

# 一次特别的系统故障分析

邓卫民, 孙扩业, 周宏宇, 武力刚, 李增仁, 阮德俊, 胡小勇

(鹤岗电业局, 黑龙江 鹤岗 154101)

**摘要:** 多数的系统故障引起保护非正常动作时, 都是由二次系统的干扰引起的, 于是本文从电压互感器二次绕组放电间隙或氧化锌阀片击穿和电压互感器二次直接两点接地、以及电压互感器二次与三次绕组 N 线未分开等二次整定及二次接线错误入手分析, 得出非二次干扰引起保护动作作为变化的结论, 该文的目的除了提醒现场的运行维护单位重视起地网检查的重要性外, 还纠正了继电保护人员分析问题只注重二次回路, 而忽视一次系统对二次保护的影响的惯病。

**关键词:** 系统故障; 波形分析; 干扰电压; 功率方向

**中图分类号:** TM711 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-4897(2005)23-0068-05

## 0 引言

2004年7月23日, 在黑龙江省鹤岗电业局辖区内的一座220 kV变电所——金山变电所, 发生了一次110 kV系统接地故障, 虽然这次故障没有影响保护的正常动作行为, 但110 kV故障录波器故障录波和微机保护记录的波形数据, 极具特殊性, 稍有差迟就会造成故障线路保护拒动及非故障线路误动乃至扩大事故, 由不得我们不拿出来认真分析, 并给出处理意见, 防微杜渐。

当时的系统接线方式如图1, 变电所受110 kV亮金线、110 kV金新线、主变压器110 kV总受电源, 各条线路统一配置相间距离方向保护和零序方向电流保护, 及根据运行方式确定重合闸。

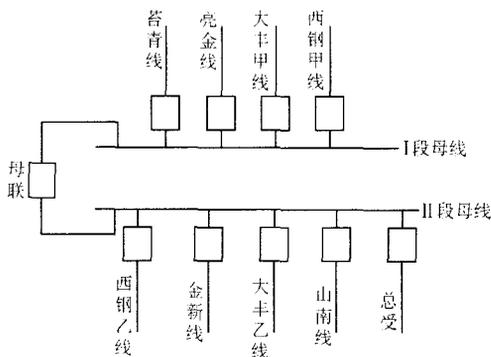


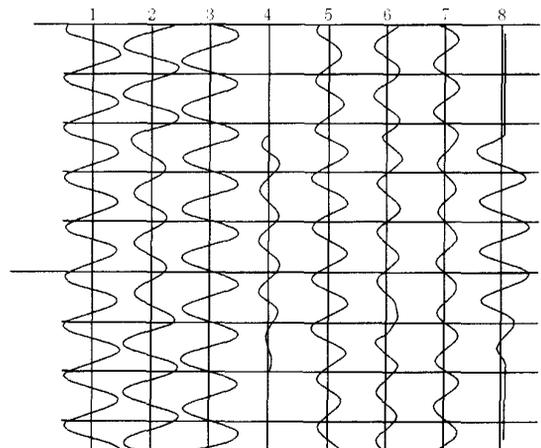
图1 一次系统接线方式

Fig 1 Primary system connection mode

2004年7月23日下午13时31分40秒, II段母线上的线路110 kV山南线发生B相单相接地故障,  $I_0$ 动作切除故障, 而随后打印的故障线路故障录波器录波和微机保护记录的波形数据却让现场的继

电保护人员很疑惑, 这里仅以故障录波数据拿来分析。

图2为I段母线电压和非故障线路110 kV西钢甲线电流波形, 从I段母线电压波形可以看出故障相B相电压明显下降, 正常相A、C相电压几乎没有变化, 外接 $3U_0$ 有电压产生, 所录非故障线路电流波形为特殊冲击性负荷线路波形, 故障时B相电流明显减少, 其他相电流波形有些许变化也属正常, 且有较大 $3I_0$ 产生, 判断为B相单相接地故障也较明显。



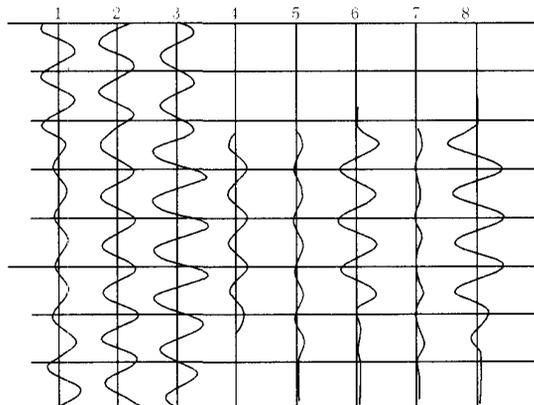
注: 1为I段母线电压 $U_a$ ; 2为I段母线电压 $U_b$ ; 3为I段母线电压 $U_c$ ; 4为I段母线电压 $3U_0$ ; 5为西钢甲线 $I_a$ ; 6为西钢甲线 $I_b$ ; 7为西钢甲线 $I_c$ ; 8为西钢甲线 $3I_0$ 。

图2 I段母线电压和非故障线路电流波形

Fig 2 Waveform of busbar I section voltage and healthy line current

图3为II段母线电压和故障线路110 kV山南线电流波形, 所录故障线路电流波形为纯负荷线路

波形特征,故障相 B 相电流明显增大,正常相 A、C 相电流相对于故障前几乎没有变化,故障线路亦有较大  $3I_0$  产生,至此所看到数据尚为正常,但看故障线路所在 II 段母线电压与 I 段母线电压比较时却发现大相径庭,本是 B 相单相接地故障,可从幅值来看,B 相电压幅值和故障前比较几乎没有变化,却让 A 相电压幅值和故障前比较降低较多,C 相电压幅值和故障前比较反而增大,与 I 段母线电压比较有很大不同,从相位来看,B 相电压相位与 C 相电压相位也变得较接近,这些特征和我们已有的经验结合起来,可以判断出有额外的干扰电压窜进回路,导致 II 段母线电压幅值、相位发生改变,此干扰源可能来自二次回路亦可能来自一次回路,按照已有的经验,多数这种干扰来自二次回路,因此我们的分析判断首先从二次回路开始,而干扰电压引起的正常电压改变不外乎以下三种情况,下面我们逐个来分析。



注:1 为 II 段母线电压  $U_{a2}$ ; 2 为 II 段母线电压  $U_{b2}$ ; 3 为 II 段母线电压  $U_{c2}$ ; 4 为 II 段母线电压  $3U_{02}$ ; 5 为山南线  $I_a$ ; 6 为山南线  $I_b$ ; 7 为山南线  $I_c$ ; 8 为山南线  $3I_0$ 。

图 3 II 段母线电压和故障线路电流波形

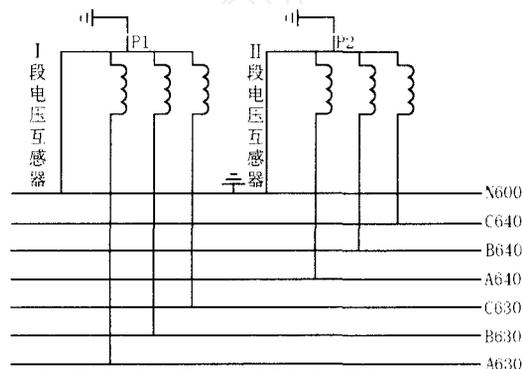
Fig 3 Waveform of busbar II section voltage and fault line current

### 1 二次干扰的情况之一

第一种情况:按照规程要求,已在控制室一点接地的电压互感器二次绕组,如认为必要,可以在开关场将二次线圈中性点经放电间隙或氧化锌阀片接地;

对二次线圈中性点经放电间隙或氧化锌阀片接地的击穿电压要求是峰值应大于  $30I_{max}V$ ,  $I_{max}$  为电网接地故障时通过变电所的可能最大接地电流有效值,单位为 kA,如果击穿电压小于要求值,就可能在系统发生接地故障时,故障电流产生的横向电位差造成放电间隙击穿,在二次电压回路窜入干扰电压。

仪用互感器二次绕组中性点在开关场接地,是为了二次绕组本身的安全。主张采用这种方式的某些国外系统认为,当在数百米外的较远处接地时,不能对二次绕组实现可靠的雷击过电压保护;电压二次回路引入控制室后应各不相连,必要时,则采用隔离变压器。如图 4 所示。



注:两组电压互感器中性线分别引入控制室 N600 小母线一点接地 (P1、P2 为放电间隙)

图 4 两段电压互感器中性点经放电器  $P_1(P_2)$  在开关场接地图

Fig 4 Grounding of two sections of PTs neutral through charging  $P_1(P_2)$  in switchgear

我国有的系统则期望实施只在控制室一点接地的同时,将电压互感器中性点在开关场经放电间隙接地以实现对其二次绕组的保护。如果在开关场经击穿保险将电压互感器二次绕组中性点在开关场实施保护性接地,则击穿保险的启动电压必须同时满足如下两个要求。

- 1) 足以充任二次绕组的绝缘保护,即低于对它规定的相应耐压水平。
- 2) 大于电网发生接地故障时可能出现的开关场两点地电位差的最大值,确保在关键时刻不出现不允许的二次回路两点接地。

对前一项要求,在相应的规程中有明确的规定,保护器件的动作电压水平低于被保护器件允许的相应过电压水平是当然的。对后一项要求,主要要明确开关场可能出现的两点地电位差最大数值。在有关国际大电网会议报告中曾提到:“对于格网式接地系统,当回路完全置于变电所地网范围内时,最大的期望横向电压(由导线及电网引入回路的电压)为每一千安故障电流 10 V。”

按要求,二次绕组的耐压值为 2 kV、1min。考虑可能最大的开关场接地故障电流 50 kA,估计的最大开关场两点间的地电位差值为 500 V,不难取得前述两项要求的一致性,即放电间隙的击穿电压

大约在 500 ~ 2 000 V 之间。国际大电网会议规定：横向电位差值 10 V/1 000 A，其击穿电压峰值应大于  $30I_{\max}V$ ，即  $10 \times 2\sqrt{2} \times I_{\max} = 30I_{\max}V$ 。式中  $2\sqrt{2}$  考虑短路电流可能全偏移的情况，即最大峰值电压应取为计算地网电位升的  $2\sqrt{2}$  倍。放电器  $P_1$  ( $P_2$ ) 两端产生的电位差值，如图 4 所示。当电网发生接地故障，通过变电所接地网的最大接地短路电流为  $I_{\max}$  时，会产生横向电位差值。因为放电器和 N600 的接地点都在变电所的接地网上，故放电器的两端承受横向电位差值，而不是纵向对地电位。在现场我们检查的两段 110 kV 电压互感器端子箱放电间隙没有放电痕迹，而且故障时的接地电流产生的横向电位差值不到 200 V，根本不可能把放电间隙击穿，因此能够断定不是由于放电间隙击穿，导致干扰电压窜入电压互感器二次绕组。

## 2 二次干扰的情况之二

第二种情况：按照规程要求，电压互感器的二次回路只允许有一处接地，接地点宜设在控制室内，并应牢固焊接在接地小母线上。

如果两电压互感器的中性点分别在开关场接地，引入的干扰电压类似于第一种情况，在一次系统发生单相接地时（例如 A 相单相接地故障），两电压互感器的中性点的两个接地点之间，将因地网通过零序电流而产生电位差，到控制室的中性点联线的两端就跨过了这个电压，如图 5 所示。

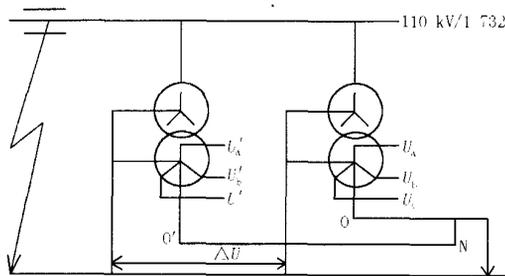


图 5 开关场两组电压互感器二次中性点分别接地示意图

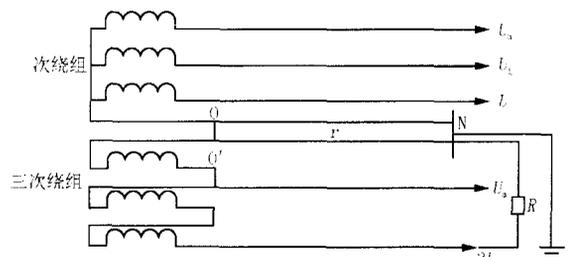
Fig 5 Schematic diagram of secondary neutral grounded of two PTs respectively in switchgear

$U_{0 \cdot 0'} = U_0$ 。母线单相金属接地时，在开关场的二次 A 相线对中性点的电压当然为零，但是在控制室，二次 A 相电压中多了一个电压  $U_{0 \cdot N}$  ( $U_{0 \cdot N} + U_{N \cdot 0'} = U_0$ )。  $U_{0 \cdot N}$  由零序电流产生，其波形当然和单相接地故障电流一样。由另一组电压互感器二次来的控制室相对地电压，比开关场的相电压多了一

个压降  $U_{N \cdot 0}$ 。非故障的两相电压  $U_B$  与  $U_C$ ，同样也加上了这个附加的压降，同样也引起了畸变，一相幅值增大而另一相幅值减小。对侧变电所地网通过的单相短路电流较小，引起的电压畸变成比例减小。两组电压互感器零相回路的附加电压  $U_{0 \cdot N}$  及  $U_{N \cdot 0}$ ，不但幅值不一样（与 ON、NO 的长度有关，是分压关系），而且方向相反。因而，由于电压互感器二次回路中性点多点在开关场接地对方向元件所产生的副作用，可以是引起误动作，也可能是引起拒绝动作。但是经过我们专业人员的现场检查，全变电所的所有电压互感器的二次绕组以及三次绕组再没有发现第二个接地点，根本就不存在上述缺陷，为证明检查结果的正确性，结合变电所新增间隔时，全所停电，我们断开了主控室电压互感器唯一接地点 N600，然后用 500 V 摇表进行绝缘测试，绝缘完全合格，根本不存在第二个接地点的问题，也就不存在电压互感器二次回路多点接地窜入干扰电压的问题。

## 3 二次干扰的情况之三

第三种情况：电压互感器二次回路和三次回路由开关场到控制室的接线的一种常见方式如图 6 所示。



注：r 为 ON 间导线电阻

图 6 常见的电压互感器二次回路和三次回路接线图

Fig 6 Common secondary circuit and third circuit of PT

其特点是共用了由开关场到控制室的接地相电缆芯，用一根六芯电缆就解决了问题。就是在开关场接线盒处将 O 与 O' 联通，节省了连线 O N。长期以来，在运行中还很少反映过它的缺陷。直到微机继电保护普遍采用，问题也逐渐暴露。微机继电保护采用自产  $3U_0$  实现接地方向保护，由图 6 可见，通入微机保护自产  $3U_0$  回路的三倍零序电压  $3U_{0j}$  将是

$$3U_{0j} = U_A + U_B + U_C + 3U_{ON} = 3U_0 + 3U_{ON}$$

若  $3U_0$  回路负载电阻为 R，电缆芯线 ON 的电阻为 r，按正确极性接线，则因三次回路电压变比为二次回路变比的  $\sqrt{3}$  倍得： $U_{ON} = -\frac{r}{R+r} \times 3\sqrt{3}U_0$  得：

$3U_{0j} = (1 - \frac{3\sqrt{3}r}{R+r}) 3U_0$ , 如果因为某种原因, 引起

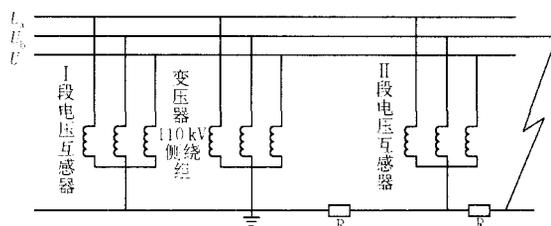
$\frac{r}{R+r} > \frac{1}{3\sqrt{3}}$  时, 包括实际发生过的控制室  $3U_0$  端子

短路,  $3U_{0j}$  将与  $3U_0$  反方向, 于是接地零序保护正方向拒动而反方向误动。解决的办法: 断开 OO, 增加 ON 联线。取消  $3U_0$  回路。前已论述过, 这种做法未必不可取。即使如此, 同样也不能允许有 OO 联线。此种影响主要是由于 O 引入为三次绕组的非极性端, 否则不会造成  $3U_{0j}$  反方向, 这是继电保护运行人员在现场应该注意的。针对这次故障显现的特殊特征, 我们专业人员再次检查现场落实反措的情况, 即电压互感器的二次绕组的  $U_N$  与三次绕组  $U_{LN}$  分开的反措要求, 绝对正确, 不由得我们不放弃这一疑虑。

#### 4 二次干扰的小结及一次干扰的引出

由以上分析可见, 二次回路引起的干扰电压都是在公共回路即中性点联线回路, 确实存在非故障相电压幅值一相幅值增大而另一相幅值减小的情况, 但是电压互感器公共回路引起电压变化的结果应该是两段二次电压均不正常, 可实际录波结果不是这样, I 段母线电压相对于 II 段母线电压来说是正常的, 而且二次接线也没有发现上述三种错误接线, 因此我们把注意力按照最初的分析顺理成章地转移到一次干扰电压, 怎样的情况下才会出现线路 110 kV 山南线发生 B 相单相接地故障, 而 II 段母线电压 B 相电压幅值几乎没有变化, 却让 A 相幅值降低较多, C 相幅值反而增大, 与并联运行的 I 段母线电压幅值比较有如此大的差异呢? 我们的分析首先从相位入手, 故障后的波形中 II 段母线电压 B 相电压相位与 C 相电压相位比较接近, 且偏移方向与零序电流方向靠近, 可见电压波形的改变与零序电流有关, 而零序电流只有在接地电阻上产生的电压才能和零序电流同相, 于是自然而然地零序电流和接地电阻进入我们的主要分析目标, 我们推断, 如果假设变压器线路等设备的地网电阻为一个统一地电位, 且 I 段母线电压互感器位于这个等电位面上, 而 II 段母线电压互感器不在这个等电位面上, 与变电所的地网电阻之间有一假设固定电阻值, 假设以变压器 110 kV 侧中性点为地网表示点, 则 110 kV 侧两段电压互感器一次接地点与地网之间的接地关系示意图如图 7 所示。

当线路 110 kV 山南线发生 B 相单相接地故障

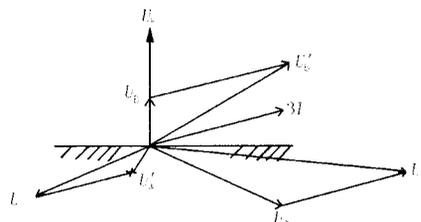


注: R 为假设固定电阻

图 7 两段电压互感器一次接地点与地网之间的接地关系示意图

Fig 7 Relation of primary grounded point and local network of two sections of PT

时, 零序电流在此假设固定电阻上产生压降, 叠加到 II 段母线电压互感器正常感受的电压上, 合成后电压相量图将如图 8 所示。



注:  $U_a, U_b, U_c$  为正常三相电压;  $U_b$  为正常时 B 相接地时相电压;  $U'_a, U'_b, U'_c$  为正常 B 相接地三相电压与固定电阻压降合成电压。

图 8 II 段母线电压互感器经固定电阻后合成后电压及零序功率相量图

Fig 8 Voltage and zero-sequence power phasor of II-section bus PT synthesized through fixed resistance

从相量图可以看出, 此固定电阻愈大, 流过的零序电流愈大 (与过渡电阻、故障点远近有关), 对正常感受电压的影响愈大, 合成后电压变化亦愈大, 也就是录波图中看到的 II 段母线电压 A 相幅值降低, C 相幅值反而增大, 且 B 相电压相位与 C 相电压相位也逐渐接近, 而位于这个等电位面上的 I 段母线电压互感器却不受影响, 这就与我们前面的判断的假设前提和实际故障录波结果相吻合, 也就接近了我们所期待的结论, 而且从假设推出的图中还可以看出零序功率的变化, 也就是  $3I_0$  与  $3U_0$  之间夹角及幅值的变化, 正常  $3I_0$  超前  $3U_0$  ( $U_a, U_b, U_c$  合成) 的灵敏角在  $110^\circ$  左右,  $3U_0$  在动作边界线下面时 (阴影下方为动作区), 零序功率继电器判为正方向动作,  $3U_0$  在动作边界线上面时, 零序功率继电器判为反方向不动作, 而实际是故障线路正方向故障, 只因假设固定电阻的影响, 造成故障线路正方向故障零序功率方向元件可能不动作, 非故障线路反方向故障零序功率方向元件可能误动作的恶果, 就是我

们前面分析所担心的,为此,我们决定根据分析寻出根源,根据以上分析,现场组织试验专业人员特别对变电所地网电阻进行测量,试验的结果很让我们兴奋,试验中发现变电所地网电阻果然不合格而且是严重不合格,特别地点接地电阻已达到 7 左右,正是这次录波电压畸变的症结所在,正是我们这次分析判断的结论所在。

## 5 结论及要求

造成地网电阻严重不合格的主要原因是新建变电所时,由于地质原因地网电阻安装不合格,施工人员使用了大量的降阻剂,随着时间的积累和降阻剂的腐蚀,地网电阻之间的联络钢筋开始锈蚀断裂,导致地网各点之间电阻不一致,然后就出现了上述特殊故障分析过程,所以在这里特别提醒各运行单位局厂注意地网电阻的检查,避免保护误动、拒动事故的发生。

### 参考文献:

[1] 王梅义. 电网继电保护应用 [M]. 北京:中国电力出版

社, 2001.

WANG Mei-yi Application of Protective Relaying in Power Sysrtem [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.

[2] 邹森元. 《电力系统继电保护及安全自动装置反事故措施要点》条例分析 [M]. 北京:中国电力出版社, 2005.

ZOU Sen-yuan Regulations Analysis of Power System Relay Protection and Anti-incident Measures for Its Auto-devices [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

收稿日期: 2005-04-18; 修回日期: 2005-06-08

### 作者简介:

邓卫民 (1975 - ),男,助理工程师,从事继电保护运行维护工作; E-mail: ddd9202@163.com

孙扩业 (1973 - ),男,工程师,从事变电运行管理工作;

周宏宇 (1974 - ),男,硕士,高级工程师,从事继电保护运行管理工作。

## Analysis of an unusual system fault

DENG Wei-min, SUN Kuo-ye, ZHOU Hong-yu, WU Li-gang, LI Zeng-ren, RUAN De-jun, HU Xiao-yong  
(Hegang Electric Power Bureau, Hegang 154101, China)

**Abstract:** Since most of maloperation of protection equipment in the power system are caused by the disturbance of the secondary circuit system, the paper analyses the wrong setting and wiring of the secondary circuit including arc discharge gap or zinc oxide valve of the VT secondary winding, direct two-point earthing of the PT secondary winding and the disconnection failure of N lines of secondary and third winding of PT. A conclusion is reached that the disturbance of secondary circuit does not cause the operation change of protection equipments. To remind the site operation and maintenance organization of attaching importance to inspection of the earthing system, it also points out that relay protection engineers only pay attention to secondary circuit but ignore the effect of the primary circuit on protection equipments.

**Key words:** system fault; wave analysis; disturbance voltage; power direction

(上接第 67 页 continued from page 67)

**Abstract:** Combining Petri Nets principle with object-oriented technology, define a kind of object-oriented Petri Nets which used to describe the reusable power system software architecture. The OOPN keeps the main characters of object-orientation, such as naturalness and encapsulation, and also acquires the Petri Nets characters such as rigid mathematics describing and intuitionistic graphics express. With the relation between place and transition, transition firing and stream of color token, OOPN can clearly and availably depict the attributes and operations of object, information intercommunication between objects and containing relations of different layers' objects in the reusable power system software architecture. OOPN can reflect objects' static relation in the architecture, but also can precisely and easily depict the asynchronous and concurrent dynamic behaviors among objects.

**Key words:** object-oriented Petri Nets; software architecture; electric power system