

# 用户变电站110kV线路单相断线分析计算研究

薛俊亮

山西潞安配售电有限公司, 山西 长治 046204

**摘要：**断线是电力系统中发生较少、但后果严重的事故。特别是对用户变电站现场工作人员来说，如何快速处理事故、恢复设备供电，更是没有过多经验可借鉴。本文通过对一起用户终端变电站110kV高压线路单相断线事故进行分析，介绍了现场工作人员处理方法，对事故征象进行了分析、总结，对保护装置功能进行了简单介绍，并用对称分量法进行了故障电流计算，得出了断线故障时会有较大的零序电流产生的结论。

**关键词：**单相断线；X射线检测技术；零序电流保护

## Analysis and Calculation of Single-Phase Break of 110kV Line in Customer Substation

Xue Junliang

Shanxi Lu'an distribution electricity co., LTD. Changzhi, Shanxi 046204

**Abstract：** Line breaking is a rare but serious accident in power system. Especially for the on-site staff of the user substation, how to quickly deal with the accident and restore the power supply of the equipment is not much experience to learn from. Based on the analysis of a single-phase line break accident of 110kV high voltage line in a user terminal substation, this paper introduces the treatment methods of on-site staff, analyzes and summarizes the signs of the accident, briefly introduces the function of the protection device, and calculates the fault current with symmetrical component method, and draws the conclusion that there is a large zero sequence current generated when the line break fault occurs.

**Keywords：** single-phase broken line; X-ray detection technology; zero sequence current protection

### 引言

本文提出了实际工作中从一次设备到保护投退等行之有效的避免断线事故发生的措施，尤其是用X射线检测技术对耐张线夹及GIS设备进行检测的方法，做到了对肉眼无法巡视的设备死角的检测，可以清晰呈现设备内部运行情况，大幅度提高了电力系统的供电可靠性<sup>[1]</sup>。

### 一、2022年3月31日18时07分

某110kV用户终端变电站后台弹出多个报警信息，站内线路、主变等设备保护启动，主变“嗡嗡”声音消失，但无开关跳闸。经现场查看，进线开关有功功率、无功功率大幅下降，B相电流为0，110kV B相电压显示异常；用高压验电器验电后，B相失电，初步判定原因为B相失压。变电站值班员随即进行倒闸操作，将站内所有运行开关转热备用，通过备用回路恢复站所供电。从事故发生到恢复用户正常供电，持续了约38分钟。

馈出线开关恢复供电后，运维单位安排人员对线路进行带电巡视，最后发现故障为上级站线路侧B相刀闸铜铝线夹断裂，从而造成此次断线事故。此次事故，该站供电的多台10kV高压电机、风机、水泵及低压电机均停转，部分电机烧毁，相关企业生产线全部瘫痪，经济损失严重<sup>[2]</sup>。

### 二、事故总结

断线事故在运行过程中发生几率极低，事故征象和中性点接地方式有关，实际处理过程可借鉴资料较少，故此次处理过程时间较长。

1. 线路保护装置未动作跳闸<sup>[3]</sup>。该110kV线路配有线路差动保护、距离保护及零序保护，但只有告警信息，并未出口动作。经分析，差动保护因两侧电流平衡，不产生差流，不应动作；距离保护采集到的B相电压有值，无流，不符合动作判据，不应动作；零序保护因投入方向，也不动作。B相无流、电压异常，装置报警，但各种保护不符合出口动作条件，所以线路保护出口不动作正确。

2. 主变保护装置未动作跳闸。该站两台主变除非电量保护外，配备有复压闭锁过流保护、零序保护。两种电流保护电流量

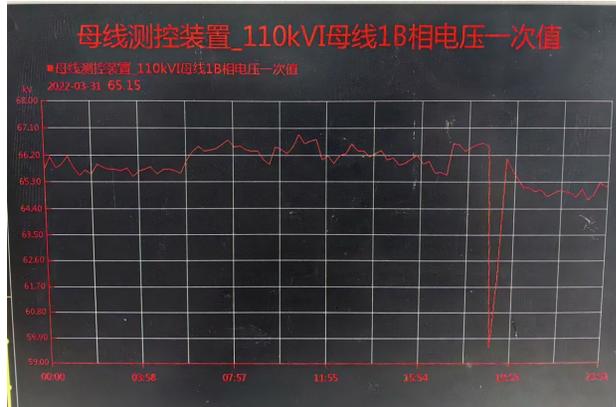
小于保护设定值，保护出口不动作正确。

3.主变正常运行时的“嗡嗡”声消失。变压器因为缺相，磁路不通，声音消失。

4.10kV电机、水泵等停转。电机缺相无法正常运行，有保护的跳闸，无保护的停转或故障损坏<sup>[4]</sup>。

5.B相断开，由于健全相A、C相对断开相B存在电磁耦合，故B相电压不等于0，如图1所示。B相电压值决定于线路分布电容及B、C相负荷电流产生的零序电流分量。

6.站内功率因数满足要求，无功补偿装置未投运。

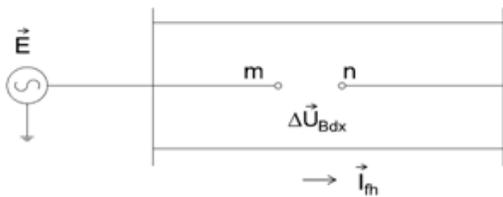


>图1 B相电压图

### 三、B相断线计算

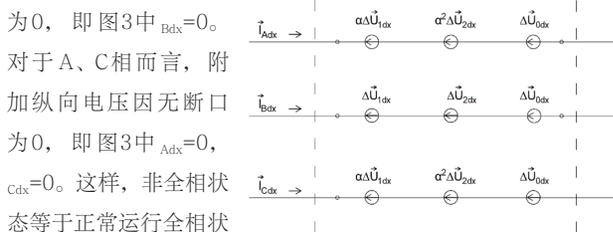
断线故障不同于短路故障，它属于纵向故障，但分析计算方法和短路计算一样，仍采用对称分量法进行计算<sup>[5]</sup>。

B相断线后，形成非全相状态，B相电流为0，当断线前有负荷电流时，在断点m、n两端就产生了故障电压。如图2所示。



>图2 简化系统接线图

应用叠加原理在图2中断点之间附加一组纵向电压，如图3所示，在此电压作用下产生一组故障分量电流，此电流与B相负荷电流叠加后合成电流



>图3 断线处附加电压

作用下的全相状态的叠加。故断线后的计算是故障状态的故障分量与正常负荷的叠加<sup>[6]</sup>。

根据断线处边界条件得各序电流、电压为

$$A_{dx} = \alpha I_{1dx} + \alpha^2 I_{2dx} + I_{0dx} \quad (1)$$

$$B_{dx} = I_{1dx} + I_{2dx} + I_{0dx} = 0 \quad (2)$$

$$C_{dx} = \alpha^2 I_{1dx} + \alpha I_{2dx} + I_{0dx} \quad (3)$$

$$\Delta A_{dx} = \alpha \Delta I_{1dx} + \alpha^2 \Delta I_{2dx} + \Delta I_{0dx} = 0 \quad (4)$$

$$\Delta B_{dx} = \Delta I_{1dx} + \Delta I_{2dx} + \Delta I_{0dx} \quad (5)$$

$$\Delta C_{dx} = \alpha^2 \Delta I_{1dx} + \alpha \Delta I_{2dx} + \Delta I_{0dx} = 0 \quad (6)$$

$$(4)(5)(6) \text{ 三式相加, } \Delta B_{dx} = 3 \Delta I_{0dx} \quad (7)$$

$$\alpha X \text{ 式(6) - 式(4), 得 } \Delta I_{1dx} = \Delta I_{0dx} \quad (8)$$

$$\text{式(6) - } \alpha X \text{ (4), 得 } \Delta I_{2dx} = \Delta I_{0dx} \quad (9)$$

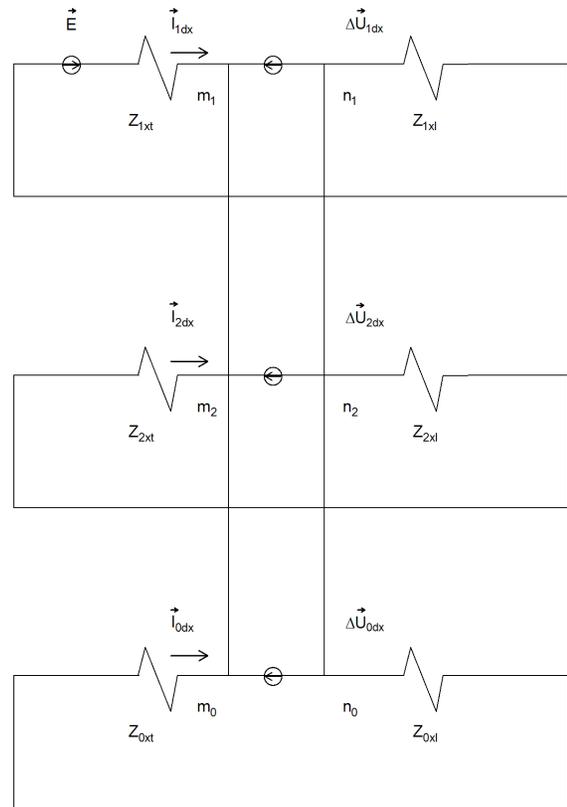
$$\text{由(7)(8)(9)三式可知, } \Delta I_{1dx} = \Delta I_{2dx} = \Delta I_{0dx} = \Delta B_{dx} \quad (10)$$

由上述式子，可以作出B相断线序网连接图，如图4所示。

其中，

$Z_{1xt}$ 、 $Z_{2xt}$ 、 $Z_{0xt}$ —系统正、负、零序阻抗；

$Z_{1xl}$ 、 $Z_{2xl}$ 、 $Z_{0xl}$ —线路正、负、零序阻抗；



>图4 断线计算序网连接图

1.在图4中，令  $E=0$ ，则在附加纵向电压下产生的断线电流故障为

$$I_{1dx} = -\Delta U_{1dx} / Z_{1\Xi} \quad (11)$$

$$I_{2dx} = -\Delta U_{2dx} / Z_{2\Xi} \quad (12)$$

$$I_{0dx} = -\Delta U_{0dx} / Z_{0\Xi} \quad (13)$$

式子中， $Z_{1\Xi} = Z_{1xt} + Z_{1xl}$ ， $Z_{2\Xi} = Z_{2xt} + Z_{2xl}$ ， $Z_{0\Xi} = Z_{0xt} + Z_{0xl}$ 。

上面三式中电流正方向与电压正方向假设方向相反，故取负号。

2.在图4中，令  $\Delta U_{1dx} = \Delta U_{2dx} = \Delta U_{0dx} = 0$ ，即将附加电压短接，则

在电源单独作用下产生断线前的负荷电流  $I_{fh}$  为：

$$I_{B=I_{fh}} = I_{fh} / Z_{1\Sigma} \quad (14)$$

由叠加原理可知，断线后 B 相电流应为 0，即将分别分析结果叠加，得

$$I_{Bdx} = I_{fh} + I_{1dx} + I_{2dx} + I_{0dx} = 0 \quad (15)$$

将式 (11) (12) (13) 代入到式 (15)，有

$$I_{fh} = \Delta I_{1dx} (1/Z_{1\Sigma} + 1/Z_{2\Sigma} + 1/Z_{0\Sigma}) \quad (16)$$

$$\Delta I_{1dx} = I_{fh} (1/Z_{1\Sigma} + 1/Z_{2\Sigma} + 1/Z_{0\Sigma}) \quad (17)$$

由式 (10) 和式 (17) 可得，

$$\Delta I_{Bdx} = 3I_{fh} (1/Z_{1\Sigma} + 1/Z_{2\Sigma} + 1/Z_{0\Sigma}) \quad (18)$$

即断口处电压为  $3I_{fh} (1/Z_{1\Sigma} + 1/Z_{2\Sigma} + 1/Z_{0\Sigma})$ 。

由式 (10) (11) (12) (13) (17) 计算断线后各序电流：

正序电流为负荷电流与故障分量正序电流叠加，即

$$\begin{aligned} I_{1dx} &= I_{fh} + I_{1dx} \\ &= I_{fh} - \Delta I_{1dx} / Z_{1\Sigma} = I_{fh} - I_{fh} / [(1/Z_{1\Sigma} + 1/Z_{2\Sigma} + 1/Z_{0\Sigma}) Z_{1\Sigma}] \\ &= I_{fh} Z_{1\Sigma} / [Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma} / (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})] \end{aligned} \quad (19)$$

负序电流即故障分量负序电流，负荷电流中不考虑负序电流分量。

$$\begin{aligned} I_{2dx} &= -I_{fh} / [(1/Z_{1\Sigma} + 1/Z_{2\Sigma} + 1/Z_{0\Sigma}) Z_{2\Sigma}] \\ &= -I_{fh} Z_{1\Sigma} / [Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma} / (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})] \times Z_{0\Sigma} / (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}) \end{aligned} \quad (20)$$

零序电流即故障分量零序电流，负荷电流中不考虑零序电流分量。

$$\begin{aligned} I_{0dx} &= -I_{fh} / [(1/Z_{1\Sigma} + 1/Z_{2\Sigma} + 1/Z_{0\Sigma}) Z_{0\Sigma}] \\ &= -I_{fh} Z_{1\Sigma} / [Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma} / (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})] \times Z_{2\Sigma} / (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}) \end{aligned} \quad (21)$$

经推导计算得，断线处全电流为

$$I_{A dx} = \alpha I_{1 dx} + \alpha^2 I_{2 dx} + I_{0 dx} = I_{fh} X [-1.5 Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma} + j (1 + 0.5 Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma})] / (1 + Z_{2\Sigma} / Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma}) \quad (22)$$

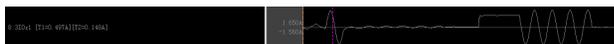
$$I_{B dx} = I_{1 dx} + I_{2 dx} + I_{0 dx} = 0 \quad (23)$$

$$I_{C dx} = \alpha^2 I_{1 dx} + \alpha I_{2 dx} + I_{0 dx} = I_{fh} X [-1.5 Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma} - j (1 + 0.5 Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma})] / (1 + Z_{2\Sigma} / Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma}) \quad (24)$$

断线后三倍零序电流为

$$3I_{0 dx} = I_{A dx} + I_{B dx} + I_{C dx} = (-2 I_{fh} X 1.5 Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma}) / (1 + Z_{2\Sigma} / Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma}) = -3 I_{fh} / (1 + Z_{2\Sigma} / Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma}) \quad (25)$$

此次发生故障的变电站故障录波装置零序电流如图 5 所示。



>图5 零序电流故障录波图

由图可知，发生单相断线故障时，会产生较大的零序电流。这也对我们分析零序电流故障动作增加了一种思路，不能单纯的认定零序电流产生的原因就是单相接地或三相负荷不平衡<sup>[7]</sup>。

在实际应用中，多认为  $Z_{2\Sigma} = Z_{1\Sigma}$ ，此情况下断线后各序电流分量变形为

$$I_{1 dx} = I_{fh} / [1 + Z_{0\Sigma} / (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})] \quad (26)$$

$$I_{2 dx} = -I_{fh} / (2 + Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma}) \quad (27)$$

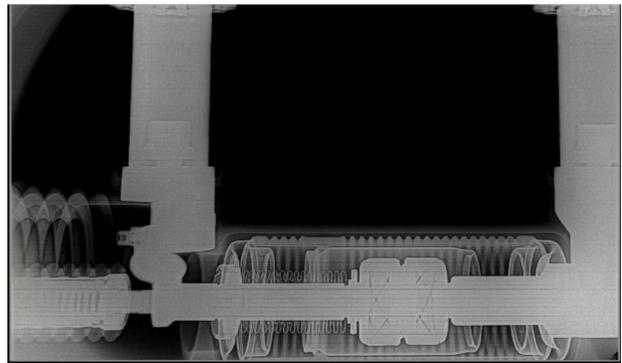
$$I_{0 dx} = -I_{fh} / (1 + 2 Z_{0\Sigma} / Z_{2\Sigma}) \quad (28)$$

#### 四、采取措施

1. 对 GIS 设备、线路耐张线夹开展 X 射线检测，避免因 GIS 内部故障及耐张线夹压接不良引起断线<sup>[8]</sup>。

线路耐张线夹无论采用哪种压接方式，压接完成后巡视人员通过肉眼无法观察到内部情况。压接工艺不规范，引起压接质量不满足要求，进一步引发断线事故发生<sup>[9]</sup>。国家电网已颁布企业标准 QGDW11793-2017《输电线路金具压接质量 X 射线检测技术导则》，建议对耐张线夹开展 X 射线检测，降低因压接质量引起断线的几率。

GIS 设备同样如此。因设备封闭在充满 SF6 气体的金属外壳内，巡视人员也无法对其内部构造进行观察<sup>[10]</sup>。运行时间较长的 GIS 设备，因各种原因发生的导电杆脱落事故时有发生。而对 GIS 设备进行 X 射线检测，可以对其内部结构进行检测，避免类似事故发生。



>图6 GIS 设备的 X 射线检测结果

2. 站所运维单位对站所铜铝过渡线夹及穿墙套管等易忽视部位重点管理。实践表明，铜铝过渡线夹在大负荷线路中使用年限久后断裂几率较大，建议采用铜或铜铝复合材料代替传统的铜铝过渡材料。

3. 对耐张塔 U 型环与绝缘子连接处、直线塔悬垂线夹的销等金具进行检查，对销脱落或锈蚀严重的情况应及时处理。如图 7 所示。



>图7 某线路耐张塔销子脱落

4. 对进线侧装有备自投或快速切换装置的站所, 尝试将最末段零序电流保护退出方向, 并结合负荷情况计算整定值, 让其断线时动作于跳闸, 这样可以通过备自投或快切装置切换至另一电源, 避免造成电机烧毁。该用户站经此事故后, 与上级调度部门沟通, 重新调整了零序电流定值, 并退出方向保护。

## 五、结语

断线事故在实际运行过程中发生几率极低, 故事故处理时现场人员往往无从下手。供电管理部门应通过事故预想, 并结合之前断线事故征象, 同时在继电保护方面及设备运维方面下功夫, 才能有效减少断线事故造成的经济损失。

## 参考文献

- [1] 崔家佩、孟庆炎、陈永芳、熊炳耀.《电力系统继电保护与安全自动装置整定计算》[M].中国电力出版社.1993.3.
- [2] DLT741-2019《架空输电线路运行规程》[S].国家能源局.2019.6.
- [3] 何仰赞、温增银.《电力系统分析》[M].华中科技大学出版社.2001.8.
- [4] QGDW11793-2017《输电线路金具压接质量 X 射线检测技术导则》[S].国家电网有限公司.2018.9.
- [5] DLT 584-2007《3kV ~ 110kV 电网继电保护装置运行整定规程》[S].中华人民共和国国家发展和改革委员会.2008.6.
- [6] GB/T 14285-2006《继电保护和安全自动装置技术规程》[S].中华人民共和国国家标准化委员会.2006.11.
- [7] 罗学琛.《SF6 气体绝缘全封闭组合电器(GIS)》[M].中国电力出版社.1998.11.
- [8] 陈永明;刘昶;李静;杨茹;侯超;姚鹏.基于电压变化特征的 110 kV 线路断线故障自适应判别方法[J].电力系统及其自动化学报,2022(08).
- [9] 蔡正梓;樊亮;刘辉;沙立成;孙鹤林;张印宝.110 kV 负荷线路单相断线故障特性分析及调度策略[J].农村电气化,2022(04).
- [10] 孙朝辉;鲍有理;冯靖;徐培栋;许欢.110 kV 主变高压侧断线故障分析及保护新方法[J].电世界,2021(03).