

# 补偿电压突变量方向判别元件的健全相动作特性研究

戴志辉, 陈卫, 尹项根

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在分析了基于补偿电压突变量方向判据动作特性的基础上, 深入讨论了按相构成的方向判据健全相的动作特性。指出在某些系统工况和故障情况下, 该保护原理可能存在的不足, 并根据健全相与故障相电压突变量幅值变化大小关系提出相应的解决方案, 即裕度门槛的自适应整定方法。解决了该元件需要与选相元件配合才能实现超高压线路选相跳闸的不足, 不仅实现了各种故障情况下的方向判别, 而且能够正确选相, 使补偿电压突变量方向元件的优势得以充分发挥。并对该方法进行了仿真实验。

关键词: 补偿电压; 突变量; 方向元件; 健全相

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)16-0007-05

## 0 引言

利用电力载波(或微波、光纤)通道构成的输电线路方向比较式纵联保护, 是超高压输电线路最常见的主保护之一, 其基本思路是利用被保护线路两侧的方向元件来检测是否发生了内部故障。自突变量保护原理提出以来, 将其应用于故障方向判别已经取得了一定的成果<sup>[1,2]</sup>。基于补偿电压的突变量方向判别原理<sup>[3]</sup>, 是利用正、反方向故障时补偿电压突变量与母线电压突变量之间的关系而提出的新型故障方向判别方法。这种方向元件动作速度快, 可靠性高。文献[4]利用该原理构成了正序突变量、负序以及零序方向元件, 但上述原理的方向元件需要与选相元件配合才能实现超高压线路选相跳闸。而常见的选相元件, 尤其是基于相量稳态量的选相元件<sup>[2,5]</sup>, 或多或少都受到各种系统运行工况的影响(如系统振荡时需要采取振荡闭锁措施等), 使补偿电压突变量方向元件的优势得不到充分发挥。如果利用补偿电压突变量方向原理按相分别构成 A、B、C 三相各自独立的方向元件可以摆脱对选相元件的依赖, 充分发挥补偿电压突变量方向判别元件的性能。但目前对于按相构成的补偿电压突变量方向判据在单相接地时健全相的动作特性缺乏深入的分析和讨论。

本文在补偿电压突变量方向判别原理的基础上深入分析了按相构成的方向判据在单相接地时健全相的动作特性, 指出在某些系统工况下, 该保护原理可能存在的问题, 并提出相应解决方案。

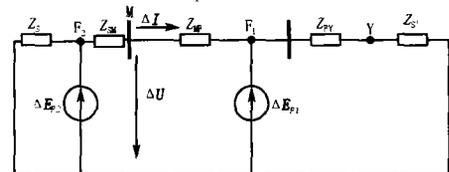
## 1 基于补偿电压的突变量方向判别元件的基本原理

如图 1 所示, 当发生正方向故障时, 正方向元件  $D_+$  的动作条件可以写为:

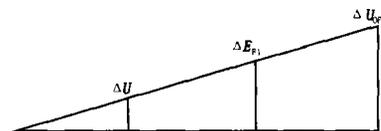
$$D_+ : |U_{op}| - |U| - > 0 \quad (1)$$

反方向元件  $D_-$  的动作条件为:

$$D_- : |U_{op}| - |U| + < 0 \quad (2)$$



(a) 故障附加状态网络图



(b) 正方向故障电压突变量分布



(c) 反方向故障电压突变量分布

图 1 正、反方向短路点金属性短路时的电压突变量分布图

Fig 1 Superimposed power system and its voltage distribution for forward and backward fault

其中:  $U_{op}$  为补偿电压突变量  $U_{op} = U - IZ_Y$ ,  $U$  为保护安装处的电压突变量,  $I$  为保护安装处的电流突变量。  $Y$  为整定点,  $Z_Y = Z_{MF} + Z_{FY}$  (其中,

$Z_{MF}$ 为故障点至保护安装处的线路阻抗,  $Z_{FY}$ 为故障点到整定点  $Y$ 之间的线路阻抗)。为裕度门坎。 $F_1$ 、 $F_2$ 分别为正、反方向故障点。 $Z_S$ 为从故障点  $F_2$ 沿保护反方向看过去的系统等值阻抗,  $Z_{SM}$ 为故障点  $F_2$ 至保护安装处的阻抗,  $Z_S$ 为在整定阻抗处沿保护正方向看过去的系统等值阻抗。通常情况下,为了保证保护有足够的灵敏度,同时避免方向元件的范围延伸过远,一般可以按照距离保护二段的范围来整定。

基于补偿电压的突变量方向判别元件,利用正、反方向故障时补偿电压突变量与母线电压突变量之间的关系判别故障方向。其耐受过渡电阻能力强,不受正反方向外部故障切除时电压恢复的影响,对系统振荡不敏感,并且用幅值比较方式实现,计算简单,动作速度快。

## 2 单相故障时基于补偿电压的突变量方向判别元件的健全相动作特性

考虑到 A、B、C三相的一致性,本文主要讨论 A相发生接地故障时,健全相 B相的动作行为, C相的情况可以依此类推。

### 2.1 A相接地时故障分量复合序网的序电流

根据 A相接地时的边界条件和对称分量法可以得到如图 2所示的单相接地故障的故障分量复合序网。

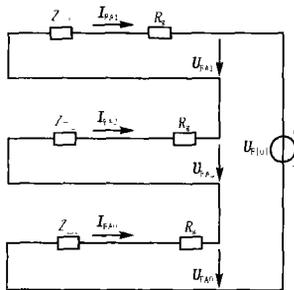


图 2 A相接地时的故障分量复合序网

Fig 2 Phase A fault component model

其中:  $U_{F(0)}$ 是故障点故障前的电压,  $I_{FA1}$ 、 $I_{FA2}$ 、 $I_{FA0}$ 分别是故障分量复合序网中正、负、零序电流,  $Z_{\Sigma 1}$ 、 $Z_{\Sigma 2}$ 、 $Z_{\Sigma 0}$ 分别为故障点的系统综合正、负、零序阻抗。 $U_{FA1}$ 、 $U_{FA2}$ 、 $U_{FA0}$ 分别为正、负、零各序电压,  $R_g$ 为过渡电阻。

由图 2可得故障分量网络中各序电流为:

$$I_{FA1} = I_{FA2} = I_{FA0} = \frac{U_{F(0)}}{3R_g + Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}} = \frac{1}{3} I_{FA} \quad (3)$$

式中:  $I_{FA}$ 为故障点 A相电流。

### 2.2 保护安装处、补偿点的相电流、相电压突变量

设保护安装在 M侧,相补偿电压突变量可写为

$$U_{op} = U_M - (I_M + 3K I_0) Z_Y \quad (4)$$

其中:  $U_M$ 是保护安装处母线相电压的故障分量,

$K = \frac{Z_{MN0} - Z_{MN1}}{3Z_{MN1}}$ ,  $I_M + 3K I_0$ 是流经保护的带零序

电流补偿的相电流故障分量。为了简化分析,设流经保护的相电流故障分量。为了简化分析,设流经保护的相、负、零序电流分配系数与该侧电源的正、负、零序电流分配系数相等,分别为  $C_{IM}$ 、 $C_{2M}$ 、 $C_{0M}$ ,且  $C_{IM} = C_{2M}$ 。

设在图 1的  $F_1$ 点 A相经过渡电阻  $R_g$ 接地,根据故障附加状态网络,保护安装处 M母线上的故障分量电压分别为<sup>[2]</sup>

$$U_{MA} = - (I_{MA} + 3K I_0) Z_{M1} \quad (5)$$

$$U_{MB} = - (I_{MB} + 3K I_0) Z_{M1} \quad (6)$$

流经保护的故障分量电流  $I_M + 3K I_0$ 分别为:

$$(I_{MA} + 3K I_0) = [2C_{IM} + (1 + 3K) C_{0M}] \frac{1}{3} I_{FA} \quad (7)$$

$$(I_{MB} + 3K I_0) = [(1 + 3K) C_{0M} - C_{IM}] \frac{1}{3} I_{FA} \quad (8)$$

将式 (7)、(8)及式 (5)、(6)代入式 (4)可得:

$$U_{OPA} = - [2C_{IM} + (1 + 3K) C_{0M}] \frac{1}{3} I_{FA} (Z_{M1} + Z_Y) \quad (9)$$

$$U_{OPB} = - [(1 + 3K) C_{0M} - C_{IM}] \frac{1}{3} I_{FA} (Z_{M1} + Z_Y) \quad (10)$$

### 2.3 健全相方向元件动作分析

结合方向元件判据,对于健全相,比较式 (10)和式 (6):

$$\begin{aligned} |U_{OPB}| - |U_{MB}| &= [(1 + 3K) C_{0M} - C_{IM}] \frac{1}{3} \cdot \\ I_{FA} (Z_{M1} + Z_Y) & - [(1 + 3K) C_{0M} - C_{IM}] \frac{1}{3} I_{FA} Z_{M1} \end{aligned} \quad (11)$$

在近似认为线路全长阻抗均匀一致,且与两侧系统阻抗相角相近的情况下,将式 (3)代入,式 (11)可化简为:

$$\begin{aligned} |U_{OPB}| - |U_{MB}| &= (1 + 3K) C_{0M} - C_{IM} \frac{1}{3} \cdot \\ I_{FA} Z_Y & = \left| \frac{I (Z_{MN0} / Z_{MN1}) C_{0M} - C_{IM} I U_{F(0)}}{3R_g + Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}} Z_Y \right| \end{aligned} \quad (12)$$

不难发现式(12)大于等于0,但其具体大小受分支系数、过渡电阻、线路阻抗、故障点故障前电压等因素的影响,而影响分支系数大小的因素又包括网络操作,系统运行方式变化,故障点的不同等。由于电源在电力系统中的分散性和运行方式变化的多样性,在继电保护整定过程中,难以准确考虑电源运行方式变化对分支系数的影响。对于式(12),很难有唯一确定的数值结果。此时若式(1)中裕度门坎

选取不当,则健全相(B相)按相构成的正方向元件可能动作。

反方向故障时,与正方向同理,在满足整定阻抗的选择原则<sup>[2]</sup>前提下有:

$$\begin{aligned} & |U_{OP,B}| - |U_{MB}| = \\ & \left| \frac{[(Z_{MN0}/Z_{MN1})C_{0M} - C_{1M}]JU_{F|0|}}{3R_g + Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}} Z_Y \right| \geq 0 \quad (13) \\ & |U_{OP,A}| - |U_{MA}| = \\ & - \left| \frac{[(Z_{MN0}/Z_{MN1})C_{0M} + 2C_{1M}]JU_{F|0|}}{3R_g + Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}} Z_Y \right| < 0 \quad (14) \end{aligned}$$

由式(11)、(13)可见,不论正反方向,  $|U_{OP}| - |U_M|$ 对健全相的计算结果均为非负,只是由于分支系数、各序综合阻抗与正方向故障情况下的不同而有不同的计算结果。将式(13)代入式(2),观察可以发现,当  $|U_{OP,B}| - |U_{MB}|$  为非负,健全相会因满足正方向判据而误判。

对式(14),取不同的  $|U_{OP,A}| - |U_{MA}|$ ,代入式(2)后会有不同的结果,特别的,当

$$|U_{OP,A}| - |U_{MA}| > \left| \frac{[(Z_{MN0}/Z_{MN1})C_{0M} + 2C_{1M}]JU_{F|0|}}{3R_g + Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}} Z_Y \right| \text{时,故障相}$$

也可能误动。但是,实际应用中  $|U_{OP,A}| - |U_{MA}|$  不可能取得那么大,所以这种误判几率极小。

#### 2.4 过渡电阻对健全相的影响

健全相的动作情况基本不受过渡电阻  $R_g$  的影响。当过渡电阻太大,导致  $U_{MA}$  和  $I_{MA}$  太小以至于使  $U_{OP,A}$  与  $U_{MA}$  之差小于裕度门坎时,故障相的方向保护将拒动,健全相由于分得的故障分量更小,此时正方向元件也不会动作。

### 3 按相构成的方向元件的改进

#### 3.1 正方向故障时故障相的动作特性

与健全相类似,故障相A相的方向元件判据为:

$$|U_{OP,A}| - |U_{MA}| =$$

$$\left| \frac{[(Z_{MN0}/Z_{MN1})C_{0M} + 2C_{1M}]JU_{F|0|}}{3R_g + Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}} Z_Y \right| \quad (15)$$

对比(12)、(15)两式,显然  $|U_{OP,A}| - |U_{MA}|$  大于  $|U_{OP,B}| - |U_{MB}|$ ,即故障相补偿电压突变量与母线电压突变量的差值要比健全相的大得多。

#### 3.2 自适应调整方向判据裕度门坎

针对上述分析,本文提出了一种采用自适应调整裕度门坎的方案来解决健全相方向元件所存在的问题。

解决方案中将裕度门坎直接取为“健全相”的判据计算结果,即  $|U_{OP,B}| - |U_{MB}|$ ;正方向取式(12)的结果,反方向取式(13)的结果,实际应用中,“健全相”即三相判据结果中具有最小幅值的那一相。

正方向单相故障时,对于健全相,将式(12)和按上述方法得到的  $|U_{OP,B}| - |U_{MB}|$  代入式

$$|U_{OP}| - |U_M| \quad (16)$$

得式(16) = 0,方向元件不动作。

对于故障相,将式(15)和  $|U_{OP,B}| - |U_{MB}|$  代入式(16),得:

$$\text{式(16)} = \left| 3C_{1M} \frac{U_{F|0|}}{3R_g + Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}} Z_Y \right| \gg 0,$$

这样,由式(16)得到的三相计算结果中,只有故障相的大于0,符合正方向判据。而健全相判据结果均为0,方向元件不动作。这样不仅实现了故障时候的方向判别,而且能够正确选相。考虑到实际运行中健全相的结果可能不精确等于0,故可认为有最大值,并且其值远大于(一般取4~8倍<sup>[4]</sup>)另外两相的一相为故障相(与两相、三相故障相区别)。

为了验证反方向故障时按此方法整定不会引起故障相方向元件误判方向,对故障相,将式(14)和代入式(16),得式(16)等于:

$$- \left| \frac{(2(Z_{MN0}/Z_{MN1})C_{0M} + C_{1M})U_{F|0|}}{3R_g + Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}} Z_Y \right| \ll 0, \text{符合反方向判据。}$$

对健全相,将式(12)和  $|U_{OP,B}| - |U_{MB}|$  代入式(16),得式(16) = 0。将式(16)得到的三相计算结果取幅值,认为有最大幅值,并且其值远大于另外两相的一相为故障相。

当系统发生两相故障时,经理论计算,对于式  $|U_{OP}| - |U_M|$ ,两故障相的计算结果远大于健全相,不会出现一相大于另外两相4倍的情况,所以两相故障时不会误判为单相故障,可把判据计算结果基本相等且远大于另外一相的两相判为故障相,两相故障中超前相和滞后相电压、电流大小虽

然受过渡电阻的影响,变化趋势不同,但采取自适应门槛的突变量判据依然成立。三相故障,三相判据结果基本相同,且三相故障中电压电流变化特征较为明显,限于篇幅这里不再讨论。

按相构成的方向元件的改进方案可表述为:将(1)、(2)两式作为方向判据,自适应地调整裕度门槛。实际应用中,先计算 $|U_{OP}| - |U_M|$ ,若有一相为负、另外两相都为正,则为反方向故障。若三相均为正,则为正方向故障。再取三相 $| |U_{OP}| - |U_M| |$ 中的最小值为裕度门槛,将代入 $| |U_{OP}| - |U_M| - |$ ,有最大值,并且其值远大于另外两相的那一相即为故障相。反方向发闭锁信号,正方向出口跳闸。

### 3.3 仿真验证

本文利用 ATP/EMTP电磁暂态仿真程序,建立如图 3所示的电网模型,其基本参数如下:

$$\begin{aligned}
 Z_{M1} &= 6.16 + j34.32, & Z_{M0} &= 3.52 + j45.3 \\
 r_l &= 0.02563 \text{ /km}, & r_0 &= 0.1466 \text{ /km} \\
 l_l &= 0.2811 \text{ mH/km}, & l_0 &= 0.6505 \text{ mH/km} \\
 c_1 &= 0.0128 \text{ }\mu\text{F/km}, & c_0 &= 0.0078 \text{ }\mu\text{F/km} \\
 Z_{N1} &= 2.37 + j21.6, & Z_{N0} &= 1.27 + j28.8 \\
 L_1 &= L_2 = 1.141 \text{ H}
 \end{aligned}$$

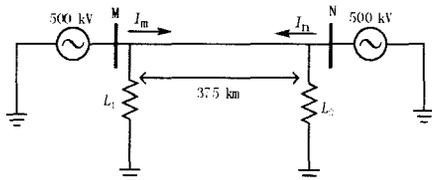


图 3 仿真模型

Fig 3 Simulation model

仿真结果如图 4所示,以下三组图分别是被保护线路出口、末端和反方向故障情况下,不考虑自适应门槛和考虑自适应门槛时健全相与故障相的判据(1)、(2)两式结果对比图。图中实线所示曲线为故障相判据结果,点线所示曲线为健全相判据结果。使用自适应裕度门槛以后,健全相判据结果基本为0,远小于故障相判据结果,故在下图中因与时间轴重合而不是很明显。

由仿真结果可见:不论正反方向故障,健全两相不计裕度门槛的判据计算结果基本相同且正方向故障时健全相结果小于故障相结果。使用了自适应裕度门槛的判据结果故障相具有很大数值,而健全两相数值基本为0,据此很容易判明故障相。而不考虑自适应门槛的判据结果健全相和故障相都具有较大数值,如果门槛选取不当,可能造成误动。

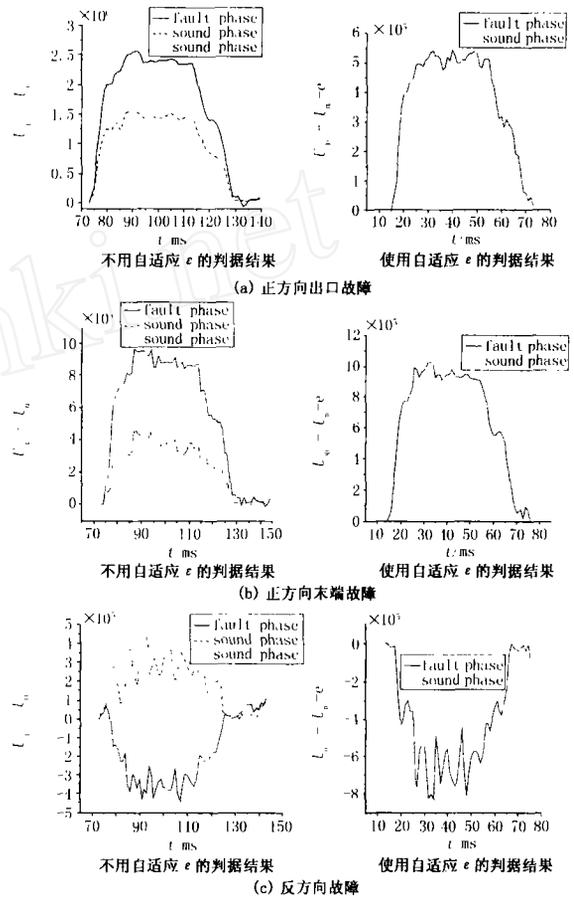


图 4 正反方向故障不使用自适应门槛和使用后的对比图

Fig 4 Comparison results of forward and backward fault with/w/without self-adaptive end

## 4 结束语

通过对按相构成的补偿电压突变量方向元件在单相故障时健全相动作特性的分析,指出了该方向元件存在的问题,即单相故障时健全相方向元件可能出现误动。对此,根据健全相与故障相电压突变量幅值变化关系,提出了相应的解决方案,即裕度门槛的自适应整定:取为三相 $| |U_{OP}| - |U_M| |$ 中的最小值。不仅实现了故障时候的方向判别,而且能够正确选相。

### 参考文献:

[1] 陈卫,尹项根,等.基于补偿电压故障分量的纵联方向保护原理与仿真研究[J].中国电机工程学报,2005,25(21):92-97.  
CHEN Wei, YN Xiang-gen, et al Principle Investigation and Simulation of Directional Protection Based on Fault

- Component of Compensating Voltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (21): 92-97.
- [2] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术 (第二版) [M]. 北京:中国电力出版社, 1995.  
ZHU Sheng-shi Principle and Technology of High Voltage Networks Protection, Second Edition [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [3] 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): 49-51.  
CHEN Wei, YN 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): 49-51.
- [4] 马勇,陈德树,陈卫. 新型超高压输电线路保护方案的研究 [J]. 继电器, 2003, 31 (8): 5-7.  
MA Yong, CHEN De-shu, CHEN Wei Development of a Novel UHV Transmission Line Protection System [J]. Relay, 2003, 31 (8): 5-7.
- [5] 许正亚. 输电线路新型距离保护 [J]. 北京:中国水利水电出版社, 2002.  
XU Zheng-ya New Type Distance Protection of Power Line [J]. Beijing: China Water Power Press, 2002.

收稿日期: 2005-12-16; 修回日期: 2006-03-31

作者简介:

戴志辉 (1980 - ),男,硕士研究生,研究方向为电力系统微机继电保护; E-mail: daihuadian@sina.com

陈卫 (1970 - ),男,博士,讲师,从事电力系统继电保护等领域的教学、研究工作;

尹项根 (1954 - ),男,教授,博士生导师,从事电力系统继电保护、变电站自动化控制及电力系统控制的教学、研究工作。

### Study on sound phase operating characteristic of directional protective relaying based on fault component compensating voltage

DAI Zhi-hui, CHEN Wei, YN Xiang-gen

(School of Electrical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Based on analysis of characteristic of fault directional discriminating criteria based on superimposed component of compensation voltage, sound phase operating characteristic of phase - based criteria is analyzed. Weakness of this directional discrimination under some operating mode and fault is pointed out. According to the amplitude relationship of superimposed component of sound phase and fault phase, self - adaptive setting method of the margin threshold is proposed, which makes the direction discrimination could be used as a phase - selection component as well as a direction component, at the same time makes full use of the dominance of the direction discriminating criteria. The simulation and analysis of presented scheme is introduced.

**Key words:** compensating voltage; directional relay; fault component; Sound phase

### 《继电器》杂志文摘编写要求

根据国际检索的要求,《继电器》杂志对投稿摘要的编写作以下修改说明:

1. 摘要应是一篇独立的短文,应包含与论文同等量的主要信息,主要由三部分组成,即:研究的问题、过程和方法、结果。

2. 摘要中应排除本学科领域已成为常识的内容,切忌把引言中出现的内容写入摘要,一般也不要对论文内容作诠释和评价,尤其是自我评价。

3. 摘要应用第三人称编写,不必使用“本文”“作者”等作主语。应尽量取消或减少背景信息。

4. 摘要应使用规范化的名词术语,不用非公知公用的符号和术语,新术语或尚无合适汉文术语的,可用原文或译出后加括号注明原文。

5. 摘要一般不用数学公式或化学结构式,不出现插图、表格,不用引文。缩略语、略称、代号首次出现时必须加以说明。

6. 中文摘要一般在 200~250 个字之间,英文一般 150 个单词左右,关键词一般应列出 5~8 个。