

# 正序故障分量方向元件误动的原因分析及其对策

许庆强<sup>1</sup>, 索南加乐<sup>1</sup>, 李瑞生<sup>2</sup>, 樊占峰<sup>2</sup>, 张克元<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2 许继电气保护及自动化事业部, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 文中简单介绍了正序故障分量方向元件的判别原理, 给出了该方向元件在保护装置中比较详细的判向流程, 深入分析了现场某次故障中该方向元件将正向故障误判为反向的原因, 并给出了解决方案。新方案的物理意义明确, 实现方法简单, 对正反方向元件都有较高的灵敏度, 提高了反方向元件的动作可靠性, 能可靠防止上述故障事例中的误判向现象。新方案中的判据同样适用于负序、零序功率方向元件, 且其已通过一系列有针对性的动模试验的验证, 用于保护现场。

**关键词:** 电力系统; 继电保护; 输电线路; 方向元件

**中图分类号:** TM77      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2005)09-0012-05

## 0 前言

方向元件在现代继电保护装置中占有重要的地位, 从简单方向性过电流保护到复杂的超高压线路的快速主保护, 它都得到了广泛的应用<sup>[1~4]</sup>。

传统的方向元件通常按 90° 接线法使用, 但其三相短路时有电压死区, 且其特性受故障点过渡电阻的影响; 在纵联方向保护和方向性零序保护中使用的负序和零序功率方向元件实质上是反应故障分量的, 与传统的方向元件相比具有明显的优点。但是系统在发生三相不对称短路时才出现负序分量, 在接地短路时才出现零序分量, 也就是说, 它们都不能反应三相对称短路<sup>[1,5,6]</sup>; 正序故障分量方向元件则不受故障类型的影响, 也不受系统负荷和故障点过渡电阻的影响, 动作灵敏度高, 因此, 目前广泛采用正序故障分量 (或正序故障分量与负序分量组合后的复量) 方向比较原理构成线路的主保护<sup>[7~9]</sup>。

目前, 正序故障分量方向元件存在的隐患是, 对正方向故障, 如果保护背后是大电源, 会影响该方向元件的判向可靠性, 可能引起正序故障分量方向元件误判向而导致方向高频保护拒动作。

本文给出了湖南湛茶线 2004 年的某次故障事例, 事例中茶园侧保护正序故障分量方向元件将正向故障误判为反方向, 从而引起两侧方向高频保护拒动, 文中详细分析了该方向元件误判向的原因, 并给出了正序故障分量方向元件的新判别方案。新方案的物理意义明确, 与原判据相比更加容易实现。只要被保护线路不是很短, 该方案能有效解决大电

源侧正序故障分量方向元件的误判向问题。

## 1 保护现状

众所周知, 对电力系统故障的分析, 可应用对称分量理论和叠加原理。将系统中三相电气量分解为正序、负序、零序三个旋转的对称分量, 并将故障时正序分量分解为正常分量和故障分量的叠加。

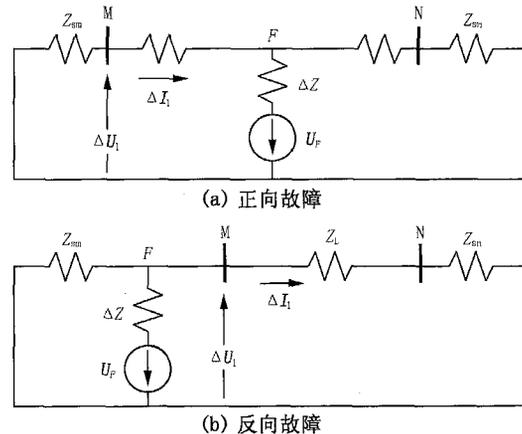


图 1 正序故障分量等效网络

Fig 1 Equivalent network of positive-sequence fault components

图 1 中示出一个简单两端电源系统发生故障时的正序故障分量等效网络, 如果考虑 M 侧的保护, 则图 1(a)和图 1(b)分别是正向故障和反向故障的等效网络。图中  $U_F$  为正常运行条件下 F 点的电压,  $Z$  为故障附加阻抗, 其随短路类型和故障点位置而改变。

根据图 1 可以得出下面结论:  
正方向故障时

基金项目: 教育部博士学科点基金项目 (20010698015)

$$U_1 / I_1 = -Z_{sm} \quad (1)$$

反方向故障时

$$U_1 / I_1 = Z_L + Z_{sm} \quad (2)$$

根据式(1)和(2),考虑到数字式滤波器本身的暂态和CT、PT暂态产生的误差,并且考虑到220~500kV系统阻抗角和线路阻抗角并非90°,同时为了使方向元件有足够的灵敏度,选用下述动作判据<sup>[4]</sup>:

正方向方向元件的动作判据为

$$-(170^\circ + \alpha) < \arg(U_1 / I_1) < -(10^\circ + \alpha) \quad (3)$$

反方向方向元件的动作判据为

$$-(10^\circ + \alpha) < \arg(U_1 / I_1) < 190^\circ - \alpha \quad (4)$$

判据中可根据实际情况来决定,通常的取值范围为 $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ ;

上面的判据在一般情况都能准确工作,但在如下几种特殊情况需要考虑到其适用性。第一,如果保护背后是大电源,正方向故障时 $U_1$ 比较小,用于判别 $U_1 / I_1$ 的相位时,会有很大的误差,影响到该方向元件的准确工作<sup>[10,11]</sup>;第二,保护背后是大电源,长线路末端发生故障,此时 $U_1$ 比上面第一种情况还要小,可能完全失去相位比较的能力;第三,保护背后是小电源或者弱电源,长线路末端发生故障,此时,可能因为 $I_1$ 过小而不能作为判向的依据。上述第一种情况可以通过对 $U_1$ 进行补偿的方法解决问题<sup>[4,5]</sup>,参见下面公式(5);而对于后两种情况,文中的方向元件不能正常工作,必须采用其它原理的方向元件。

针对上面的情况,目前保护装置中,对正序故障分量方向元件采取了相应的措施:

首先, $U_1$ 和 $I_1$ 必须大于各自的起动门槛,即满足 $U_1 > U_{MK1}$ 和 $I_1 > I_{MK}$ ,才能让该方向元件投入。

其次,在 $U_1$ 大于另一较大的动作门槛(假设为 $U_{MK2}$ )时,认为该方向元件有较高的判向精度,可直接用 $U_1 / I_1$ 的相位来判向;否则,要将 $U_1$ 补偿为 $U_1'$ , $U_1'$ 的表达式为

$$U_1' = U_1 - I_1 Z_{com} \quad (5)$$

其中: $Z_{com} = 0.5Z_L$ 。补偿后方向元件的测量角度由 $\arg(U_1 / I_1)$ 变为 $\arg(U_1' / I_1)$ 。

上面的各门槛, $U_{MK1}$ 一般取 $1 \sim 1.5V$ , $U_{MK2}$ 取 $2.5 \sim 3V$ , $I_{MK}$ 取 $0.1 \sim 0.15I_n$ ,其中, $I_n$ 为电流互感器二次侧的额定电流。

在现场保护装置中,为了确保在某些复杂的情

况下方向高频保护不误动,要求正、反方向元件在动作时间和灵敏度上都有配合,也就是反方向方向元件灵敏度比正方向方向元件灵敏度高,且当反方向短路时,反方向的方向元件先动作,故采取反方向元件闭锁正方向元件的方法。

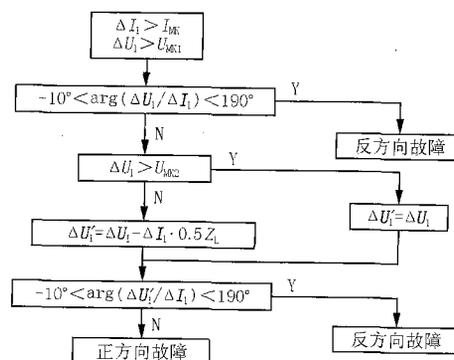


图2 判向流程图

Fig 2 Flow chart of the directional relay

对电压故障分量进行补偿,其效果是增加了正向故障的动作灵敏度,但是降低了反向故障的灵敏度。参见图2,保护为提高反方向元件动作灵敏度,首次判向过程中,即使 $U_1 < U_{MK2}$ ,反方向元件也不对 $U_1$ 进行补偿。在判向流程中,方向元件设置的正向动作区为 $(-170^\circ, -10^\circ)$ ,反向动作区为 $(-10^\circ, 190^\circ)$ ,即式(3)和(4)中取零度。

## 2 事例中误判向原因分析

### 2.1 现场情况

2004年2月,湖南湛茶线发生C相接地故障,故障点距茶园变75km,距湛佳塘变57km左右,两侧高频保护皆拒动,但湛佳塘侧有停信报文,茶园侧无停信报文,只是在本侧后备零序保护发跳令后由“其他保护单跳”停信,在对侧将开关切除后,本侧高频零序才发C相跳闸令。

从以上情况看,整套装置动作行为正确,但故障初期高频保护拒动,拒动原因是茶园侧未停信,正序故障分量方向元件没有准确判断为正方向故障。图3是茶园侧的故障录波图,录波数据包括故障前2周波和故障后的6周波。

### 2.2 原因分析

下面对录波数据的仿真分析中,突变量求取方法是将当前量与两周波前的量作差,滤波算法采用带差分的半周傅氏滤波,与现场保护装置中的算法基本一致。

保护CT变比为1200/5A,即 $I_n = 5.0A$ , $I_{MK} =$

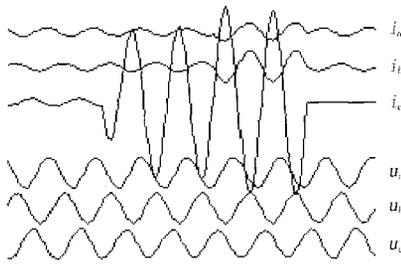


图 3 故障录波图

Fig 3 Fault recording

0.5 ~ 0.75 A, 结合图 4 可得, 故障后  $I_1 > I_{MK}$ ; 根据图 5, 故障后  $U_1 > U_{MK1}$ 。因此正序故障分量方向元件能满足投入条件。对茶园侧保护而言, 故障点在 线路全长的 5/9 处, 正序电压变化为 2 V 左右,  $U_1 / I_1$  约为 0.75, 因此茶园侧基本符合大电源特征。

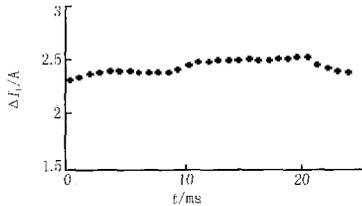


图 4 故障后  $I_1$  随时间的变化

Fig 4  $I_1$  value changing with time after fault

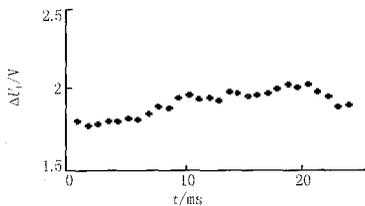


图 5 故障后  $U_1$  随时间的变化

Fig 5  $U_1$  value changing with time after fault

图 6 中, 在 10 ms 内方向元件测量角度略大于  $-170^\circ$ ; 在正向动作区的边缘, 即使不进行补偿也能判为正方向; 但是在 10 ms 以后, 测量角度都略小于  $-170^\circ$ ; 参见流程图 2, 方向元件将会直接误判为反方向。

导致方向元件在 10 ms 后误判向的直接原因是正序电压故障分量  $U_1$  比较小, 求取  $U_1$  时的误差比较大, 测量到的  $U_1 / I_1$  不能真实地反映保护背侧的阻抗。

应该说, 增大门槛值  $U_{MK1}$  能防止上面 10 ms 以后误判向现象的发生。但是如果增大门槛, 会使得很多本来正序故障分量方向元件能准确判断出故障方向的情况, 由于  $U_1$  小于门槛值而不能判断出

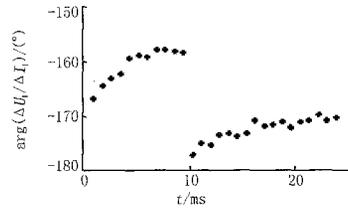


图 6 故障后  $\arg(U_1 / I_1)$  随时间的变化

Fig 6  $\arg(U_1 / I_1)$  value changing with time after fault 来, 只能靠零序或者负序功率方向元件来判断故障方向, 而保护中负序和零序都采用全周傅氏算法。这样会降低整套保护装置的動作速度, 甚至使其不能满足超高压线路保护的動作性能指标。

文献 [5] 中, 工频变化量方向元件中的  $U$  和  $I$  取为正序故障分量和负序分量的组合 (即  $U_{12}$  和  $I_{12}$ ), 正、反方向元件的灵敏度比上述方法都有所提高, 但同样会因为  $U_{12}$  或  $I_{12}$  过小而影响方向元件的判向可靠性。

### 3 新判据的原理分析

#### 3.1 原理分析

从式 (1) 和 (2) 可以看出, 根据实时测量到的  $U_1 / I_1$  是  $-Z_{sn}$  还是  $Z_L + Z_{sn}$  可以判断出是正、反方向故障。结合图 7 可以看出, 判方向的关键是怎样根据  $U_1 / I_1$  求得的阻抗, 在图中阻抗平面上确定是 P 点还是 Q 点, P 点对应正方向故障, Q 点对应反方向故障。

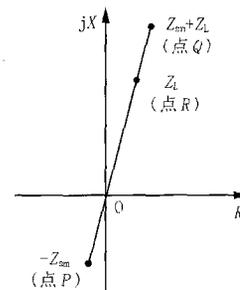


图 7 阻抗平面

Fig 7 Impedance plane

对保护装置来说, 系统阻抗  $Z_{sn}$  和  $Z_L$  随着系统运行方式而变化, 是未知参数。但是被保护线路的阻抗是已知的, 即图 7 中只有线段 OR 是已知的。为了判别正反方向, 可以在图 7 中线段 OR 上某点作该线段的垂线, 用来区分正反方向, 得到图 8, 图中垂线为 l, 垂足定在  $OZ_L$  处的目的是保证反方向元件的灵敏度略高于正方向元件。

令  $U_1 / I_1 = R_1 + j \cdot X_1$ ,  $R_1$  和  $X_1$  可以实时测

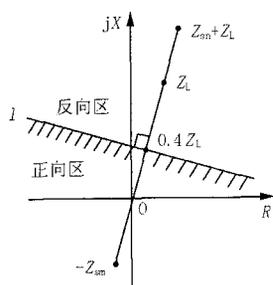


图 8 新判据的判向动作区域

Fig 8 Operative region of the new criterion

量得到,其构成的坐标点  $(R_1, X_1)$  如果在直线  $l$  的上侧,判为反方向;如果在直线  $l$  的下侧判为正方向。

### 3.2 判据的实现方法

由于被保护线路的阻抗已知,所以线段  $OR$  和直线  $l$  都能离线得到,即  $l$  是已知的直线,令其方程为:

$$aR + bX = c$$

其中:  $a, b, c$  为已知的常数,且  $a > 0$ ,  $R$  为横坐标,  $X$  为纵坐标。

在  $U_1 > U_{MKI}$  和  $I_1 > I_{MK}$  的前提下,方向元件的动作判据如下

正方向元件动作判据为  $a \cdot R_1 + b \cdot X_1 < c$ ;

反方向元件动作判据为  $a \cdot R_1 + b \cdot X_1 > c$ 。

### 3.3 特性分析

为分析新判据的特性,将其与原判据作比较。主要分析正方向故障时,反方向元件的动作特性。

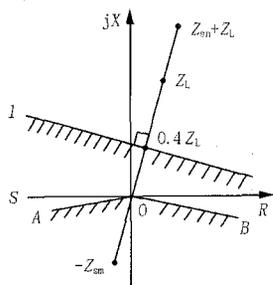


图 9 新旧判据动作区的比较

Fig 9 Operative regions of the old and the new criterions

参见图 9,原来判据的反方向元件的动作区是折线  $AOB$  的上部,新判据反方向元件动作区为直线  $l$  的上部。

如果系统比较大,长线路远端发生故障,测量到的  $U_1$  比较小(但大于  $U_{MKI}$ ),同时考虑到故障分量求取过程中各种误差的影响,  $U_1 / I_1$  对应的阻抗完全有可能进入图 9 中的  $AOS$  区和  $BOR$  区,甚至

可能进入第一和第二象限,但是该种情况  $R_1 + jX_1$  的幅值比较小,即在图 9 中的  $O$  点附近,不会进入直线  $l$  的上部。在上面的事例中,  $U_1 / I_1$  对应的阻抗在 10 ms 后进入了  $AOS$  区而误判为反方向,但是用新判据则能准确判为正方向故障。

结合图 9 可以看出,对于长输电线路,新判据的正方向方向元件的灵敏度得到很大的提高,且线路越长,灵敏度越高;同时降低了反元件的灵敏度。对原来的判据而言,既然目前保护现场出现了反方向元件过灵敏而会将正方向误判为反方向现象,用新判据中的电抗线来适当降低反方向元件的灵敏度,从而提高其动作可靠性,不失为一种比较简单有效的措施。新判据中,反方向元件也有  $0.6Z_L$  对应的判向裕度空间,在两侧电源系统阻抗相同的前提下,反方向元件的灵敏度还是明显高于正方向元件。

对零序、负序功率方向元件,以及反应正负序故障分量复合量的方向元件,都可以采用与上述类似的新判据,来提高反方向元件的动作可靠性。特别是零序功率方向元件,近几年在现场出现过几次因零序电压或者电流较小而引起保护拒动的现象,用新判据则能准确有效地判别出故障方向。

## 4 结论

文中详细分析了现场某次故障中正序故障分量方向元件误判向的原因,并在此基础上提出了一种正序故障分量方向元件的新判据,并可得到如下结论:

- 1) 新判据物理意义明确,实现方法简单,对正反方向元件都有较高的灵敏度。
- 2) 新判据用阻抗平面上的电抗线来代替原来的相位比较判据,相当于又增加了幅值比较的成份,来弥补  $U_1$  很小的时候会引起误判方向的缺陷。
- 3) 该判据对长线路的效果比较明显,线路越长,效果越好;对短线路则体现不出多大的优势。
- 4) 该新判据同样适用于负序和零序功率方向元件,也适用于反应正序故障分量和负序分量构成复合量的方向元件。

## 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.  
ZHU Sheng-shi The Principle and Technique of High Voltage Network Protection [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

- [2] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 1996  
GE Yao-zhong New Type of Protective Relaying and Fault Location Their Theory and Techniques[M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 1996
- [3] Xia Y Q, He J L, Li K K A Reliable Directional Relay Based on Compensated Voltage Comparison for EHV Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(4): 1955-1962
- [4] Radojevic ZM, Terzija V V, Djuric M B. Numerical Algorithm for Overhead Lines Arcing Faults Detection and Distance and Directional Protection [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 31-37.
- [5] 王安定, 葛耀中. 反应正序故障分量的方向元件及其计算机仿真 [J]. 中国电机工程学报, 1986, 6(5): 49-58  
WANG An-ding, GE Yao-zhong Directional Relay Based on Positive Sequence Fault Components and Its Computer Simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 1986, 6(5): 49-58
- [6] 张艳霞, 贺家李, 王笑然, 等. 反应全相非全相状态下各种故障的方向元件 [J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(6): 429-434.  
ZHANG Yan-xia, HE Jia-li, WANG Xiao-ran, et al The Directional Relay that can Operate to All Faults in 3-Phase and 2-Phase Work Conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(6): 429-434
- [7] 许继电气股份有限公司. WXH-801/802数字式微机线路保护装置 [Z]. 2003  
XJ Electric Engineering Co., Ltd WXH-801/802 Digital Microprocessor-based Line Protection Relays[Z]. 2003
- [8] 南瑞继保电气有限公司. RCS-901A/B型超高压线路成套保护装置 [Z]. 2002  
NARI Relays Co., Ltd RCS-901A/B Protection Relays for Extra High Voltage[Z]. 2002
- [9] 沈国荣. 工频变化量方向继电器原理的研究 [J]. 电力系统自动化, 1983, 7(1): 28-38  
SHEN Guo-rong Study of Principle of Power Frequency Variation Directional Relay [J]. Automation of Electric Power Systems, 1983, 7(1): 28-38
- [10] 张承学, 丁书文. 对新型正序故障分量方向元件几个特殊问题的探讨 [J]. 继电器, 1999, 27(3): 16-19.  
ZHANG Cheng-xue, DING Shu-wen Discussion to a Few Particular Problems to New Directional Relay Based on Positive Sequence Fault Components [J]. Relay, 1999, 27(3): 16-19.
- [11] 陈卫, 尹项根, 陈德树, 等. 基于补偿电压的突变量方向判别原理 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(14): 49-66  
CHEN Wei, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu, et al The Ultra High-Speed Directional Protective Relaying Based on Fault Component of Compensation Voltage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(14): 49-66

收稿日期: 2004-09-27; 修回日期: 2004-11-02

作者简介:

许庆强 (1976 - ), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统高压输电线路继电保护; E-mail: Q\_Q\_Xu@sohu.com

索南加乐 (1960 - ), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护的教学和研究工作;

李瑞生 (1966 - ), 男, 高级工程师, 主要从事继电保护方面的研究。

### Maloperation analysis of positive sequence fault components based directional relay and its countermeasure

XU Qing-qiang<sup>1</sup>, SUONAN Jia-le<sup>1</sup>, LI Rui-sheng<sup>2</sup>, FAN Zhan-feng<sup>2</sup>, ZHANG Ke-yuan<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China;

2. XJ Electric Protection and Automation Business Department, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** The principle of positive sequence fault components based directional relay is briefly introduced. The flow chart of the directional relay in real environment is presented. Testing the fault recording data from field operation show that the directional relay may work improperly, and an effective solution specially for the maloperation of the directional relay is put forward. The proposed measure is simple and has a clear physical meaning. On the basis of enough sensitiveness for the relay, the reliability of backward directional relay is improved greatly without any maloperation mentioned above. The proposed criterion is also applied to negative and zero sequence directional components. The technique is evaluated with the dynamic simulation results, and it has been adopted in engineering applications.

This project is supported by Research Fund for the Doctoral Programme of Ministry of Education of P. R. China (No. 20010698015).

**Key words:** power systems; protective relaying; transmission line; directional component