

# 纵联零序方向元件的特殊问题分析及解决方案

赖庆辉<sup>1</sup>, 陈福锋<sup>2</sup>, 许庆强<sup>3</sup>, 徐刚<sup>4</sup>, 钱国明<sup>2</sup>, 兰金波<sup>2</sup>, 魏曜<sup>2</sup>

(1. 德化县供电有限责任公司, 福建 德化 362500;

2. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210003;

3. 江苏省电力试验研究院有限公司, 江苏 南京 210036;

4. 宜兴市供电公司, 江苏 宜兴 214200)

**摘要:** 讨论了纵联零序方向保护因为零序电压灵敏度不足而失效的各种情况, 探讨了采用零序电压补偿措施的必要性。指出同杆并架的双回线若其中一回线因单相故障跳开, 由于负荷转移相邻线会出现较大的零序电流, 而两侧母线可能均无零序电压, 此时投入零序方向电压补偿将造成无故障线路两侧纵联零序保护误跳闸。详细分析了双回线其中一回线单相跳开后影响两侧母线零序电压的因素, 并以现场录波数据和仿真数据验证了理论分析的正确性。最后给出了能有效解决相关问题的纵联零序方向保护配置方案。

**关键词:** 纵联保护; 零序方向; 电压补偿; 双回线

**中图分类号:** TM 773

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2010)12-0088-04

## 0 引言

纵联零序保护是 220 kV 及以上电压等级输电线路保护对于各类接地故障的主要保护, 尤其是对于单相高阻接地故障具有不可或缺的作用。随着电网容量的不断增大, 大电源和长线路的结构不断增加, 当线路末端发生金属性不对称接地故障时, 保护所测得的零序电压很低, 受电压互感器(TV)精度影响零序方向元件可能无法正确判别故障方向<sup>[1-6]</sup>。另外, 在高阻接地故障的情况下, 零序电压也可能很小(这与系统条件、故障点及接地电阻有关), 也会引起零序方向元件无法正确动作。为解决上述由于故障后零序电压太低而导致零序方向元件无法正常工作的问题, 现行的零序方向保护广泛采用零序电压补偿方法<sup>[5-8]</sup>。正方向故障时, 经过补偿的零序电压幅值大于保护安装处测量的零序电压幅值, 方向更明确; 反方向故障时, 经过补偿的零序电压幅值小于测量的零序电压幅值, 保证零序正方向元件不会误动。

## 1 零序方向电压补偿的介绍

当保护测量到的零序电压低于门槛值(通常设为 0.5~1 V)时, 采用经过补偿的零序电压判别故障点方向, 零序正方向动作判据为

$$175^\circ < \arg\left(\frac{3U_0 - 3I_0 Z_{COM}}{3I_0}\right) < 325^\circ \quad (1)$$

其中,  $I_0$  和  $U_0$  分别为保护测量到的零序电流和零序电压,  $Z_{COM}$  是补偿阻抗。

## 2 零序方向补偿存在的问题

某同杆双回输电线路(如图 1 所示)中 II 线发生 B 相接地故障, 70 ms 后 II 线两侧保护跳闸切除故障, 150 ms 后 I 线两侧纵联零序保护误动作跳开该线 B 相。

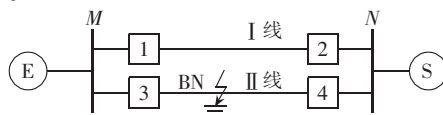


图 1 故障时刻系统运行示意图

Fig.1 Sketch map of faulty system

### 2.1 故障动作情况简述

经分析, I 线纵联零序保护误动的主要原因在于 II 线 B 相切除后其潮流完全转移到 I 线的 B 相上, I 线三相不平衡, 产生一个较大的零序电流(大于纵联零序电流定值), 而两侧母线零序电压均很低, 两侧同时进行零序电压的补偿, 均判正方向故障。

### 2.2 电压补偿导致误动的原因分析

零序电压补偿的原理是基于发生接地故障时零序故障分量网络中零序电压和零序电流之间的关系, 在单纯接地故障情况下, 可以证明无论是正向或者反向故障情况下经过补偿的零序方向元件均不会出现误判方向的情况。

故障中 II 线 B 相切除后, I 线流过的零序电流实际仅在双回线间形成环流, 基本不流出双回线, 流入两侧系统中性点的零序电流和保护测量的零序电流相比小得多, 因此保护能感受到很大的零序电流而无零序电压。M 侧保护测量的零序电流和零序电压分别为  $I_{M0}$  和  $U_{M0}$ ,  $|3U_{M0}| \ll |3I_{M0}Z_{COM}|$ , 由式(1)可知, 此时经补偿的方向元件必然判为正方向。总而

言之,误动的主要原因在于零序方向电压补偿的原理不适用于不对称运行的线路。

### 3 双回线单线单相跳开后母线零序电压情况分析

根据上面的分析可知,在双回输电线路其中一回线单相跳开后两侧母线的零序电压可能很低;同时,若线路重载则健全线感受的零序电流可能达到纵联零序电流定值,该情况下若投入零序电压补偿很可能两侧同时判为正方向而导致纵联零序保护误动。因此有必要分析双回线单线跳开单相后两侧母线零序电压的情况。

如图 2 所示双回输电系统, $M$  侧系统正序阻抗为  $Z_M$ ,零序阻抗为  $Z_{M0}$ ;  $N$  侧系统正序阻抗  $Z_N$ ,零序阻抗为  $Z_{N0}$ ;线路全长(单回)正序阻抗为  $Z_L$ ,零序阻抗为  $Z_{L0}$ 。

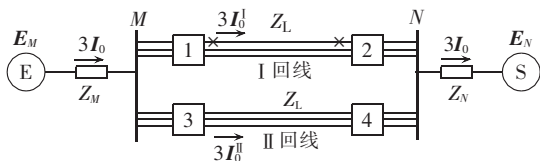


图 2 双回输电线路

Fig.2 Double-circuit transmission line

以下的推导均基于如下假设:假设 I 回线 A 相切除造成非全相运行后短时间内两侧系统功角不变;认为两侧电源的幅值相等;不考虑双回线间的零序互感。非全相运行后从  $M$  侧系统流出的 A、B、C 三相电流分别为

$$\begin{cases} I_A = \frac{E_{MA} - E_{NA}}{Z_M + Z_N + Z_L} \\ I_B = \frac{E_{MB} - E_{NB}}{Z_M + Z_N + 0.5 Z_L} \\ I_C = \frac{E_{MC} - E_{NC}}{Z_M + Z_N + 0.5 Z_L} \end{cases} \quad (2)$$

令  $Z_\Sigma = Z_M + Z_N + 0.5 Z_L$  可得:

$$\begin{cases} I_A = \frac{E_{MA} - E_{NA}}{Z_\Sigma + 0.5 Z_L} \\ I_B = \frac{E_{MB} - E_{NB}}{Z_\Sigma} \\ I_C = \frac{E_{MC} - E_{NC}}{Z_\Sigma} \end{cases} \quad (3)$$

因此, $M$  侧系统流过的零序电流为

$$3I_0 = I_A + I_B + I_C = \frac{E_{MA} - E_{NA}}{Z_\Sigma + 0.5 Z_L} + \frac{E_{MB} - E_{NB}}{Z_\Sigma} + \frac{E_{MC} - E_{NC}}{Z_\Sigma} = \frac{-0.5 Z_L (E_{MA} - E_{NA})}{(Z_\Sigma + 0.5 Z_L) Z_\Sigma} \quad (4)$$

$M$  侧母线零序电压为

$$3U_0 = -3I_0 Z_{M0} = \frac{0.5 Z_L (E_{MA} - E_{NA})}{(Z_\Sigma + 0.5 Z_L) Z_\Sigma} Z_{M0} = \frac{I_{A[0]} Z_{M0}}{1 + 2 Z_\Sigma / Z_L} \quad (5)$$

根据实际运行参数以式(5)估算事故发生时  $M$

侧母线零序电压为 0.23 V,实际测量的零序电压是 0.22 V;估算的  $N$  侧母线零序电压为 0.78 V,保护实际测量的零序电压为 0.7 V。可以看出以式(5)估算的母线零序电压和实际测量值是一致的,即验证了上述分析的正确性。

总体而言,在双回线其中一回非全相运行期间,母线零序电压主要受以下几个因素影响:

a. 系统和线路的阻抗比,两侧系统加线路的总阻抗相对于线路阻抗之比越大,双回线其中一回非全相运行后母线的零序电压越低,阻抗比越小,零序电压越高;

b. 负荷状态,线路负载越重,一回线非全相运行后两侧母线的零序电压越高,反之两侧母线零序电压越低;

c. 变电站等值的零序阻抗,零序阻抗越大,线路非全相运行期间对应的母线零序电压越高。

### 4 零序方向元件电压补偿的必要性分析

如前所述在长线路远端金属性故障,保护侧为大系统时母线零序电压会很低,此时纵联零序方向元件可能无法正确判别故障方向;另外,区内高阻接地故障时,零序电压也可能很低,其相位的测量精度受到很大影响。下面着重分析这 2 种情况下零序方向元件使用补偿电压的必要性。

#### 4.1 金属性故障

如图 3 所示,假设在线路  $MN$  末端发生接地故障,并认为系统和线路的零序阻抗角相同, $M$  侧母线零序电压满足:

$$U_{M0} = U_{F0} \frac{Z_{M0}}{Z_{M0} + Z_{L0}} = U_{F0} \frac{1}{1 + Z_{L0}/Z_{M0}} = U_{F0} \frac{1}{1+k} \quad (6)$$

其中, $U_{F0}$  为故障点零序电压, $k = Z_{L0}/Z_{M0}$ 。若为金属性故障,则有  $U_{F0} = U_{F\varphi[0]}$ ,其中  $U_{F\varphi[0]}$  为故障点故障相在故障之前的正常电压,其幅值可认为是额定电压(57.7 V)。

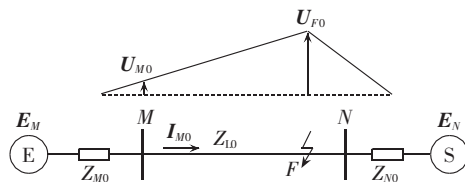


图 3 零序电压分布示意图

Fig.3 Distribution of zero-sequence voltage

$M$  侧母线零序电压灵敏度不足(零序方向元件电压门槛设为 0.5 V)时,由式(6)可得:

$$|U_{M0}| = |U_{F0}| \frac{1}{1+k} = \frac{57.7}{1+k} < 0.5(V) \quad (7)$$

由式(7)得  $k > 114.4$ ,即线路的零序阻抗大于 114 倍的  $M$  侧系统零序阻抗才可能出现电压灵敏度不足的问题,此情况不易出现。另外,即使区内金属性故障时出现零序方向电压灵敏度不足,也只是纵

联零序不能动作,而纵联距离仍然可以动作。因此线路区内金属性故障时零序电压补偿并不必要。

#### 4.2 高阻接地故障

区内高阻接地故障时保护安装处零序电压为

$$U_{M0} = -\frac{C_0 Z_{M0}}{3R_g + Z_{\Sigma 0} + 2Z_{\Sigma 1}} U_{F\varphi[0]} \quad (8)$$

其中,  $C_0$  为零序分配系数,  $Z_{\Sigma 0}$  和  $Z_{\Sigma 1}$  分别为故障点感受到的等效零序和正序阻抗,  $R_g$  为接地电阻,  $U_{F\varphi[0]}$  同式(6)解释。

可见,当  $R_g$  很大时  $M$  侧母线零序电压将很低,尤其是  $M$  侧为大系统时很可能出现零序方向灵敏度不足的问题。换言之,区内高阻接地的情况下纵联零序方向保护可能无法动作,仅从这一点而言零序方向电压补偿对于高阻接地故障是有必要的。

#### 4.3 实际系统分析

以某省区为例,220 kV 线路纵联零序保护电流门槛均按一次侧 480 A 整定,电流互感器按 1 250:1 考虑,折算到二次侧为 0.384 A。根据该省区电网参数,分析单相高阻接地、二次零序电流大于 0.384 A 时,零序电压的大小情况。

该省区现有运行方式,所有 500/220/35 kV 变压器中,高、中压侧零序电抗最小为 0.012 15 p.u.;所有 220/110/35 kV 和 220/110/10 kV 变压器中,高、中压侧零序电抗最小为 0.034 8 p.u.。对于背后是 500 kV 系统,在 220 kV 线路发生单相高阻接地,零序电流  $3I_0$  为 0.384 A 时,计算二次侧零序电压  $3U_0$  为 3.06 V。对于背后是 220 kV 系统,在 220 kV 线路发生单相高阻接地,零序电流  $3I_0$  为 0.348 A 时,计算二次侧零序电压  $3U_0$  为 3.84 V。

从上述计算结果可以看出,发生单相高阻接地时若零序电流能达到保护定值,零序电压便有足够的灵敏度。所以,对于该省区电网,即使在零序电压很小(例如 0.5 V)时退出纵联零序方向也不会影响保护的耐过渡电阻能力。

### 5 零序方向综合处理措施

由上面的分析可知纵联零序方向元件并不是在任何系统中都有必要进行电压补偿,需要根据具体的系统确定。对于零序方向元件有必要进行补偿的情况,双回线保护需要进行针对性的处理,防止出现类似于前面所述的问题而影响电网的安全可靠运行。具体的措施可以考虑如下几点。

#### 5.1 配合负序方向

为防止在强磁弱电环境中纵联零序方向保护受零序互感的影响而误动,负序方向已经广泛地被采用。然而由于历史习惯负序往往只是作为辅助手段应用。为保证区内高阻故障时保护的可靠性和灵敏度,一般只用负序反方向元件闭锁零序正方向发信。在双回线单线单相跳开后,两侧母线可能也没有负

序电压,因此负序反方向不能动作,经过补偿的零序方向元件仍然要误发信。建议经过补偿的零序正方向元件和负序正方向元件采用与门发信,可以保证有足够的安性。

#### 5.2 自动识别邻线非全相

通过二次干扰的识别判定有区外故障切除后闭锁纵联零序方向保护。在突变量启动后一段时间内本线全线速动保护不动作,基本可以认定为区外故障。若检测到有二次突变量,且被保护线路有零序电流分量,则直接闭锁纵联零序方向保护,直到系统恢复对称运行。

#### 5.3 智能变电站

智能变电站中通过先进的网络通信手段解决了变电站内数据共享的问题,同一站内各条出线的主保护动作信息均可以通过站内数据网共享。当双回线间任一条线路单相跳闸的同时,该线保护装置将跳令发送至数据网络,相邻线路可以通过网络接收到该跳令,收到单相跳令后健全线保护闭锁纵联零序方向,直到故障线路重合成功或者三相跳开再重新投入。

### 6 结论

在一些情况下发生接地故障保护安装处的零序电压可能很低,以至于零序方向元件不能正确判别故障方向导致纵联零序保护拒动,为解决此问题,零序方向电压补偿原理被广泛采用。但零序方向补偿若没有针对性的处理措施,在双回线发生单相故障跳开后健全线可能因为补偿导致纵联零序保护误动。文中分析指出,有些系统发生高阻故障后若零序电流能达到保护定值便可以保证零序方向元件电压的灵敏度,对于此类系统就没有必要再进行零序电压补偿。对于确实有必要进行零序方向元件电压补偿的系统文章也提出了可以防止误动的纵联零序方向使用方案。

#### 参考文献:

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京:中国电力出版社, 1995:235-250.
- [2] 许正亚. 输电线路新型距离保护[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2002:15-26.
- [3] 陈福锋, 魏耀, 王帆. 不受电压互感器二次回路两点接地影响的零序方向元件[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 70-74.  
CHEN Fufeng, WEI Yao, WANG Fan. Zero sequence direction element adapted to two-point-ground fault on secondary circuit of potential transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 70-74.
- [4] 索南加乐, 孟祥来, 陈勇, 等. 基于故障类型的零序方向元件[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 25-30.  
SUONAN Jiale, MENG Xianglai, CHEN Yong, et al. A novel zero sequence directional element based on fault type[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 25-30.
- [5] 徐振宇, 杜兆强, 孟岩, 等. 零、负序方向元件的特殊问题研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 21-25.  
XU Zhenyu, DU Zhaoqiang, MENG Yan, et al. Special problems



- in zero/negative sequence directional element[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(5): 21-25.
- [6] 丁小兵,赵曼勇,徐振宇. 接地故障零序方向元件拒动保护改进方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 25-27.
- DING Xiaobing, ZHAO Manyong, XU Zhenyu. Improvement on zero sequence current protection when directional element fails [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 25-27.
- [7] 张驰,李一泉,曾耿晖. 基于负序分量补偿的纵联零序方向保护判据与仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(21): 18-23.
- ZHANG Chi, LI Yiquan, ZENG Genghui. Principle investigation and simulation on pilot zero sequence directional protection with compensation of negative sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(21): 18-23.
- [8] 王辉,何奔腾,李一泉. CVT对零序(负序)方向保护影响的研究[J]. 继电器, 2006, 34(9): 1-4.
- WANG Hui, HE Benteng, LI Yiquan. Research of CVT's influence zero-sequence(negative-sequence) direction protection[J]. Relay, 2006, 34(9): 1-4.
- [9] 张学深,杨智德,金全仁. 故障分量负序方向元件若干问题的研究[J]. 继电器, 2000, 28(7): 59-61.
- ZHANG Xueshen, YANG Zhide, JIN Quanren. Study on negative sequence directional protection against fault component[J]. Relay, 2000, 30(1): 64-65.
- [10] 索南加乐,谢雯洁,沈黎明,等. 解决电压互感器二次侧故障对距离保护影响的新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(23): 56-61.

SUONAN Jiale, XIE Wenjie, SHEN Liming, et al. New method for solving potential transformer secondary side fault's effect on distance protection based on parameter identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(23): 56-61.

(编辑: 李 玲)

#### 作者简介:

赖庆辉(1977-),男,福建德化人,工程师,长期从事继电保护管理工作;

陈福锋(1979-),男,江苏宜兴人,工程师,硕士,主要从事高压线路保护的研究和开发工作(E-mail: fugiant@163.com);

许庆强(1976-),男,江苏常州人,高级工程师,博士,主要从事电力系统继电保护和系统仿真的研究工作;

徐 刚(1979-),男,江苏宜兴人,工程师,主要从事电力系统继电保护及自动化装置的运行维护与管理工作;

钱国明(1973-),男,江苏南通人,高级工程师,硕士,主要从事高压线路保护的研究和开发工作;

兰金波(1977-),男,江西吉安人,工程师,硕士,主要从事高压线路保护的研究和开发工作;

魏 曜(1979-),男,青海西宁人,工程师,主要从事高压线路保护的研究和开发工作。

## Analysis of pilot zero-sequence directional protection special problems and solutions

LAI Qinghui<sup>1</sup>, CHEN Fufeng<sup>2</sup>, XU Qingqiang<sup>3</sup>, XU Gang<sup>4</sup>, QIAN Guoming<sup>2</sup>, LAN Jinbo<sup>2</sup>, WEI Yao<sup>2</sup>

(1. Dehua County Power Supply Co., Ltd., Dehua 362500, China;

2. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210003, China;

3. Jiangsu Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210036, China;

4. Yixing Power Supply Company, Yixing 214200, China)

**Abstract:** Different conditions causing the sensitivity deficiency of pilot zero-sequence directional protection are analyzed and the necessity of adopting zero-sequence voltage compensation is discussed. It points out that, if one of the double-circuit lines is tripped for single-phase grounding fault, the load shifted to other line may produce large zero-sequence current while its buses at both sides may not present zero-sequence voltage, the application of zero-sequence voltage compensation will cause the maloperation of its pilot zero-sequence directional protections. The factors affecting the zero-sequence voltage of bus are analyzed in detail and proved by site recorded fault data and simulative data. Solutions are proposed to the configuration scheme of pilot zero-sequence directional protection.

**Key words:** pilot protection; zero-sequence directional; voltage compensation; double-circuit line