

基于负序分量补偿的纵联零序方向保护判据与仿真研究

张弛¹, 李一泉¹, 曾耿晖^{2,1}

(1. 广东省电力调度中心, 广东 广州 510600; 2. 华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘要: 针对纵联零序方向零压不够时保护拒动的实际问题, 考虑到系统中各站点间的负序转移阻抗远小于零序转移阻抗, 单相接地故障时负序电压大于零序电压这一特点, 论文提出了基于负序分量补偿的方向保护补充判据。判据进行了周密的实用化考虑, 利用故障后零负序电压与电流的相位关系来判别故障方向, 在深入分析判据动作特性及灵敏度的基础上, 按照故障特征的差异逐步提高灵敏度, 综合构成了较完善的纵联接地方向保护方案。实例验证与仿真结果均表明, 由该负序分量补偿的纵联零序方向保护在零序方向元件因电压不足而拒动时, 能可靠判别故障方向, 并具有良好的可靠性与选择性, 从而有效改善了纵联接地保护的性能。

关键词: 负序分量; 补偿; 零序方向; 灵敏度

Principle investigation and simulation research on pilot zero sequence directional protection with compensation of negative sequence component

ZHANG Chi¹, LI Yi-quan¹, ZENG Geng-hui^{1,2}

(1. Guangdong Power Dispatch Center, Guangzhou 510600, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: If the zero sequence voltage is not sensitive enough, the pilot zero sequence directional protection will not operate correctly. Considering the negative sequence transfer impedance between stations is much smaller than zero sequence transfer impedance between stations, and the negative sequence voltage is greater than the zero sequence voltage when single phase fault occurs, a new criteria based on the composition of negative sequence component is proposed. The detailed actual applications are considered in the criteria. According to the phase relationship between zero and negative sequence voltage and current after fault, the fault direction can be calculated. After analyzing the characteristic and sensitivity of criteria deeply, the sensitivity can be improved step by step, and then a complete pilot directional earth fault protection scheme is finished. The result of actual system and simulation demonstrate that the criteria can judge the fault direction reliably with good reliability and sensitivity. So the new criteria can effectively improve the performance of pilot directional earth fault protection.

Key words: negative sequence component; compensation; zero sequence direction; sensitivity

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)21-0018-06

0 引言

纵联零序方向保护具有原理简单、过渡电阻耐受能力强、算法实现容易、灵敏度高以及不易受系统振荡和正常负荷变化等因素影响的特性, 从而广泛配置在超高压线路保护中, 并作为最快速可靠的手段切除单相接地故障。但在广东电网的实际运行中, 该保护也暴露出一系列原理性缺陷, 特别是在某些情况下, 零序方向元件会由于零序电压的不足而无法动作。本文首先结合广东电网的运行经验对零序方向保护遇到的问题进行分析, 在周密的实用化考虑之后, 提出了基于负序分量补偿的综合解决

方案。

1 传统纵联零序方向保护原理分析

如图1所示的双端电源系统, 在正反方向故障时, 保护安装处的零序电压分别为:

正方向故障 (Kp):

$$\dot{U}_{M0} = -\dot{I}_0 \times \dot{Z}_{M0} \quad (1)$$

反方向故障 (Kn):

$$\dot{U}_{M0} = \dot{I}_0 \times (\dot{Z}_{L0} + \dot{Z}_{N0}) \quad (2)$$

其中: U_{M0} 、 I_0 、 Z_{M0} 及 Z_{L0} 分别为M侧电压、电流、

系统等值阻抗及线路阻抗零序分量。

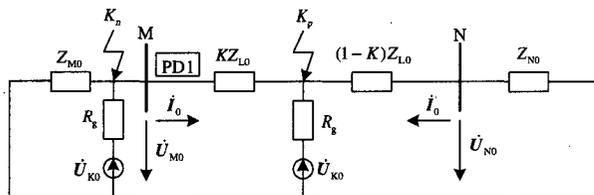


图1 双端电源接地故障零序序网图

Fig.1 Zero sequence diagram under single phase earth-fault

一般地, 系统阻抗总是呈电感性, 且阻抗角多在 80° 左右。而微机保护出于精度考虑, 往往直接用 $3U_0$ 、 $3I_0$ 进行比相, 保护判据通常以零序阻抗角为灵敏角, 动作区控制在 180° 左右, 实际上, 由于发电厂、变电站总存在着各种形式的干扰源, 如: 开关、刀闸分合, 电容器的投切, 区外故障等, 而接地电阻的大小, 回路接线差异, 电缆的敷设与接地等都影响着回路的抗干扰能力。再考虑到三相PT、CT的不平衡, 现场总是或多或少地存在着零序不平衡量。因而微机保护必须考虑 $3U_0$ 、 $3I_0$ 有足够的门槛值, 以防止由于上述因素造成的保护误动, 则完整的零序方向元件判据为:

$$\text{正方向元件: } 180^\circ > \arg(3\dot{I}_0 / 3\dot{U}_0) > 18^\circ \quad (3)$$

$$3I_0 > 3I_{0\text{Fset}} \quad (4)$$

$$3U_0 > \varepsilon \quad (5)$$

$$\text{反方向元件: } 0^\circ > \arg(3\dot{I}_0 / 3\dot{U}_0) > -162^\circ \quad (6)$$

$$3I_0 > 3I_{0\text{QD}} \quad (7)$$

$$3U_0 > \varepsilon \quad (8)$$

目前, 主流微机保护 $3U_0$ 的门槛在1 V左右, 部分设备可以达到0.5 V。但必须注意到, 0.5 V已经是门槛电压的最低值, 甚至是以牺牲部分抗干扰能力而获得的。

当零序电压不足时, 零序方向元件自然无法动作。例如, 2005年7月13日17:24, 韶田线CN单相接地。由于韶关电厂侧零序电压较小, 处于零序方向元件动作电压门槛的边界, 该侧B相高频保护零序正方向元件未能动作, 导致两侧B相高频保护拒动。两侧仅A相高频零序动作, 跳开C相开关, 并重合成功。从当时的采样数据看, 韶关电厂侧 $3U_0$ 峰值仅2 V, $3I_0$ 峰值超过5A。显然, 若这类故障不能快速切除, 将可能引起相邻线保护越级跳闸, 从而对系统不利。虽然韶田线零序方向保护的电压门槛较高(1.5 V), 但若故障条件更极端一些, $3U_0$ 将不足0.5 V, 则目前主流零序方向保护都将无法动作。验算表明, 对于系统阻抗很小, 出线很长的故障, 普

遍可能存在线路末端故障时, $3U_0$ 不足的问题。

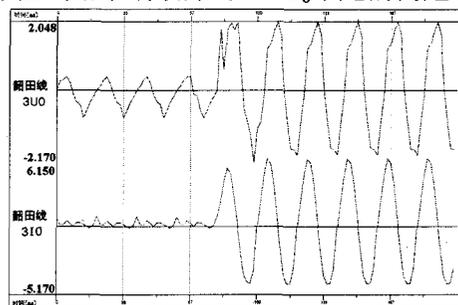


图2 韶田线C相故障韶关电厂侧 $3U_0$ 与 $3I_0$

Fig.2 $3U_0$ and $3I_0$ of Shaoguan plant under phase C earth-fault

2 基于负序分量补偿的纵联零序方向判别

与零序分量一样, 负序分量也是故障分量的一种, 同样具有零序分量的优点, 但其往往具有更高的灵敏度。正是基于此点, 可以利用负序分量解决传统零序方向元件遇到的问题。对于正方向元件, 当 $3U_0$ 大于采样精度门槛值时, 仍采用原有判据, 当 $3U_0$ 小于采样精度门槛值时, 投入负序正方向元件并保证故障相的零负序电流相位一致和3倍负序电流($3I_2$)大于动作门槛。基于负序分量补偿的纵联零序方向具体判据如下:

正方向元件:

当 $3U_0 > \varepsilon$ 时, 仍采用原有判据, 即:

$$180^\circ > \arg(3\dot{I}_0 / 3\dot{U}_0) > 18^\circ \quad (9)$$

$$3I_0 > 3I_{0\text{set}} \quad (10)$$

当 $3U_0 < \varepsilon$ 时, 投入负序判据:

$$180^\circ > \arg(3\dot{I}_2 / 3\dot{U}_2) > 18^\circ \quad (11)$$

$$3I_0 > 3I_{0\text{set}} \quad (12)$$

$$3I_2 > 3I_{2\text{set}} \quad (13)$$

$$-\varphi_{\text{set}} < \arg \dot{I}_{\varphi 0} / \dot{I}_{\varphi 2} < \varphi_{\text{set}} \quad (14)$$

φ_{set} 为相位定值, 可设为 15° 。

反方向元件:

同时投入零负序方向元件, 且反方向元件优先于正方向元件

$$0^\circ > \arg(3\dot{I}_0 / 3\dot{U}_0) > -162^\circ \quad (15)$$

$$3I_0 < 3I_{0\text{qd}} \quad (16)$$

$$\text{或 } 0^\circ > \arg(3\dot{I}_2 / 3\dot{U}_2) > -162^\circ \quad (17)$$

$$3I_2 < 3I_{2\text{qd}} \quad (18)$$

3 基于负序分量补偿的纵联零序方向判据灵敏度分析

序分量的灵敏度受到系统阻抗的分布、故障点的位置及过渡电阻的大小等因素的影响，其中负序分量强系统侧灵敏度较零序分量为高，具体分析如下：

3.1 系统阻抗的影响

假设MN间的线路发生单相接地故障（图5），且M侧存在 $3U_0$ 低于门槛电压的问题。不妨设：M、N侧各序系统阻抗为： Z_{M1} 、 Z_{M2} 、 Z_{M0} ， Z_{N1} 、 Z_{N2} 、 Z_{N0} ；M、N之间的转移阻抗为： Z_{MN1} 、 Z_{MN2} 、 Z_{MN0} （不含故障线路）；故障线路的正、负、零序阻抗为： Z_{L1} 、 Z_{L2} 、 Z_{L0} ；故障点与M侧的距离占线路全长的 K 倍；故障点的过渡电阻为 R_g 。

由于M侧存在 $3U_0$ 低于门槛电压的问题，而N侧 $3U_0$ 满足门槛值。则

$$U_{M0} < U_{N0} \quad (19)$$

显然当M侧负序电压低于N侧时情况更为恶劣，因此不妨设：

$$U_{M2} < U_{N2} \quad (20)$$

不难看出，转移阻抗 Z_{MN} 的穿越电流由M侧流向N侧。此时

M侧的零序电压

$$\dot{U}_{M0} = -\dot{i}_0 \times \dot{Z}_{M0} = -(\dot{i}_{M0} + \dot{i}_{MN0}) \times \dot{Z}_{M0} \quad (21)$$

N侧的零序电压

$$\dot{U}_{N0} = -(\dot{i}_F - \dot{i}_0) \times \dot{Z}_{N0} = -(\dot{i}_F - \dot{i}_{M0} - \dot{i}_{MN0}) \times \dot{Z}_{N0} \quad (22)$$

M侧的负序电压

$$\dot{U}_{M2} = -\dot{i}_2 \times \dot{Z}_{M2} = -(\dot{i}_{M2} + \dot{i}_{MN2}) \times \dot{Z}_{M2} \quad (23)$$

N侧的负序电压

$$\dot{U}_{N2} = -(\dot{i}_F - \dot{i}_2) \times \dot{Z}_{N2} = -(\dot{i}_F - \dot{i}_{M2} - \dot{i}_{MN2}) \times \dot{Z}_{N2} \quad (24)$$

由于广东电网厂站密集，环网众多，而出现零序电压不足的问题的站端，均是在负荷中心或重要的电源的出线，因此MN间总连接着很多的线路与变压器。而如图5所示，由于变压器分流的原因，MN之间的零序转移阻抗 Z_{MN0} 往往远大于图中其它的系统阻抗。而MN之间的负序转移阻抗 Z_{MN2} 则不存在此问题，通常与线路负序阻抗大小相仿，甚至小于线路负序阻抗。

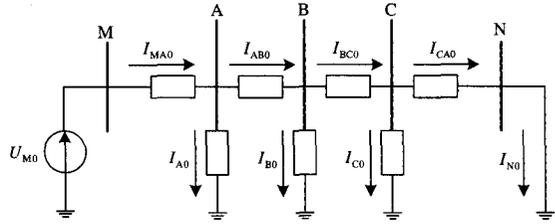


图3 零序转移阻抗拓扑示意图

Fig.3 Diagram of zero sequence transfer impedance

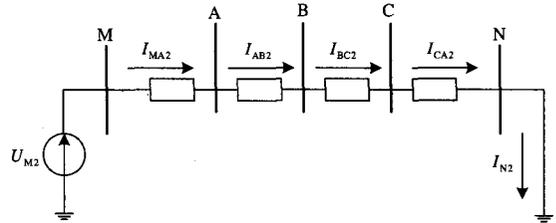


图4 负序转移阻抗拓扑示意图

Fig.4 Diagram of negative sequence transfer impedance

由此可得： $I_0 \approx I_{M0}$ ，而 $I_2 > I_{M2}$ 。

同样由于M侧处于负荷中心或重要的电源处，根据广东电网各厂站的归算阻抗，此类厂站的零序自阻抗总是相差不大。

$$\text{即： } Z_{M2} \approx Z_{M0} \quad (25)$$

$$\text{而对于长线路， } I_{M2} \approx I_{M0} \quad (26)$$

$$\text{所以： } U_{M0} < U_{M2} \quad (27)$$

从对广东电网部分厂站的验算数据看，在极端情况下，负序电压远大于零序电压，具有足够的灵敏度，能够保证故障方向的准确判别。

对于区外故障，不妨仍假设保护安装于M侧系统处，显然有：

$$U_{M0} < U_{M2} \quad (28)$$

表明负序反方向元件同样有更好的灵敏度。

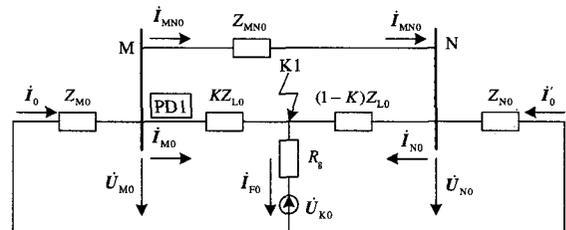


图5 考虑零序转移阻抗的双端电源系统单相接地区内故障零序网图

Fig.5 Zero sequence diagram under single phase earth-fault considering transfer impedance

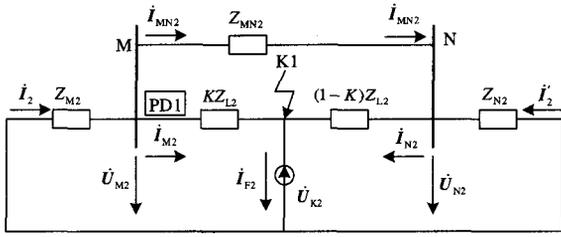


图6 考虑负序转移阻抗的双端电源系统
单相接地区内故障负序网图

Fig.6 Negative sequence diagram under single phase earth-fault considering transfer impedance

3.2 故障点位置的影响

对于图1所示的双侧电源系统, M侧零序电压为

$$U_{M0} = \frac{E}{2 + \frac{Z_{\Sigma 2}}{Z_{\Sigma 0}}} \times \frac{Z_{M0}}{Z_{M0} + KZ_L} \quad (29)$$

$$\text{设 } \frac{Z_{\Sigma 2}}{Z_{\Sigma 0}} = \Delta \times \frac{(Z_{M2} + KZ_{L2}) \times (Z_{N2} + (1-K)Z_L)}{(Z_{M0} + KZ_0) \times (Z_{N0} + (1-K)Z_{L0})} \quad (30)$$

代入式(29)有:

$$U_{M0} = \frac{E \times Z_{M0}}{2 \times (Z_{M0} + KZ_{L0}) + \Delta \times (Z_{M2} + KZ_{L2}) \times \frac{(Z_{N2} + (1-K)Z_L)}{Z_{N0} + (1-K)Z_{L0}}} \quad (31)$$

若 $\frac{Z_{N2} + (1-K)Z_L}{Z_{N0} + (1-K)Z_{L0}} < \frac{Z_{N2}}{Z_{N0}}$, 显然 U_{M0} 在 $K=1$ 时有

最小值。事实上, 式(31)即:

$$\frac{Z_{L0}}{Z_L} > \frac{Z_{N0}}{Z_{N2}} \quad (32)$$

这显然成立, 因此, U_{M0} 在线路末端金属性短路时有最小值。同样可证, 在我们更为关心的系统阻抗更小的M侧, 对于 U_{M2} , 在线路末端金属性短路时有最小值。

3.3 过渡电阻的影响

对于单相接地故障, $I_{F0} = I_{F2}$, 当过渡电阻增大时, I_{F0} 与 I_{F2} 同时减小。当过渡电阻 R_g 远大于金属性短路时的各序阻抗时, 可认为

$$I_{F0} = I_{F2} \approx E / R_g \quad (33)$$

若对图6作星网变换, 则

$$Z_{A2}' = (KZ_{K2} \times (1-K)Z_{L2}) / (Z_{L2} + Z_{MN2}) \quad (34)$$

$$Z_{B1} = Z_{B2} = (KZ_{K2} \times Z_{MN2}) / (Z_{L2} + Z_{MN2}) \quad (35)$$

$$Z_{C1} = Z_{C2} = [(1-K)Z_{L2} \times Z_{MN2}] / (Z_{L2} + Z_{MN2}) \quad (36)$$

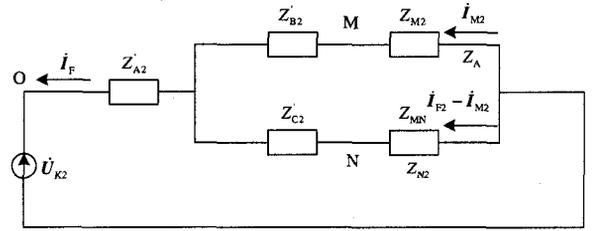


图7 星网变换后的双端电源系统单相接地区内
故障负序网图

Fig.7 Negative sequence diagram under single phase earth-fault after Y-D transformer

显然流过M侧系统阻抗的负序电流与流过N侧负序电流之比为:

$$I_{M2} / I_{N2} = (Z_{N2} + Z_{C'}) / (Z_{M2} + Z_{B'}) \quad (37)$$

当 K 增大时, $Z_{B'}$ 将增大, $Z_{C'}$ 将减小, 而 I_{M2}/I_{N2} 也随之减小。由于 I_F 几乎不变, 所以 I_{M2} 也将增大。当 $K=1$ 时, $Z_{B'}$ 最大, $Z_{C'}$ 最小, 流过M侧系统阻抗的负序电流也就最小, 而M侧的负序电压也最小。因此, 只要在M侧末端短路时满足负序方向元件的灵敏度, 则可以保证负序方向元件在全线的灵敏度。

对于区外故障, 由于系统中零负序阻抗的分布比例并不一致, 因此当发生图5所示的区外故障时, 故障点可能落于线路L1的零、负序电气中点之间。则L1的零、负序电流的方向并不一致。虽然判据中规定了反方向优先的原则, 但为了降低对电压回路可靠性的依赖, 防止在边界条件下M、N两侧零、负序正方向元件分别动作且反方向元件不动作, 因此增加 $-15^\circ < \arg i_{\varphi 0} / i_{\varphi 2} < 15^\circ$ 这一判据, 提高零负序电流反向穿越时负序方向元件的动作可靠性。

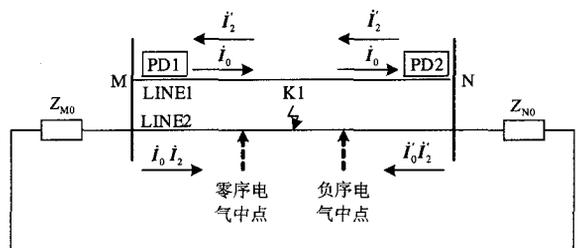


图8 零负序电流反向穿越示意图

Fig.8 Diagram of reverse flowing on zero and negative sequence

3.4 暂态特性的影响

大量的实践应用表明, 负序方向元件在暂态过程中, 如系统振荡、外部故障起始阶段及外部故障

切除过程以及开关分合等工况中,存在误判的可能。这是由于负序分量在理论上是一种稳态的正弦波周期分量,因此,经典的傅氏算法及负序算法都会在暂态过程中存在较大偏差。而由于负序方向元件主要比较的是负序电压与负序电流的关系,因此将会进一步放大算法中的误差,甚至导致方向元件误动作。因此,在投入式(11)中的判据时,必须考虑相应措施,躲过系统振荡、外部故障等区外暂态扰动的影 响。

针对此暂态影响,一方面考虑这一过程都不长,仅1~2周波,另一方面考虑算法误差主要是由于电压、电流突变所引起的。因此,采用在负序方向元件动作后延时出口和判别电流电压没有突变后方投入负序方向元件的办法可以解决暂态过程对负序方向元件的影响。

实际上,由于单相接地故障对系统的冲击远小于三相短路,因此在零序方向元件不能动作时,只需要负序方向元件与相邻线的接地距离二段和零序二段保护具有配合关系即可。因此,负序方向元件完全可以在故障100 ms后才出口跳闸。这样既可以在区内故障时实现相继动作,还可以为区外故障时相邻线路快速切除故障提供充足的时间裕度。

4 现场实测数据验证

为了验证本文提出的零序方向元件的有效性,本文采用韶田线事故的保护采样数据进行了仿真验证。图4已画出了韶田线韶关电厂侧的 $3U_0$ 与 $3I_0$ 的波形,而图9画出了 $3U_2$ 与 $3I_2$ 波形。从图中可以看出,韶关电厂侧的 $3U_2$ 的峰值有3.96 V,大于 $3U_0$ 。且 $3U_2$ 滞后于 $3I_2$ 约 80° ,此时负序正方向元件满足动作条件。可见,利用 $\arg(U_2/I_0)$ 代替 $\arg(3U_0/3I_0)$ 的方法,可以解决因零序电压低导致的零序方向元件拒动的问题。

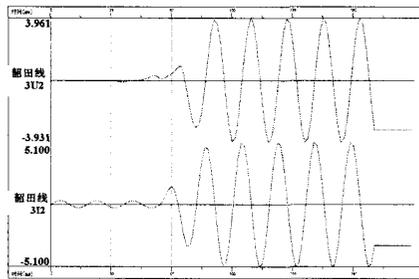


图9 韶田线C相故障韶关电厂侧 $3U_2$ 与 $3I_2$
Fig.9 $3U_2$ and $3I_2$ of Shao Guan Plant under phase C earth-fault

5 RTDS仿真验证

为了系统考核各种极端条件下负序方向元件

的动作特性,本文利用广东省电力调度中心的RTDS数字仿真系统,建立如图5所示仿真模型,对不同运行方式下保护区内、外的接地故障进行了仿真。其中,线路基本参数如下:

$$Z_{L1}=Z_{L2}=0.4 \angle 80^\circ, 50-150 \text{ km}$$

$$Z_{L0}=1.22 \angle 74.5^\circ, 50-150 \text{ km}$$

M、N两侧系统的转移阻抗参数为:

$$Z_{MN1}=Z_{MN2}=34.2 \angle 80^\circ,$$

$$Z_{MN0}=287.2 \angle 80^\circ,$$

M侧系统阻抗的基本参数为:

$$Z_{M1}=Z_{M2}=4.62 \angle 80^\circ,$$

$$Z_{M0}=3.89 \angle 80^\circ,$$

N侧系统阻抗的基本参数为:

$$Z_{N1}=Z_{N2}=6.61 \angle 80^\circ,$$

$$Z_{N0}=8.87 \angle 80^\circ,$$

不妨首先考察线路长度的变化对线路M侧零、负序电压的影响。图10和图11分别取线路长度为50 km、75 km、100 km、125 km及150 km时线路中点与线路末端金属性短路的M侧零序电压和负序电压的仿真数据。

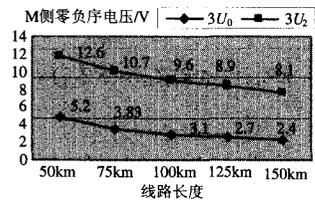


图10 线路中点金属性接地时M侧零序电压与线路长度的关系

Fig.10 The relationship between line length with sequence voltage when fault occurred at the line mid-point

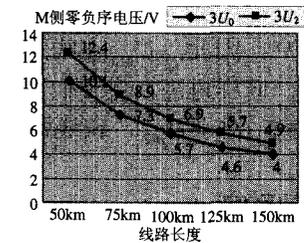


图11 线路末端金属性接地时M侧零序电压与线路长度的关系

Fig.11 Relationship between line length with sequence voltage when fault occurred at the line end-point

仿真数据表明,当线路长度增加时,M侧 $3U_0$ 与 $3U_2$ 均同步下降,但零序电压下降的更快。表明对于系统阻抗较小的厂站,长距离出线对零序方向元件是很不利的。

其次考察故障点位置对M侧 $3U_0$ 和 $3U_2$ 的影响。图3选取线路长150 km, 距离M侧20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%及100%处经20 Ω 过渡电阻接地短路的情况。

仿真数据证明, 当线路距离M侧越远时, M侧 $3U_0$ 与 $3U_2$ 越小。因此, 线路末端故障对于零、负序方向元件来说都是最为恶劣的。仿真数据还表明, 当M侧末端故障时, M侧 $3U_0$ 已不足1 V, 而 $3U_2$ 仍有2.4 V。这一数据与距M侧20%处故障相比, $3U_0$ 下降了87.4%, 而 $3U_2$ 仅下降了61.3%。由此可见, 负序方向元件较零序方向元件有着更好的灵敏度。

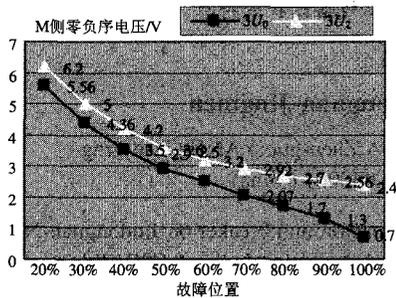


图12 经20 Ω 单相接地M侧零负序电压与故障点的关系

Fig.12 Relationship between fault point with sequence voltage

继续考察过渡电阻对M侧 $3U_0$ 与 $3U_2$ 的影响。表1选取了线路长度为150 km的M侧末端金属性单相接地与经15 Ω 、20 Ω 、35 Ω 及50 Ω 过渡电阻单相接地短路的情况。

表1 线路末端接地时M侧零负序电压与过渡电阻的关系

Tab.1 The relationship between fault resistance with sequence voltage

过渡电阻	M侧 $3U_0/V$	M侧 $3U_2/V$	M侧零序电流/A
0	2.44	8.48	950
15	0.95	3.23	300
20	0.69	2.37	250
35	0.40	1.45	145
50	0.31	1.10	100

仿真数据表明, 当M侧末端经50 Ω 接地短路时, M侧 $3U_2$ 仍有1.10 V, 而 $3U_0$ 仅0.31 V。此时流过M侧保护的 $3I_0$ 仅100 A。而满足M侧 $3I_0$ 达到300 A的线路末端经15 Ω 单相接地短路, M侧 $3U_2$ 仍有3.23 V, 而零压仅0.95 V, 零序功率方向不能动作。显然, 此时负序方向元件可以满足灵敏度要求。

由于篇幅所限, 本文无法将其它工况一一列出。从仿真结果来看, 由补偿电压故障分量的方向

判据综合构成的保护方案具有灵敏度高、耐受过渡电阻能力强、能可靠地反映各种故障工况、在暂态干扰与零负序电流反向穿越时不会误动等优点, 是一种比较理想的纵联保护方案。

6 基于负序分量补偿的纵联零序方向判据的基本特点

基于负序分量补偿的纵联零序方向判据与传统零序方向判据相比, 在处理接地故障时既有共同的特点, 又存在各自相异的特征如下:

- (1) 能在零序分量明显的情况下快速动作, 切除故障, 没有降低原有判据的动作速度。
- (2) 在 $3U_0$ 低于电压门槛的情况下, 启动负序方向元件, 利用负序分量参与判别。
- (3) 负序方向元件具有很强的灵敏度, 有效地降低了保护对系统阻抗的要求, 提高了抗过渡电阻的能力。
- (4) 在保证负序反方向元件较正方向元件灵敏的同时, 进一步采用判别零负序电流相位的手段, 避免区外故障时保护误动。
- (5) 考虑了负序方向元件在暂态特性上存在的缺陷, 通过判别电流突变情况与延时出口等双重措施, 在不提高系统稳定风险和不牺牲选择性的前提下, 有效地提高可靠性。
- (6) 当非全相运行时, 保护将测量到零序、负序分量, 此时零序、负序方向元件必须退出运行, 以避免错误判别故障方向。

7 结论

本文提出了一种新的基于负序分量补偿的纵联接地保护方案, 在故障时投入负序反方向元件, 并根据零序电压的大小, 有选择地投入负序正方向元件, 通过比较负序方向及零、负序电流的相位, 判别故障方向。实例验算及RTDS均表明, 该方案具有简单直观、抗过渡电阻能力强及易于实现等优点。

参考文献

- [1] 丁晓兵, 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(9): 88-90.
DING Xiao-bing, ZHAO Man-yong, XU Zhen-yu. Improvement on Zero Sequence Current Protection When Directional Element Fails to Operate During Earth Faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 88-90.

(下转第76页 continued on page 76)

比值关系不单一，情况比较复杂。即在曲线拐点之后，灵敏性不能与拐点前保持一致。所以，比率差动保护的灵敏度不仅与曲线斜率有关，还与最小动作电流和最小制动电流的选取有密切的关系，不能一味地靠降低曲线斜率来提高差动保护的灵敏度。

5 结论

通过上述三个方面问题的分析，我们可以知道，比率差动保护的最小动作电流、最小制动电流、制动曲线斜率和制动系数等几个参数互相影响。制动系数与制动曲线斜率不是一回事，有些时候认为是一样的，则默认的前提是承认了 $I_{op,0} = SI_{res,0}$ 的条件；制动系数的选择关系区外故障的安全性和区内故障的灵敏性，受饱和和电流互感器误差和流出电流的制约，同时也受 $I_{op,0}$ 与 $SI_{res,0}$ 比值的影响，在整个动作区灵敏性能否保持一致，也与 $I_{op,0}$ 和 $SI_{res,0}$ 的比值有关。

因此，在整定计算时，必须对它们之间的关系给予重视，注意区外故障的安全性也要提高区内故障的灵敏性，必要时还要保证在整个动作区灵敏性的一致性。整定最小动作电流 $I_{op,0}$ 时，应尽量减小之， Δu 和 Δm 在微机保护中采用平衡系数来调整的情况下，可认为已接近 0，正常运行的不平衡电流主要是由电流互感器的误差造成的，因此力争改善差动保护用电流互感器的暂态特性（采用 TP 级互感器），保持各侧电流互感器静态特性的一致性（各侧电流互感器二次负载的阻抗匹配，饱和特性的接近），将可减小 K_{aper} 和 K_{er} 的影响，使动作电流减小，但应注意与 $SI_{res,0}$ 大小和制动曲线斜率 S 的配合。最小制动电流的选择也应引起重视，拐点的位置对制动系数影响很大，位置越靠近原点，越容易

整定出理想的动作边界特性。实际使用中最小制动电流一般由软件在程序中固定，所以整定时应先选定拐点后在此基础上选一条制动曲线斜率 S ，最后验算最小动作电流、最小制动电流及制动系数和灵敏性，以期得到较理想的比率制动动作特性曲线。实际运行中，有些区外故障导致差动保护误动的的原因，很大程度上就是上述几个参数没有配合好造成的。

参考文献

[1] 许正亚. 变压器及中低压网络数字式保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.

[2] 朱声石. 数字式比率差动继电器的通用特性[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 6-9.
ZHU Sheng-shi. General Characteristics of Digital Percentage Differential Relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(6): 6-9.

[3] 陆于平等. 差动保护灵敏度与启动电流、制动系数和原理之间的关系[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 51-55.
LU Yu-ping. Discussion on Relationship of Pick-up Current Restrained Actor and Principles to the Differential Protection Sensitivity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 51-55.

[4] 李天华等. 变压器比率制动差动保护的整定特性分析和反事故措施[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(8): 44-47.
LI Tian-hua, et al. Analysis and Improvement of Setting Characteristics for Transformer Percentage Differential Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(8): 44-47.

收稿日期: 2008-02-26; 修回日期: 2008-04-23

作者简介:

代家鹏 (1972-), 男, 讲师, 从事继电保护及自动装置原理的教学培训和试验工作. E-mail: daijiapeng3322@sina.com

(上接第 23 页 continued from page 23)

[2] 唐绪峰, 代凤鸣. 故障分量负序方向保护算法的改进[J]. 继电器, 2002, 30(1): 64-65.
TANG Xu-feng, DAI Feng-ming. An Improvement of Algorithm for Fault Component Negative-sequence Directional Protection[J]. Relay, 2002, 30(1): 64-65.

[3] 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 Ben-teng, LI Yi-quan. Research of CVT's Influence on Zero-sequence(negative-sequence) Direction Protection[J]. Relay, 2006, 34(9): 1-4.

[4] 金全仁, 杨智德, 张学深. 故障分量负序方向元件若干问题的研究[J]. 继电器, 2000, 30(1): 64-65.
JIN Quan-ren, YANG Zhi-de, ZHANG Xue-shen. Study on Negative Sequence Directional Protection Against Fault Component[J]. Relay, 2000, 30(1): 64-65.

[5] 焦邵华, 刘万顺. 高精度快速负序算法的研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(21): 45-48.
JIAO Shao-hua, LIU Wan-shun. Study on Fast Negative Sequence Algorithm with High Precision[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(21): 45-48.

收稿日期: 2008-05-23

作者简介:

张弛 (1978-), 男, 硕士, 从事继电保护专业工作;
E-mail: google@21cn.net
李一泉 (1979-), 男, 博士, 研究方向为电力系统继电保护与自动控制等;
曾耿晖 (1977-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护运行与控制等。