

# 变电站直流接地故障查找策略及寄生回路现象分析综述

刘昱东, 邵剑强

(国网江西省电力有限公司九江供电分公司, 江西 九江 332000)

**摘要:**文中从直流系统出发介绍了一些常见的故障类型、故障危害及故障查找方法,同时通过一个直流接地系统中寄生回路误发信号的案例描述了日常工作中查找直流接地故障的步骤和策略。通过电路原理中的网孔电流法,对该类直流接地问题进行了原理性的分析,并根据分析情况提出了一些能够有效提高直流稳定性的举措。

**关键词:**直流系统;寄生回路;网孔电流法;直流稳定性

**中图分类号:**TM 63 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-348X(2024)05-0034-05

## 0 引言

直流系统作为电力网络中的重要部分,它的功能包括对变电站内的保护装置、信号告警、安自装置以及站用照明的直流电源供应,对电力系统的稳定性、安全性、高效性运行有着重要意义。一旦直流系统出现问题,可能会导致保护装置或者安稳装置误动或者拒动<sup>[1]</sup>,甚至造成变电站失压、端子排烧毁等事故,对人身及设备造成很大的影响,破坏电力系统稳定性。

在日常的变电站故障处理中,有一类经常发生的故障即直流系统接地故障,这类故障常常是危机缺陷,需要立刻处理,也是较难排查的故障之一。此类故障主要是因为回路结构相对复杂,从直流系统到开关机构回路都有可能发生直流接地,当直流系统发生一点接地时,系统有很大概率能继续正常运行,但是一旦发展为两点接地,回路缺陷或者故障就会出现。严重的话会造成各种装置的误动或者拒动,后台及监控频发装置动作和复归信号,影响其他信号的正常监测,甚至发生母线失压、主变跳闸等严重事故,给生产带来人力、物力、财力的损失。由上可知,直流系统的稳定运行对变电站稳定性非常重要,检修人员应仔细分析接地原因,总结策略,最短时间找到接地点,对容易发生直流接地的部分进行整改。

## 1 变电站直流接地故障简述

### 1.1 直流系统主要组成部分

通常来说,变电站中一个完整的直流系统主要有AC-DC模块、直流分电屏、蓄电池组、绝缘监测装置、交流互投装置,UPS电源等,保障变电站直流系统的电能供应,监视及告警等功能<sup>[2]</sup>。

### 1.2 直流接地故障分类及原因

当直流接地或绝缘下降,即220V直流系统两极对地电压压差超过40V或绝缘电阻减少低于25k $\Omega$ ,应视为直流系统接地<sup>[3-4]</sup>。

其主要类型包括:

1) 一点接地:当直流系统发生一点接地时,通常和正常运行无异,但如果未及时发现处理,则可能形成两点接地。

2) 两点接地:在直流系统中出现两处接地点,可能引起短路跳闸,保护误动或者拒动等事故,应该尽快消除缺陷。

3) 交流窜入:交流量和直流系统混淆,易造成回路或者设备的烧毁。

4) 环路接地:部分变电站直流电源呈现环路形式,即负荷侧的两路进线电源通过环路仍然存在着联系。如果发生直流接地,容易出现环路故障问题。

5) 正负母线同时接地:即正电源和负电源同时

收稿日期:2024-06-19

作者简介:刘昱东(1999),男,本科,主要从事继电保护及电力系统自动化维护方面的工作。

接地,容易使保护无法正确动作,发生越级跳闸事件。

以下是常见原因:

#### 1) 下雨天气

雷雨天气下,室外开关机构箱、端子箱等设备本体内容易出现箱体湿润进水现象,直流相关的二次回路绝缘电阻降低,从而发生接地。

#### 2) 绝缘老化

在巡视过程中,发现有些较老的变电站二次回路出现破损,或者绝缘材料已超过合格期,系统运行多年没有及时进行大修,导致发生接地。

#### 3) 挤压磨损

二次系统存在部分损伤点,常见的有扭伤、磨伤、过流烧伤等等,例如部分手车开关的运动部件与静止部件缺少良好的隔离措施,易造成导线外皮绝缘破损,导致发生接地。

#### 4) 小动物

变电站因为其生态环境良好,经常出现小动物爬到箱体内部或者电缆沟内的情况,容易发生短路导致接地。

#### 5) 接线松动

工艺不合格而造成的直流回路裸线接触柜体,或者某些元件绝缘措施未到位的线头、金属制品等零件,容易使直流回路接地。

### 1.3 简易的直流系统故障危害分析

#### 情况一 直流正极接地

如图1所示,直流正极接地存在保护及自动装置误动的可能性。

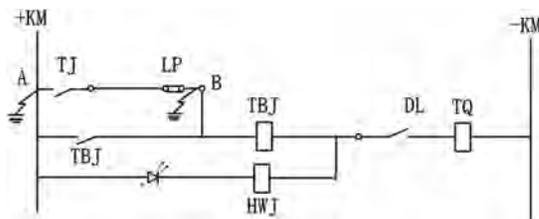


图1 直流正极接地

图1中A点为直流正极接地点,跳合闸线圈、继电器线圈通常接于负电源,若这些回路再出现一点接地,例如图1中的B点接地,那么A-B将保护跳闸接点短接,正电可以通过TJ接点启动跳闸线圈,断路器误动作。

#### 情况二 直流负极接地

如图2所示,直流负极接地存在保护及自动装置误动的可能性。

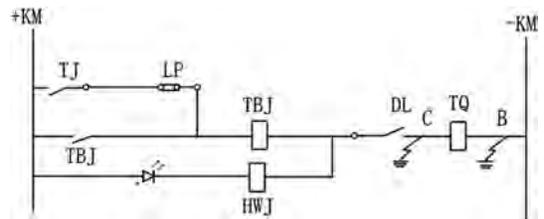


图2 直流负极接地

图2中B点为直流负极接地点,一旦回路中再发生一点接地故障,例如C点跳闸线圈被短接,如果正好有跳闸命令的正电过来,也无法动作;另外,直流回路短路,使得控制电源的(该处未标注)保险断开,从而失去保护功能,同时有可能对继电器接点破坏。

#### 情况三 直流系统正负极都有一点接地

如图3所示,直流系统正负极都有一点接地,会造成短路使电源保险熔断或空开跳闸,保护功能失效。

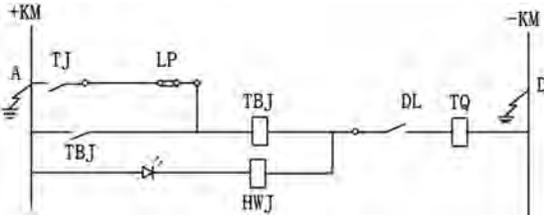


图3 直流系统正负极都有一点接地

无论A、D哪个点先发生接地,到最后两点接地时,控制电源的正负极都将直接相连,保险熔断或者空开跳闸,且保护功能丧失。

## 2 查找直流接地的常用办法及消缺步骤

### 2.1 查找方法

#### 2.1.1 经验总结法

直流系统接地故障规律性较强,因此都可以参考以往的直流感地处理方法来发现接地点。根据现场的情况,检修人员可以结合当时接地时的气候条件、小动物活动、施工情况、原理设计、二次回路问题等因素,对接地情况进行判断<sup>[4]</sup>。

当出现二次设备继电器非正常动作,或者是二次回路出现异常现象,以及各类告警,应该安排检修人员立刻进行排查故障。

#### 2.1.2 拉路法

在变电站二次回路系统中,直流系统所涉及的回路数目庞大,分布范围广泛。在实际工作场景中,当需要检测接地点时,常用的方法是拉路法。

这种方法要求检修人员逐一尝试对每路空开或熔断器进行拉闸停电操作,若在执行某一路的拉闸操作后,直流感地现象随即消失,则可以判断故障出现在该空气开关所控制的后续回路中。一旦锁定了存在故障的回路范围,便可以继续对该回路下的分支进行逐一排查,直至精确找到故障点。该方法需要注意安排专人一直监测接地直流母线的电压示数变化,直流电压的恢复过程往往需要一个时间,拉路完成以后需要等待3~4s,且支路断电应该经过调度单位同意。

如果发生多点接地,这种方法相对来说有效性下降,断电顺序需要关注,一般遵循的是“先信号部分,再操作部分”,“先室外部分,再室内部分”的原则,具体来说,应该按照如图4所示的顺序进行断电。



图4 查找顺序

2.1.3 惠斯通电桥法

如图5所示,该方法是通过分析系统中正负极母线对地绝缘电阻阻值来实现故障判断的<sup>[6]</sup>。 $R_1$ 和 $R_2$ 可以进行人为设置, $R_3$ 和 $R_4$ 则表示数值很大的正极对地、负极对地的电阻<sup>[7]</sup>。

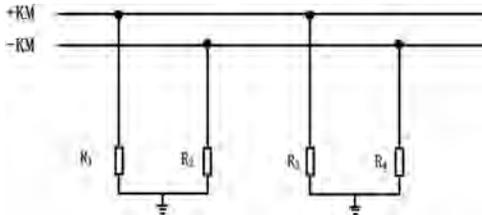


图5 电桥正常运行

由电路原理可知,正常运行时,可以得到 $R_1R_3=R_2R_4$ ,该时平衡没有电流流入大地,正对地电压的大小等于负对地电压的大小。

当直流系统发生负极接地故障,该时直流可以等效电路 $R_2$ 并联发生接地电阻 $R_5$ ,如图6所示。

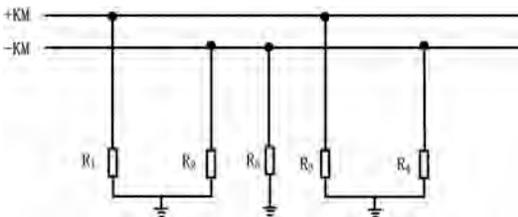


图6 电桥发生负极接地故障

根据电压分压定律可得:

$$U_+ = \frac{U}{R_1 + R_2} R_1 \tag{1}$$

$$U_- = \frac{U}{R_1 + R_2} R_2 \tag{2}$$

该时等效 $R_2$ 减小, $U_+$ 增大, $U_-$ 减小。因此可以得到下面推论:

如图7所示,当直流系统负接地故障出现时正极对地电压增加,负极对地电压减少,电桥平衡被打破,KS继电器通过电流,继电器动作的同时发出信号。

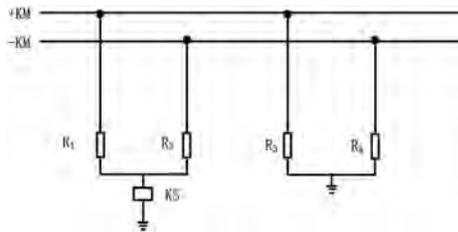


图7 KS继电器流过电流

2.1.4 摇绝缘法

摇绝缘法主要用的工具是绝缘摇表。根据统计数据,总结运行中的变电站的直流接地点,大部分接地点在室外。如果接地出现在场地回路及其对侧回路之间,可解户外场区的端子箱到开关机构箱直流电缆中的电缆芯,用摇表测量绝缘电阻。如果绝缘恢复,即说明接地点介于开关机构与该电缆之间的回路中。

2.2 直流接地查找步骤总结

1) 当直流系统发生接地告警时,应该首先查看接地情况,并立刻通知检修人员到现场进行故障处理。查看后台机信号以及装置选线支路情况,并观察站内是否在进行作业或者试验,综合考量当天的系统运行方式、天气状况进行初步判断。针对户内或者户外的各种密闭箱体,应该查看其封堵、潮湿度、接线松动、残留金属器件、小动物痕迹等情况。

2) 检修人员通常用万用表直流电压档对母线对地电压值进行测量,若发现实测对地电压正常,装置显示值有问题时,可判断是绝缘监测装置采集回路或者装置问题,再对装置外部二次回路进行检查,如果确认没有问题,在调度方许可下可进行重启。若重启无效,需及时联系装置厂家。

3) 查公共回路以及间隔二次回路。可以直接使用直流接地查找仪逐步检查公共回路上各分支绝缘情况或者电流的不平衡度,以确定故障点所处

间隔,方便后续查找。户外设备接地故障风险较高,具体涉及主变非电量保护回路、断路器机构闭锁回路、刀闸回路、控制回路的故障可能性;故应加强防范。

4) 利用拉路法进行试探性查找,该处不再赘述。需要额外说明的是,先对不影响跳合闸的回路进行检查,如果确定是在这些回路中,那么就可以免除对重要回路的停电处理;在试拉保护电源时,为了防止误动作,应该退出可能会误动的保护,给上电源以后再投入保护;在试拉负荷时,最后无论是否查到设备接地都应该立即送电。

5) 如果在前面几步的过程中确定是在最后一级空开的下面二次回路发生接地故障,该时只能通过摇绝缘的方法查找直流接地故障。需要注意的是,解线之前需要对原来线路的位置进行标记,防止恢复时出现错误。

6) 查找到接地点以后,应该尽快处理,如果临时停电,在处理完毕以后,应该尽快恢复送电。

当然,还有其他比较有效的方法,例如仪表法、抗分布电容法<sup>[7]</sup>、漏电流法<sup>[8]</sup>等等。

### 3 某次消缺案例分析

#### 3.1 回路分析

某220 kV变电站直流系统的配置方式如图8所示。

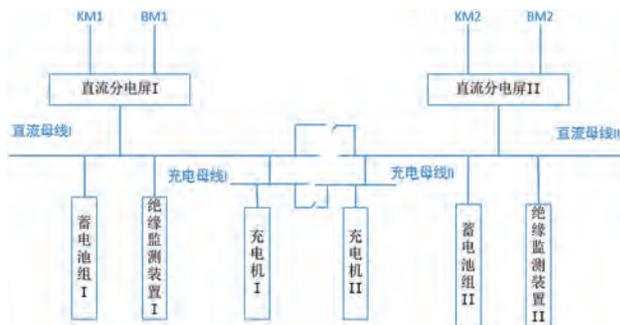


图8 某变电站直流系统的配置图

该直流系统有两段直流母线,中间存在母联开关。直流母线I和II分别对称的接有充电母线、蓄电池组、绝缘监测装置,直流分电屏、充电母线又接有充电机。某220 kV线路安装有A、B套线路保护装置,其中,保护控制电源为KM类,保护装置电源为BM类。某次变电站施工,断路器因为某些原因非全相运

行,发现三相不一致保护未能正确动作,同时报“I段母线直流接地故障”、“II段母线直流接地故障”告警信号。

停止现场施工后通过经验判断法查看了一下当时的天气和是否有小动物在保护二次回路附近活动。当天天气良好,回路干燥,无金属零部件残留、绝缘无破损或者接线松动,尝试拉路各级空气开关,查到最后一级发现也没有问题。再对回路进行分析,而当三相不一致保护使开关断开三相分闸时,发现直流接地信号消失。由于接地信号只在断路器非全相运行时才发出,且两个直流系统的正负极同时接地,因此判定三相不一致保护回路发生了直流接地。

从室内保护装置到室外端子箱都进行了详细检查,发现在机构箱处出现了接线错误问题。断路器的三相不一致保护位于机构箱中,通过图纸发现在电源使用上选用的是+KM<sub>2</sub>和-KM<sub>2</sub>。但是在现场发现的是保护电源选用的+KM<sub>1</sub>和-KM<sub>1</sub>,于是,形成了如图所示的接线方式,+KM<sub>1</sub>和-KM<sub>1</sub>既是不一致结点的启动电源,同时也是机构压力回路的启动电源。

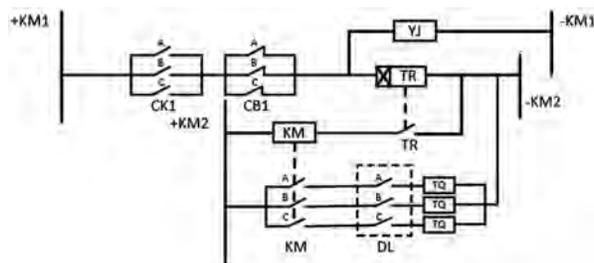


图9 断路器三相不一致保护原理图

当断路器处于三相不一致状态时,时间继电器动作使得结点得以闭合,压力继电器动作使得-KM<sub>1</sub>与+KM<sub>2</sub>和-KM<sub>2</sub>连通,从而发生了直流电源紊乱现象。图9为装置接线图。

在图9中,CK1表示断路器常开辅助触点,CB1为断路器常闭辅助触点,TR为时间继电器,KM为中间继电器,DL为断路器位置辅助触点,TQ为跳闸线圈,YJ为压力继电器。

在事故发生时,用万用表测量了直流母线电压 $U_{+KM1}=40\text{ V}$ , $U_{-KM1}=-185\text{ V}$ , $U_{+KM2}=185\text{ V}$ , $U_{-KM2}=-42\text{ V}$ ,通过计算可以得知, $U_{sj}=82\text{ V}$ ,小于继电器动作电压220 V,三相不一致保护未能正确动作,造成了该次事故。

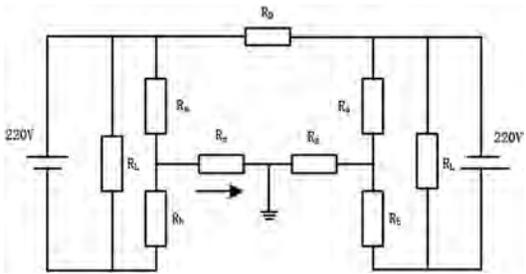


图 10 电路等效原图。

### 3.2 惠斯通电桥法等效计算

由于现行绝缘装置基本采用惠斯通电桥法进行直流接地监测,因此可以画出如图 10 所示的等效电路。

在图 10 中,  $R_a$  和  $R_b$  均为平衡桥的电阻,取值一般为 1 ~ 1.5 k $\Omega$ ,该处按照 220 V 直流系统惯例采用 1 k $\Omega$  电阻。信号继电器线圈电阻  $R_x$  通常选为 30 k $\Omega$ (以 DL-11/1.4 mA 继电器为例),  $R_D$  通常表示信号指示灯电阻,该处选为 8 k $\Omega$ (根据相关技术手册得知)。

$R_L$  为当电路正常运行时 ( $I_n=5$  A),直流电源的负载,则有  $R_L=44 \Omega$ 。

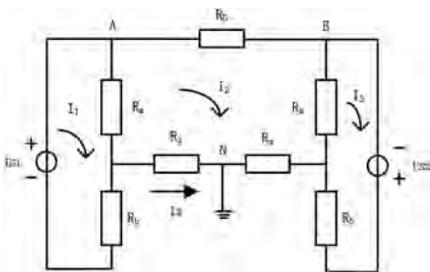


图 11 电路网孔电流法图

如图 11 所示,需要求直流系统正对地电压  $U_{AN}$ 、直流系统负对地电压  $U_{BN}$ 、流过电流继电器线圈的电流  $I_x$ 。

由网孔电流法可知,取网孔电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ ,则可以得到方程如下:

$$\begin{cases} I_1(R_a + R_b) - I_2R_a = U_{S1} \\ -I_1R_a + I_2(R_D + 2R_a + 2R_x) - I_3R_a = 0 \\ -I_2R_a + I_3(R_a + R_b) = U_{S2} \end{cases} \quad (3)$$

解得:

$$\begin{cases} I_1 = 112 \text{ mA} \\ I_2 = 3.19 \text{ mA} \\ I_3 = 112 \text{ mA} \end{cases}$$

则有:

$$U_{AN} = R_a(I_1 - I_2) - I_2R_x = 13.1 \text{ V} \quad (4)$$

$$U_{BN} = R_a(I_2 - I_3) - I_2R_x = -13.1 \text{ V} \quad (5)$$

但是,由于蓄电池具有稳定电压的作用,因此正极对地电压会被控制在 210~220 V 之间,而负极对地电压会被制约到 -220~-210 V 之间。

由于在 I、II 段,  $I_x \geq 1.4$  mA,因此, I、II 母均会报直流接地故障告警信号。从理论上证明了当误接电源母线时,直流系统会同时报直流接地故障。

当然,在不同的电压等级下,  $R_a$ 、 $R_b$  的取值是会发生变化的 ( $R_a=R_b$  恒成立)。由上分析也可知,因为接线问题而导致回路错误时,会发生保护动作或者拒动等结果,从而扩大事故范围。这种接地系统电路结构仍然是对称的,并非存在真正的两端接地,却出现了类似直流系统正负极接地故障的特征,因此有些地方也称为“假性接地”,该时负载两端电压下降较多,无法正常工作,这类负载常见的比如说信号灯、告警光字牌等等。

## 4 结语

如果发生直流混接现象,会对保护的正常动作影响很大,其主要原因除了上面分析的三相不一致保护拒绝动作以外,同时也会造成两个直流系统的正负极电压下降很多,造成回路负载发生故障,无法正常运行,所以这类问题需要引起高度重视。

为了避免该类问题的出现,现提出一些可供参考的举措:

1) 无论是图纸设计还是接线工作,一定要对各个站的实际直流回路进行多次核对。绘制二次回路图时,需要认真分析直流系统二次回路走向。

2) 在以后的综合自动化改造、自主实施等工程中,必须对直流系统验收到位,每个直流回路正确性与功能独立性需要进行验证;新设备验收时,必须单独验证操作回路、信号回路和开入回路,以确保回路的功能完整与独立。

3) 图纸中,不同作用的直流系统功能块需要标注清晰;

4) 辐射状直流电源可以作为新的直流系统设计方式。

5) 所拆解的每一条线头编号都需要填入继电保护安全措施票中,恢复接线时应该按照票上内容恢复。  
(下转第 55 页)