阻测量方案

| 测量区间 | 电阻/ $\mu\Omega$ |       |       |     |       |       |     |       |       |
|------|-----------------|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|
| 测量点  | A               |       |       | B   |       |       |     | C     |       |
|      | 计算值             | 厂内测量值 | 现场测量值 | 计算值 | 厂内测量值 | 现场测量值 | 计算值 | 厂内测量值 | 现场测量值 |
| 1-2  |                 |       |       |     |       |       |     |       |       |
| 2-3  |                 |       |       |     |       |       |     |       |       |
| 3-4  |                 |       |       |     |       |       |     |       |       |
| 3-5  |                 |       |       |     |       |       |     |       |       |
| 5-6  |                 |       |       |     |       |       |     |       |       |
| 6-7  |                 |       |       |     |       |       |     |       |       |

## 结束语

结合工程实例，对GIS的主回路电阻计算及测量进行了介绍，通过正确计算和测量主回路电阻，及早发现GIS设备主回路中的缺陷，避免给用

户及公司造成不必要的损失，同时为后期工作积累宝贵的试验数据和经验。EA

(收稿日期：2016.01.30)

(编辑：刘群点)

## 罗克韦尔自动化与思科携手加强工业物联网安全性

在工业物联网 (IIoT) 技术为车间设备与企业层级的互联贡献力量的同时，安全性始终是一项严峻挑战。如今，IT 系统通常采用防火墙来监视 IT 网络上的安全风险。这些 IT 防火墙并不能识别车间使用的工业协议，使得控制整个网络风险的能力大打折扣。为此，思科和罗克韦尔自动化联手开发了一项符合工业安全应用规范的深度数据包检测 (DPI) 技术。

“在构建互联企业时，制造商和工业企业最为关注的就是车间安全性，”罗克韦尔自动化通用架构和技术副总裁 Juergen Weinhofer 介绍，“DPI 技术由罗克韦尔自动化与 IT 安全性行业领袖思科联手打造，将双方在自动化和信息控制领域的专长结合在一起，能有效帮助新的和既有的工业控制系统提升安全性。”

“凭借这项新增的安全功能，我们联合的产品组合和架构可帮助消除细微的漏洞和安全隐患，告别看似安全的假象，”思科全球工业主管 Doug Bellin 表示，“我们能够实时跟踪所有网络连接，并在出现问题时迅速响应。这又是一个最佳 IT 技术与最佳OT（运营）技术融合解决实际问题的优秀案例。