

# 一起 500 kV 变电站直流系统异极窜电故障分析与模型推算

祝石厚 张敏

(国网浙江省电力有限公司绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000)

**摘要** 本文介绍了一起 500 kV 变电站直流系统异极窜电故障的分析过程。为了深入探讨这类特殊直流绝缘故障, 根据直流绝缘监测仪的平衡桥原理, 建立直流异极窜电电路模型, 给出互窜短接电阻的求取过程。通过计算并分析直流异极窜电时控制母线电压与短接电阻的关系, 归纳直流异极窜电的特征, 以期为处理类似直流系统故障提供参考。

**关键词:** 绝缘监测仪; 直流系统; 直流接地; 直流异极窜电

## Analysis and model calculation of the inter-pole short circuit fault in DC system of a 500 kV substation

ZHU Shihou ZHANG Min

(State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd Shaoxing Power Supply Company,  
Shaoxing, Zhejiang 312000)

**Abstract** This paper introduces the analysis process of a 500 kV substation DC system inter-pole short circuit fault. In order to deeply explore this special kind of DC insulation fault, based on the balance bridge principle of the DC insulation monitor, a circuit model of the DC inter-pole short circuit is established, and the process of obtaining the short circuit resistance of mutual short circuit is given. By calculating and analyzing the relationship between the control bus voltage and the short circuit resistance during DC inter-pole short circuit, the characteristics of DC inter-pole short circuit are summarized to provide reference for handling similar DC system faults.

**Keywords:** insulation monitoring device; DC system; DC grounding; DC inter-pole short circuit

## 0 引言

变电站直流系统由充电装置、蓄电池组、馈电网络等组成, 为站内保护测控装置、信号回路、控制回路、通信装置等提供稳定可靠的电能<sup>[1]</sup>。直流系统的可靠运行直接关系着整个变电站甚至区域电网的安全稳定运行。接地故障是直流系统最常见的故障, 关于变电站直流接地故障分析与处理的研究较多<sup>[2-6]</sup>。

直流系统窜电是一种特殊的直流绝缘异常现象, 两套直流系统之间的窜电故障有 4 种: 正-正极互窜、负-负极互窜、正-负极互窜、负-正极互窜。关于直流互窜故障的研究相对较少。文献[7]指出, 采用拉路法难以查找变电站内由于接线错误引起的

直流互窜故障, 在绝缘监测装置不具备直流互窜检测功能时, 借助直流接地快速查找仪可快速定位直流系统窜电故障点, 但未建立电路模型。文献[8]建立了直流异极窜电电路模型, 但未依据模型进行实例计算。文献[9]建立了直流异极窜电电路模型, 但忽略了蓄电池组和直流充电机的工艺差异对两套直流系统互相窜电的影响, 在给出试验短接电阻的情况下进行直流异极窜电模拟计算。文献[10]分析了两起直流互窜现象, 并依据窜电模型进行实际推算, 但在进行直流异极窜电计算时, 文中直接给出短接电阻, 未介绍短接电阻的求取过程。

本文针对一起 500 kV 变电站直流系统异极窜电故障, 详细介绍故障查找、分析及处理过程, 建立异极窜电电路模型进行计算, 并给出短接电阻的

求取思路与计算公式，归纳直流异极窜电的特征。

## 1 故障案例

某 500 kV 变电站直流系统为三充两蓄双母接线，两段母线独立运行，均配置绝缘监测仪，用于监测母线电压及对地绝缘，直流系统标称电压为 110 V。

2024 年 8 月某日，该变电站以正常方式运行，站内无人工作。傍晚出现暴雨天气，变电站后台报“直流绝缘异常”信号，现场直流绝缘监测仪告警信息见表 1。直流绝缘监测仪“绝缘报警”灯、“支路报警”灯亮，显示选线均为 126 路，对应支路均为 4 号主变 220 kV 测控屏直流 I、II 段。直流 I 段绝缘巡检仪 126 支路对地电阻 6.1 kΩ，直流 II 段绝缘巡检仪 126 支路对地电阻 4.8 kΩ。

表 1 直流绝缘监测仪告警信息

| 母线   | 极性 | 母线电压/V | 对地绝缘电阻/kΩ | 电压偏移系数 |
|------|----|--------|-----------|--------|
| I 段  | 正极 | 107.1  | 999.9     | 1.84   |
|      | 负极 | -8.8   | 4.3       | 0.15   |
| II 段 | 正极 | 5.9    | 3.0       | 0.10   |
|      | 负极 | -109.5 | 999.9     | 1.88   |

运维人员使用万用表对直流 I 段、直流 II 段母线电压进行测量，测量电压与表 1 接近。

## 2 故障分析过程

根据绝缘监测仪报出的 4 号主变 220 kV 测控屏直流 I、II 段有接地支路，进一步查找该屏内对应支路。4 号主变 220 kV 测控屏共有 3 路直流空气开关：①断路器控制电源 1 空气开关，使用直流 I 段；②断路器控制电源 2 空气开关，使用直流 II 段；③测控装置及遥信直流电源空气开关，使用直流 II 段。

对 4 号主变 220 kV 断路器控制电源 1、2 进行试拉。先拉开 4 号主变 220 kV 控制电源 1 空气开关，现场绝缘监测仪不再报警，4 号主变 220 kV 测控屏直流 II 段端子排测量电压恢复正常，确认 4 号主变 220 kV 间隔存在直流异常。

封锁 4 号主变 220 kV 间隔自动化数据，拉开 4 号主变 220 kV 测控遥信电源及装置电源，绝缘异常现象未消失。

闭合控制电源 2 空气开关，再次拉开断路器控制电源 1 空气开关，并在断路器机构箱对两段直流电源电压进行测量。控制电源 2 直流电压数据正常，

但控制电源 1 正极对地电压为 0，负极对地电压为 +52 V。判断直流 I 段负极对地电压来自直流 II 段的窜电故障。

直流 I 段与直流 II 段窜电，必定通过同时接直流 I 段与直流 II 段的继电器或电缆产生。当继电器辅助触点之间绝缘不良或电缆绝缘不良时，就会发生直流 I 段与直流 II 段窜电故障。

查阅 4 号主变 220 kV 断路器控制回路，断路器合闸和分闸 1 回路如图 1 所示，断路器分闸 2 回路如图 2 所示。初步判断有 2 个可疑元件可能导致窜电：①SF<sub>6</sub> 压力闭锁重动继电器 K13，该重动继电器的辅助触点同时接入直流 I 段与直流 II 段；②SF<sub>6</sub> 表计接线盒 B11，其辅助触点通过电缆同时接入直流 I 段与直流 II 段。

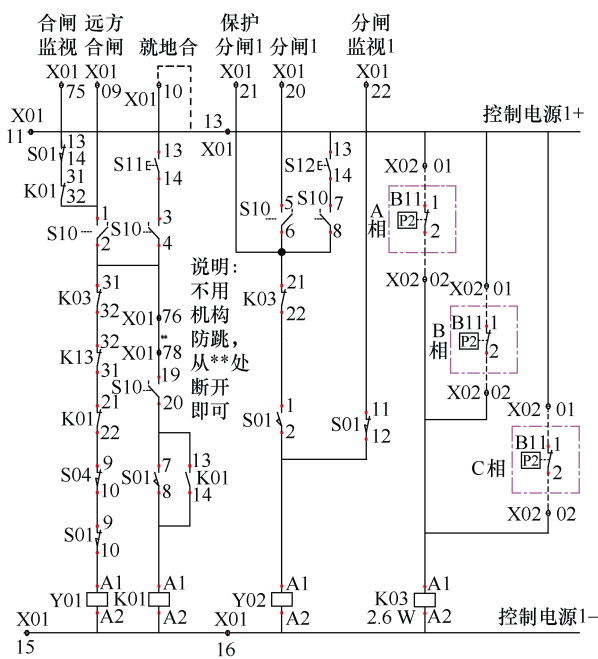


图 1 断路器合闸和分闸 1 回路

首先将重动继电器 K13 绝缘故障引起直流窜电排除。原因为：①继电器 K13 安装于断路器机构箱内，虽然现场为雷雨天气，但断路器机构箱无进水，K13 继电器无受潮现象；②图 1 的合闸回路中，断路器在合位，断路器辅助触头 S01 的 9、10 断开，合闸回路不通，不可能通过 K13 的常闭辅助触点 32、31 出现“控制电源 1-”窜电+52 V。因此，户外设备进水引起窜电的可能性较大，重点怀疑 SF<sub>6</sub> 表计接线盒辅助触点 B11 受潮短接。

查阅 GL314 型断路器控制及信号回路，该断路器 SF<sub>6</sub> 表计 B11 有 3 副触点：第一副触点（1、2）低于 0.61 MPa 时报“SF<sub>6</sub> 压力低闭锁”信号，同时

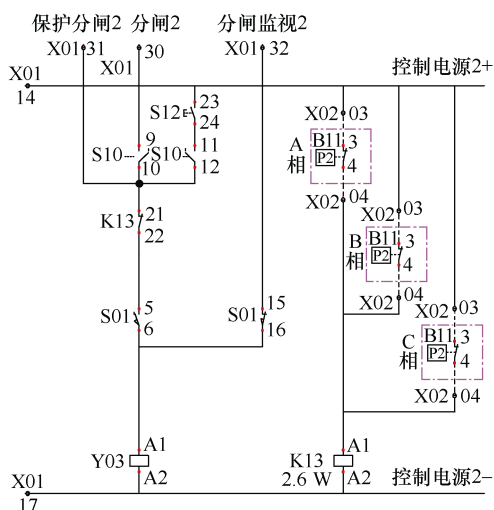


图 2 断路器分闸 2 回路

经继电器重动后闭锁断路器分、合闸，使用直流电源 I 段，如图 1 所示；第二副触点（3、4）低于 0.61 MPa 时报“SF<sub>6</sub> 压力低闭锁”信号，同时经重动后闭锁断路器分闸，使用直流电源 II 段，如图 2 所示；第三副触点（5、6）用于 SF<sub>6</sub> 压力低于 0.64 MPa 时报“SF<sub>6</sub> 压力低告警”信号，遥信电源使用直流电源 II 段。这 3 副触点由同一根 6 芯电缆引入断路器机构箱，当该电缆绝缘故障或 SF<sub>6</sub> 表计接线盒进水时，就会导致窜电现象。

使用螺丝刀解开断路器机构箱中 B、C 相 SF<sub>6</sub> 表计接线盒辅助触点 B11 的 X02:02（见图 1），用万用表测量“控制电源 1-”X01:15 仍有 +52 V 电压。当解开图 1 中 A 相 SF<sub>6</sub> 辅助触点 B11 的 X02:02 时，“控制电源 1-”X01:15 的 +52 V 对地电压消失，因此确认 A 相 SF<sub>6</sub> 表计闭锁触点回路绝缘不良。

控制电源 2 空气开关闭合，拉开控制电源 1 空气开关，在机构箱解开 A 相 3 副 SF<sub>6</sub> 表计辅助触点，使用绝缘兆欧表测量 SF<sub>6</sub> 表计触点对地绝缘，绝缘电阻均在 10 MΩ 以上。控制电源 1 空气开关闭合，拉开控制电源 2 空气开关，在机构箱解开 A 相 3 副 SF<sub>6</sub> 表计辅助触点，使用绝缘兆欧表测量 SF<sub>6</sub> 表计触点对地绝缘，绝缘电阻均在 10 MΩ 以上。SF<sub>6</sub> 表计辅助触点对地绝缘良好，因此判断并未发生直流接地，直流异常的原因为直流 II 段正极与直流 I 段负极通过一个短接电阻短接，即直流 II 段正极与直流 I 段负极窜电。

布置在户外的 SF<sub>6</sub> 表计接线盒内部接线如图 3 所示。接线盒内部接线十分紧凑，在密封材料老化、密封不良的情况下，小水珠或水汽极易导致 B11 的

图 3 SF<sub>6</sub> 表计接线盒内部接线

接线端子 2 与接线端子 3 短接，从而导致直流窜电。

由于带电更换 SF<sub>6</sub> 表计风险较大，使用热吹风机烘干 4 号主变 220 kV 断路器 A 相 SF<sub>6</sub> 表计接线盒，并使用绝缘胶布进行包扎，外部防雨罩使用保鲜膜材料进行临时防雨密封，如图 4 所示。2024 年 12 月停电期间，更换 4 号主变三相 220 kV 断路器 SF<sub>6</sub> 表计及外引线缆。

图 4 A 相 SF<sub>6</sub> 表计临时防雨措施

### 3 直流异极窜电电路模型

根据本次直流 I 段负极与直流 II 段正极窜电现象与绝缘监测原理，得到直流异极窜电等效电路模型如图 5 所示，其中  $R$  为未知的短接电阻， $R_s$  为绝缘监测装置的平衡桥内阻，出厂时确定，约为 68 kΩ。本文所述直流系统标称电压均为 110 V。

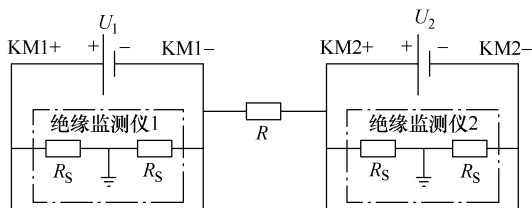
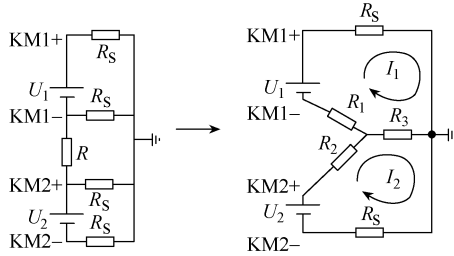


图 5 直流异极窜电等效电路模型

化简图 5, 得到简化后的等效电路模型如图 6

(a) 所示, 根据电路的三角变换得到图 6 (b) 所示等效电路, 其中  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  的计算公式如式 (1) 和式 (2) 所示。



(a) 简化等效电路模型 (b) 变换后的等效电路

图 6 化简后的等效电路模型

$$R_1 = R_2 = \frac{R_S R}{R_S + R_S + R} \quad (1)$$

$$R_3 = \frac{R_S R_S}{R_S + R_S + R} \quad (2)$$

图 6 (b) 中, 根据回路电流法可得

$$(R_1 + R_3 + R_S)I_1 - R_3 I_2 = U_1 \quad (3)$$

$$-R_3 I_1 + (R_2 + R_3 + R_S)I_2 = U_2 \quad (4)$$

理论上, 两套系统标称电压均为 110 V,  $U_1$  应与  $U_2$  相等, 但实际由于两组蓄电池的电压差异和直流充电机性能的细微差异, 现场实测  $U_1=116$  V,  $U_2=115.4$  V。虽然已知  $R_S=68$  k $\Omega$ , 但是短接电阻  $R$  未知, 因此无法求解  $I_1$  与  $I_2$ 。

考虑先求出  $R_3$ , 再根据式 (2) 求出  $R$ 。从理论分析, 将第一组绝缘巡检仪平衡电阻  $R_S$  与直流系统断开, 等效电路如图 7 所示。

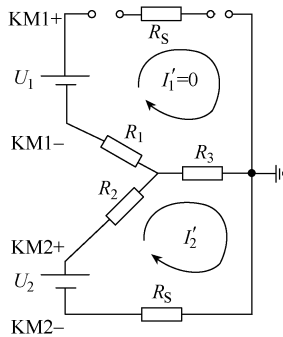


图 7 断开绝缘巡检仪 1 平衡电阻的等效电路

根据图 7 可知, 此时  $KM1-$  的对地电压即电流  $I_2'$  流过  $R_3$  产生的电压, 有

$$I_2' R_3 = U_{KM1-} \quad (5)$$

$$(R_2 + R_3 + R_S)I_2' = U_2 \quad (6)$$

联立式 (1) ~ 式 (6) 即可求得  $R$ 、 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$ 。

根据第 2 节故障分析过程, SF<sub>6</sub> 表计 B11 的接线端子 2 与接线端子 3 短接, 短接示意图如图 8 所示, 即  $KM2+$  经 B11 的 3、2 触点和 K03 的线圈至  $KM1-$ , 此时 K03 的线圈电阻即为短接电阻  $R$ 。

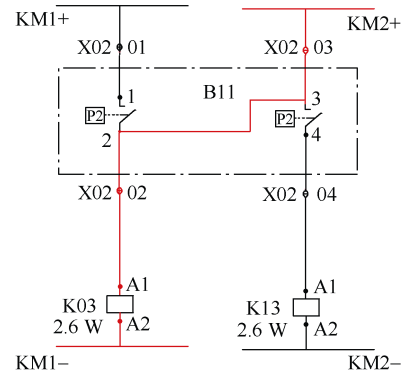


图 8 SF<sub>6</sub> 表计 B11 触点短接示意图

K03 的功率为 2.6 W, 根据  $P=U^2/R$  可计算短接电阻  $R$  约为 4.65 k $\Omega$ 。联立式 (1) ~ 式 (4) 求得  $I_1=1.649$  mA,  $I_2=1.645$  mA,  $R_1=R_2=2.248$  k $\Omega$ ,  $R_3=32.876$  k $\Omega$ 。根据图 6 (b) 可得  $U_{KM1+}=I_1 R_S=112.1$  V,  $U_{KM1-}=-I_1(R_1+R_3)+I_2 R_3=-3.8$  V,  $U_{KM2+}=I_2(R_2+R_3)-I_1 R_3=3.6$  V,  $U_{KM2-}=-I_2 R_S=-111.9$  V。

母线电压监测值、实测值与计算值见表 2。从表 2 可知, 变电站两套直流系统中两组蓄电池及充电机的细微差异对两套母线直流负荷的不对称性影响较小, 即计算值的绝对值  $|-3.8|$  V 与  $|3.6|$  V 相差很小; 所接实际直流负载的不平衡性对两套母线直流电压的不对称性影响较大, 即监测仪显示的母线电压直流 I 段的负极电压绝对值  $|-8.8|$  V 与直流 II 段的正极电压绝对值  $|5.9|$  V 偏差较大。

下面分析短接电阻  $R$  对控制母线电压的影响。

表 2 母线电压监测值、实测值与计算值

| 母线   | 极性 | 监测值/V  | 实测值/V  | 计算值/V  |
|------|----|--------|--------|--------|
| I 段  | 正极 | 107.1  | 108.2  | 112.1  |
|      | 负极 | -8.8   | -7.8   | -3.8   |
| II 段 | 正极 | 5.9    | 5.9    | 3.6    |
|      | 负极 | -109.5 | -109.5 | -111.9 |

此时,忽略充电机、蓄电池组与负荷不平衡性的影响,假设  $U_1=U_2=110\text{ V}$ ,取  $R_S=68\text{ k}\Omega$ ,将短接电阻  $R$  作为变量,根据式(1)~式(4)计算互窜时控制母线电压数值与短接电阻的关系,见表3。由表3可知,直流异极互窜时控制母线电压相对标称电压的偏移量主要取决于短接电阻  $R$  与平衡电阻  $R_S$  的比值:短接电阻为0,相当于金属性短路,I段负极与II段正极电压均为0;短接电阻无穷大时,相当于两套系统正常分列运行。

表3 控制母线电压与短接电阻关系

| 短接电阻/k $\Omega$  | I段正极电压/V | I段负极电压/V | II段正极电压/V | II段负极电压/V |
|------------------|----------|----------|-----------|-----------|
| 0                | 110.0    | 0        | 0         | -110.0    |
| 6.8(0.1 $R_S$ )  | 105.0    | -5.0     | 5.0       | -105.0    |
| 13.6(0.2 $R_S$ ) | 100.8    | -9.2     | 9.2       | -100.8    |
| 34.0(0.5 $R_S$ ) | 91.6     | -18.4    | 18.4      | -91.6     |
| 68.0( $R_S$ )    | 82.5     | -27.5    | 27.5      | -82.5     |
| 680.0(10 $R_S$ ) | 59.8     | -50.2    | 50.2      | -59.8     |
| $\infty$         | 55.0     | -55.0    | 55.0      | -55.0     |

#### 4 结论

当发生两路直流正负极互窜故障时,基于平衡桥原理的绝缘监测装置两段母线电压均会下降,容易误判为两段母线均接地;两套直流系统中两组蓄电池、充电机和直流负荷的差异,导致异极窜电时两段控制母线电压非完全对称性偏移。直流异极互窜时,控制母线电压相对标称电压的偏移量主要取决于短接电阻  $R$  与平衡电阻  $R_S$  的比值。

有双路直流电源接入的设备发生绝缘故障时,均可能出现直流窜电现象,500 kV 变电站内户外断路器  $\text{SF}_6$  表计控制与遥信回路是发生直流互窜故障概率最高的电气回路。因此,在日常运检巡视过程中,应加强对  $\text{SF}_6$  表计防潮性能的检查,在  $\text{SF}_6$  表计上方加装防雨罩,还应对表计航空插头采取保护

措施,避免因长期日晒引起表计航空插头材料老化而产生密封不良现象,此外,表计外引线缆波纹管最下端应加装滴水孔,以防积水。

#### 参考文献

- [1] 董楚然,陈豪,申杰. 变电站直流系统接地故障的危害及处理[J]. 电力与能源, 2024, 45(3): 335-338.
- [2] 张勋,李刚. 变电站直流系统绝缘检测方法研究[J]. 电气技术, 2016, 17(10): 69-73.
- [3] 董升,陈文通,郑晓东,等. 一起直流系统母线绝缘下降故障实例分析[J]. 电气技术, 2015, 16(3): 97-99.
- [4] 熊萍,于雅丽. 变电站直流绝缘监测装置误报漏报接地支路原因分析[J]. 农村电气化, 2021(12): 23-24.
- [5] 张珂卫,屈乾达,陈小平,等. 500 kV 变电站直流系统接地故障的分析与处理[J]. 电工技术, 2021(8): 99-100, 103.
- [6] 李炎,严太山,张昭源,等. 变电站站用直流系统接地现象及辨识[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2023, 28(2): 15-21.
- [7] 罗六洋. 两套直流系统窜电故障定位分析[J]. 云南电力技术, 2021, 49(5): 58-60.
- [8] 李江龙,王建峰,郭亮. 综合自动化变电站直流接地常见故障原因分析及处理[J]. 山西电力, 2017(5): 46-50.
- [9] 马俊岭,张习鹏,樊贤,等. 一起基于平衡桥原理的直流绝缘监察装置接地报警事故处理与分析[J]. 电气技术, 2018, 19(7): 113-115.
- [10] 王彬,王莉,李小春,等. 某 500 kV 变电站直流接地叠加多点窜电故障分析[J]. 电气技术, 2024, 25(8): 81-84.

收稿日期: 2025-02-14

修回日期: 2025-04-07

作者简介

祝石厚(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事500 kV 继电保护与综合自动化检修技术管理工作。