

# 接地故障电流入侵差动保护导致其误动作的实例分析

苏治<sup>1</sup>, 韩广瑞<sup>1</sup>, 潘向华<sup>2</sup>, 高广玲<sup>3</sup>, 尹阳阳<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学, 山东 淄博 255049; 2. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250000;  
3. 国网技术学院, 山东 济南 250002)

**摘要:** 变电站220 kV线路发生单相接地短路时, 其主变压器差动保护动作跳闸, 在现场发现变压器35 kV侧CT二次回路C相对地绝缘击穿, 造成了二次两点接地。分析认为, 差动保护的動作是地电流起动的。当高压线路上发生单相或两相接地故障时短路电流进入大地, 是地电流的作用导致变电站地电位的不等, 在两个接地点之间产生了电位差 $\Delta U$ , 由此在保护的输入通道附加了一个地电流 $\Delta I$ , 并且电流超过了保护的整定值, 造成了保护的不正确动作。采取了控制地电位的升高等措施以后效果良好, 再未出现类似的问题。

**关键词:** 地电流入侵; 差动保护; 区外故障; 误动作; 绝缘击穿

## Analysis of differential protection malfunction caused by earth current invasion

SU Zhi<sup>1</sup>, HAN Guang-rui<sup>1</sup>, PAN Xiang-hua<sup>2</sup>, GAO Guang-ling<sup>3</sup>, YIN Yang-yang<sup>1</sup>

(1. Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250000, China; 3. State Grid of China Technology College, Jinan 250002, China)

**Abstract:** The transformer differential protection of the No. 3 transformer in substation incorrectly operated when the external single-phase fault occurred on 220 kV power line. The inspection found that the secondary side of the C-phase CT 35 kV side of the transformer phase-to-ground insulation damaged, which caused the two-point earthed faults. The earth current caused the changing of ground potential of substation when the single phase fault occurred on power line, which resulted in voltage  $\Delta U$  between the two-point earthed. The voltage  $\Delta U$  produced an additive current  $\Delta I$ , the value of which exceeded the protection settings, resulting in the malfunction of transformer differential protection. The problem has been solved by taking measures to control the value of the ground potential.

**Key words:** earth current invasion; differential protection; external fault; maloperation; insulation breakdown

中图分类号: TM77 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2014)20-0135-05

## 1 故障现象

2013年6月12日, 220 kV 华德至双庙线 C 相发生单相接地故障, 故障点的位置以及滨洲站附近电网的结构情况见图 1。

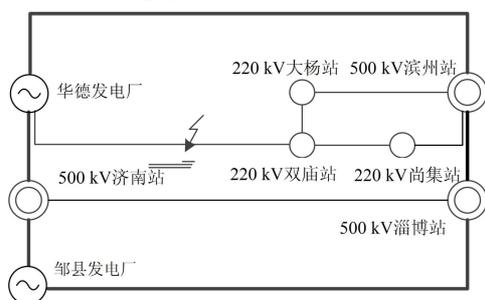


图 1 220 kV 华双线故障时的系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the system Huashuang fault

与此同时, 滨洲站的 #3 主变保护 B 屏的比率差动保护动作; #3 主变三侧断路器全部跳闸, 变压器停电。500 kV 滨洲站的 #3 主变等一次系统结构见图 2。

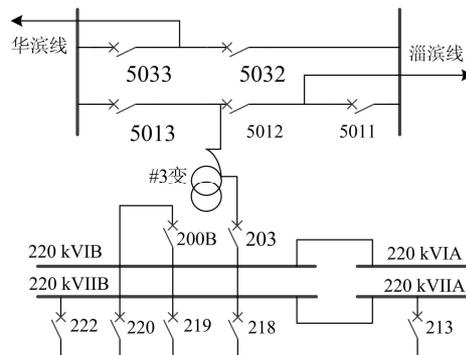


图 2 500 kV 滨洲站一次接线图

Fig. 2 500 kV Binzhou station wiring diagram

故障发生时滨州站站站内无任何操作，并且滨州地区天气晴好，因此不是天气原因导致的故障而跳闸。

#3 主变压器停电甩掉有功负荷 126.9 MW、无功负荷 53.9 Mvar，停电前 500 kV 侧电流 150 A、220 kV 侧电流 350 A、35 kV 侧电流接近 0A。

## 2 保护原理简介

纵向差动保护是主变压器保护中必不可少的组成部分<sup>[1-3]</sup>，线路故障发生时该保护出现了误动现象。

对于微机型比率制动特性的差动保护，其原理接线见图 3。

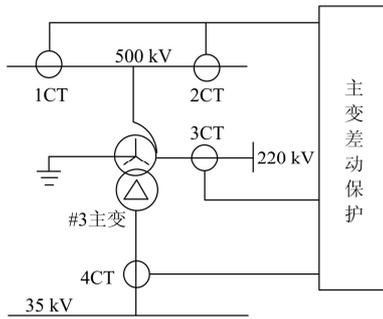


图 3 主变差动保护原理接线图

Fig. 3 Transformer protection principle wiring diagram

比率原理差动保护动作方程如下<sup>[4-5]</sup>

$$I_{op} > I_{opmin} \quad (I_{bra} \leq I_{bramin})$$

$$I_{op} \geq I_{opmin} + S(I_{bra} - I_{bramin}) \quad (I_{bra} > I_{bramin})$$

式中： $I_{op}$  为动作电流； $I_{opmin}$  为整定的最小动作电流； $I_{bra}$  为制动电流； $I_{bramin}$  为整定的最小制动电流； $S$  为比率制动特性斜率，斜率的范围 0~1，三侧电流的极性：指向变压器为正方向。

$$I_{op} = |\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3|$$

$$I_{bra} = \max\{|\dot{I}_1| + |\dot{I}_2| + |\dot{I}_3|\}$$

式中， $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 、 $\dot{I}_3$  分别为变压器 500 kV、220 kV、35 kV 侧的电流互感器二次侧的电流。

### 2.1 正常运行及区外接地故障时

纵向差动保护按躲过最大不平衡电流整定， $I_{opmin} = 5 \text{ A}$ 。当系统正常运行时，差动保护流过三侧短路的不平衡电流，保护能够躲过；当发生区外接地故障时，变压器流过零序电流，变压器三侧零序电流均处于平衡状态，纵向差动保护检测不到零序电流。因此，当变压器正常运行或区外发生接地与相间短路时差动保护不会动作。

### 2.2 区内发生相间或接地故障时

当变压器纵向差动保护的区内发生相间短路故障时，三侧差的电流不再为 0，当数值达到定值时，

即  $I_{op} > I_{opmin}$ ，测点进入动作区，保护动作跳闸，其动作特性见图 4；对于区内单相接地故障，与区外单相接地一样，保护也不作反应。

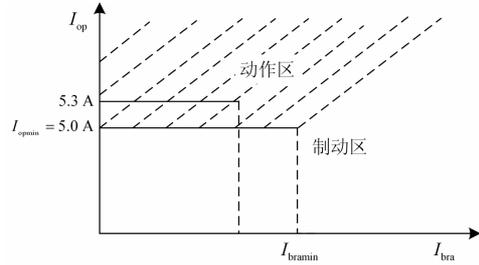


图 4 CT 二次电流进入保护的動作区

Fig. 4 CT secondary current entering protection zone

## 3 检查过程

在 220 kV 华双线发生单相接地故障，滨州站 #3 主变差动保护动作，保护报告显示为 C 相故障、断路器跳闸。当尚未判明滨州站内部是主变故障还是保护误动时，对有关的一次系统以及二次设备进行了全面的检查与分析。结果表明，站内一次设备状况良好，#3 主变油样的色谱化验结果正常。二次系统检查结果如下。

### 3.1 保护采样检查

对 #3 主变保护 B 屏差动保护装置采样进行了检查，结果正确。其中 35 kV 低压侧三相采样试验结果见表 1。

表 1 低压侧三相采样试验结果

Table 1 Three-phase sample results in low voltage side

外加电流	1.0 A	5.0 A	10.0 A
A 相	1.0 A	5.0 A	10.0 A
B 相	1.01 A	5.01 A	10.02 A
C 相	1.0 A	5.0 A	10.0 A

### 3.2 CT 二次回路检查

将保护打印报告所提供的故障瞬间 B 屏差动保护 35 kV 侧的电流与 A 屏的数据进行比较，B 屏电流为 5.3 A，A 屏电流为 0.01 A，数值差别较大，因此对 #3 主变压器附近的二次电流回路的绝缘电阻进行了测试，并对与 B 屏差动保护相关的电流回路进行了通电测试。

35 kV 侧 CT 二次回路绝缘情况，#3 主变压器本体 CT 二次电缆接线中，T1c-2S1 芯线的对地绝缘击穿，绝缘电阻值为零；其他芯线的绝缘水平正常；将电流互感器甩掉外回路，其二次线圈绝缘电阻正常。

35 kV 侧 CT 二次回路通电检查情况，从主变本体低压侧 C 相 CT 二次接线盒处通电检查，结果如

下: 原始状态下的试验, 外加 14.0 A, B 屏保护装置显示 5.3 A; 更换绝缘损坏的电缆后试验, 外加 15.0 A, B 屏保护装置显示 15.0 A, 显示的结果与外加的电流相统一。

在上述电流中, 出现了两个 5.3 A, 是值得考虑的。

#### 4 原因分析

结合上述检查结果与保护基本原理, 针对变压器差动保护不正确动作的问题进行以下分析。

##### 4.1 系统故障时注入保护的电流超过了定值

根据纵向差动保护的動作特性图 4 可知, 从主变低压侧 CT 二次回路注入保护的电流 5.3 A, 超过了保护的定值, 即  $I_{op} = 5.3 \text{ A} > I_{opmin}$ , 显然, 进入了保护的動作区, 此时保护動作是必然的。问题是, 应当理清此电流是如何产生的。

变电站电网的结构可知, 35 kV 侧接的是站用电负荷, 也不存在大电动机的电流倒供现象, 因此, 35 kV 侧不可能提供短路电流。况且, 当 220 kV 线路发生接地故障时, 在 35 kV 侧产生的电流由于接线的原因为二次两两抵消, 根据电路图 5, 此时保护测量的三相电流分别为

$$\begin{aligned} \dot{i}_a &= \dot{i}_{AB} - \dot{i}_{CA} = \dot{i}_0 - \dot{i}_0 = 0 \\ \dot{i}_b &= \dot{i}_{BC} - \dot{i}_{AB} = \dot{i}_0 - \dot{i}_0 = 0 \\ \dot{i}_c &= \dot{i}_{AC} - \dot{i}_{BC} = \dot{i}_0 - \dot{i}_0 = 0 \end{aligned}$$

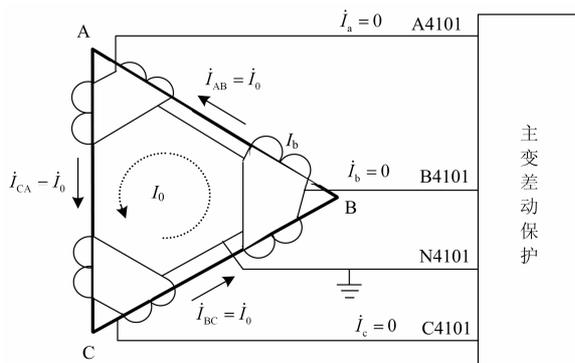


图 5 零序电流在二次回路中被抵消

Fig. 5 Zero-sequence current in secondary circuit canceled

##### 4.2 保护注入的电流是装置与大地的分流

对于电力系统的继电保护, 电流输入的正常渠道是由 CT 的一次电流传变到二次的<sup>[6]</sup>。如果保护均正常的话, 一次侧的电流会在 A、B 两套设备中有相同的反应, 但此地 A 屏没有电流, 仅 B 屏有电流。B 屏的电流与 35 kV 侧 CT 二次两点接地密切相关。

在 220 kV 高压线路发生单相接地短路时, 故障电流进入变电站的接地网, 对于电流回路两点接地的差动保护来说会得到分流, 正是这一分流的作用, 造成了保护的误动作。

高压系统接地故障时, 电流的分布电路示意图见图 6<sup>[7]</sup>, 图中  $I_d$  为短路电流,  $I_{d1}$ 、 $I_{d2}$ 、 $I_{d3}$  为分流电流, 差动保护的分流电流为  $\Delta I$ , 显然,  $\Delta I = I_{d2} = kI_d = 5.3 \text{ A} > I_{opmin}$ , 测点进入差动保护动作区, 见图 4。

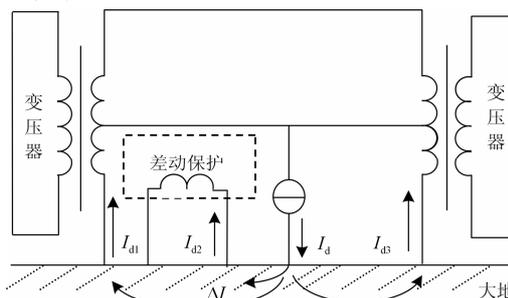


图 6 当系统单相接地故障时地电流进入保护

Fig. 6 When the system is single-phase ground fault, current flows into the ground to protect

##### 4.3 电流回路的绝缘击穿导致了两点接地

对于大电流接地系统, 当雷电经线路对地放电或发生接地故障时, 故障电流进入变电站的地网, 其电流的路径见图 7。此时, 变压器中性点的电位瞬间升高, 中性点处 CT 二次电缆屏蔽层接地点对保护室内的接地点之间的电位差不再是 0, 此电位差的作用使二次回路绝缘差的部位被击穿, 形成另一个接地点。由此在保护安装处的电流输入通道 C4401 与变压器中性点之间产生了一个电压  $\Delta U$ , 电流输入附加了一个电流  $\Delta I$ 。这是导致保护误动作的根源所在<sup>[8]</sup>。

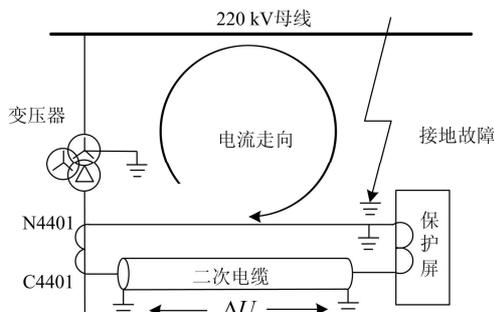


图 7 雷电对地放电回路

Fig. 7 Circuit of lightning discharge to ground

##### 4.4 纵向差动保护不反应零序电流

前曾述及, 纵向差动保护不反应零序电流, 对于 500 kV 侧、220 kV 侧零序电流是在计算时被抵消<sup>[9]</sup>。

500 kV 侧:

$$|\dot{I}_{a1} + \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{c1}| - 3I_{01} = 0$$

220 kV 侧:

$$|\dot{I}_{a2} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{c2}| - 3I_{02} = 0$$

式中:  $I_{a1}$ 、 $I_{b1}$ 、 $I_{c1}$  为 500 kV 侧三相电流;  $I_{a2}$ 、 $I_{b2}$ 、 $I_{c2}$  为 220 kV 侧三相电流;  $3I_{01}$ 、 $3I_{02}$  分别为 500 kV、220 kV 侧的零序电流。

35 kV 侧: 零序电流则靠接线过滤掉了。

在 35 kV 二次回路出现第二接地点后, 零序电流即由 CT 一次变二次的电流, 依然被短接、被虚掉, 此时进不了差动保护。

综上所述, 当高压线路上发生接地故障时短路电流进入大地, 是地电流的作用导致变电站地电位的升高, 造成了 CT 二次的两点接地; 也是地电流直接进入保护, 造成了保护的不正确动作。如此, CT 二次第二个接地点是如何形成的, 地电流又是怎样进入差动保护的就有了明确的解释。

同样, 不仅差动保护 CT 二次可能形成第二个接地点, 其他 CT, 包括计量用的, 故障录波器用的, 也能形成第二个接地点; 地电流也能进入相关的设备, 造成类似的影响。

在 220 kV 微山站 C 相故障时, A 相 CT 二次绝缘击穿形成第二个接地点, 并产生虚拟的短路电流, 即地电流, 其录波图形见图 8。

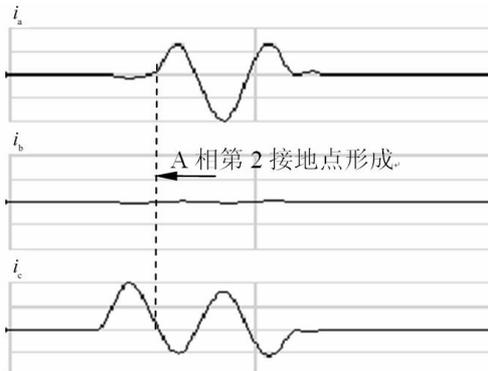


图 8 “地电流” 图形

Fig. 8 ‘Ground current’ graphics

### 5 防范措施

为了防止类似事件的发生, 可采取以下措施:

- 1) 增加变压器就地端子箱的 CT 端子的间距  
增加变压器就地端子箱的 CT 端子 C4401 的间距, 增加 8 mm 的空端子。
- 2) 保持 CT 二次线的对地绝缘处于良好状态  
将接地的 C4401 电缆换为绝缘良好的电缆。加强设备巡视, 注意保持二次接线端子排的对地绝缘

地良好状态。

3) 控制地电位的升高

有效地降低保护安装处到变压器中性点之间的接地电阻, 变电站接地网的接地电阻满足  $\frac{2000 V}{I_d}$

的指标, 其中  $I_d$  为接地短路时的故障电流。如此可有效降低系统发生接地时地电流产生的相对电位的升高, 使其小于  $2000 V^{[10]}$ 。

采取措施以后效果良好, 再未出现类似的问题。

### 6 结语

当变压器差动保护动作后处理问题的一般思路是, 检查高压系统是否发生了故障, 检查保护的动作为是否正确。对于保护该动的没有动、不该动的动了都视为不正确动作。值得注意的是, 此类问题的分析有特殊的一面。

1) CT 二次回路两点接地的认识不足

线路上发生接地故障时, 造成了变电站或发电厂的升压站 CT 二次回路的两点接地, 继而地电流分流进入保护装置, 导致保护误动作的问题已经发生过若干起, 只是资料不足, 尚未认识到罢了。

2) 电流回路的薄弱环节出现在 CT 二次根部

CT 二次系统绝缘的薄弱环节的绝缘击穿起因于二次回路的一点接地, 薄弱环节出现在 CT 二次根部至端子箱之间, 多次的故障已经证明了这一点。

3) 屏蔽层采取的接地方式

屏蔽层的两点接地将雷电或接地故障的地电流引入了进来, 如果屏蔽层采取一点接地的方式, 出现的问题肯定不会如此严重。实际上屏蔽层的一点接地其屏蔽效果也很好, 因此屏蔽层应该采用两点接地还是一点接地是值得进一步研究的课题。

### 参考文献

- [1] 王雪, 王增平. 基于广义基波功率的新型变压器主保护方案[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 191-198.  
WANG Xue, WANG Zeng-ping. Novel transformer main protection scheme based on generalized fundamental power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 191-198.
- [2] 王业, 陆于平, 徐以超, 等. 一种用于差动保护的新型重采样方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 239-247.  
WANG Ye, LU Yu-ping, XU Yi-chao, et al. A novel resampling method for differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 239-247.
- [3] 邓祖前. 关于一变压器差动保护动作的分析与处理[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 139-142.

- DENG Zu-qian. Analysis and processing on acting of differential protection of transformer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 139-142.
- [4] 李斌, 罗涛, 薄志谦. 基于故障分量的T接线路电流纵差保护新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 1-12.
- LI Bin, LUO Tao, BO Zhi-qian. A novel differential protection criterion based on super-imposed fault component for T-type transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 1-12.
- [5] 周文, 毛志强, 毛志芳, 等. 一起线路接地故障引起机组主变保护误动事故分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 149-152.
- ZHOU Wen, MAO Zhi-qiang, MAO Zhi-fang, et al. Analysis of the main transformer differential protection maloperation of generator units caused by single-phase ground fault[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 149-152.
- [6] 童悦, 李红斌, 张明明, 等. 一种全数字化高压电流互感器在线校验系统[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8):59-64.
- TONG Yue, LI Hong-bin, ZHANG Ming-ming, et al. An all-digital on-line calibration system for high voltage current transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 59-64.
- [7] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [8] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [9] 苏文博, 李鹏博, 张高峰. 继电保护事故处理技术与3实例[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [10] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护典型故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

收稿日期: 2014-01-22; 修回日期: 2014-04-24

作者简介:

苏 治 (1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护故障分析; E-mail: yjyswb@163.com

韩广瑞 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护故障;

潘向华 (1976-), 男, 研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。