

利用线路两端电压差的输电线路相位纵联保护

夏经德, 索南加乐, 何世恩, 王莉, 刘凯, 邓旭阳
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 提出了一种基于线路两端电压差的输电线路相位纵联保护. 根据分相阻抗的相角特性, 相位值是由线路各相两个等效电压故障分量差的比值计算而来的, 利用这个比值的相位判断故障是否发生在保护区内. 当比值的相位等于 0° 时表明为区外故障, 当比值的相位等于 180° 时表明为区内故障. 该保护动作灵敏、适应性强, 具备较强的抵御线路电容的特性, 可不经补偿, 直接运用于绝大多数输电线路的纵联保护中, 同时可有效抵御区外故障时电流互感器(TA)饱和的影响. EMTP数字仿真和动模仿真结果验证了该保护的有效性.

关键词: 输电线路; 故障分量; 相位纵联保护; 相位值

中图分类号: TM77 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)08-0083-07

Phase Pilot Protection of Transmission Line Based on Voltage Difference Between Both Terminals

XIA Jingde, SUONAN Jiale, HE Shi'en, WANG Li, Liu Kai, DENG Xuyang
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A phase pilot protection of transmission line based on the voltage difference between both terminals is proposed. According to the angle characteristics of the individual phase impedance, the phase value is evaluated by the ratio of the two equivalent differences of the fault-superimposed components of voltage at each phase of the line, then whether the fault occurred in the protected region is judged. When the phase values just equal to 0° , the fault appears outside of the protected zone, and the fault is inside of the protected zone when they equal to 180° . The proposed protection with identity of sensitive operation and adaptation is capable of resisting the line capacitors, and can be directly used in pilot protections of most transmission lines without compensation. The EMTP simulation and the dynamic simulation show the effectiveness.

Keywords: transmission line; fault component; phase pilot protection; phase value

在过去的几十年里, 方向比较纵联保护得到了充分的改进和发展, 并且已成为各种电压等级输电线路最常采用的保护方式之一^[1]. 尽管基于故障分量的电流向量差动保护具有许多优点^[1], 但其应用于输电线路时仍然面临着下列几个问题: ①区外故障时电流互感器(TA)饱和^[2]的影响; ②超高压长线分布电容的影响^[3]; ③暂态信号的影响. 上述问题严重地影响着保护的快速性和灵敏性.

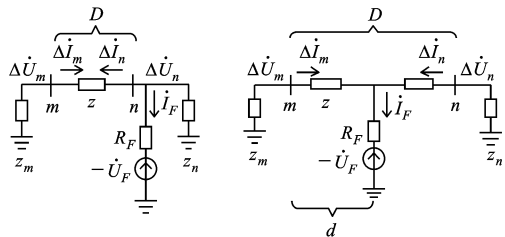
本文根据输电线路故障附加网络和零序网络的

电气特性, 以线路两端经零序电压补偿后各相电压故障分量差所具有的特性, 引入了线路各相两组等效电压故障分量差的比值, 并按照这两个等效电压故障分量差比值的相位值在线路发生故障时的特性, 构建了输电线路分相的相位纵联保护. 发生故障时, 以各相电流故障分量相量和的模数作为纵联保护装置的启动量. 该保护的主要成果来源于分相复合阻抗输电线路纵联保护原理^[4-5], 具备较强的抵御并联电容电流的能力, 可不经补偿, 直接运用于绝

大多数输电线路的纵联保护中,同时可有效抵御区外故障 TA 饱和的影响. EMTP 数字仿真和动模仿真验证了它的有效性,可成为未来输电线路纵联保护的一种新形式.

1 单相线路下的相位

基于 $R-L$ 线路集中参数模型下,单相故障附加网络见图 1.



(a) 区外故障

(b) 区内故障

Z_m, Z_n : 两端区外等效系统阻抗; z : 单位长度线路阻抗;

D : 线路全长; d : 故障距离(距 m 端); $\dot{U}_F, \dot{I}_F, R_F$: 故障点等效附加电压、电流、故障电阻

图 1 单相故障附加网络

1.1 区外故障

当发生区外故障时,线路两端的电压故障分量差就是线路全长电压故障分量的压降,该数值稳定可靠,且物理定义明确^[4]

$$\Delta \dot{I}_{op} = \Delta \dot{I}_m + \Delta \dot{I}_n = 0 \quad (1)$$

将线路两端电压故障分量的测量点同步地向 m 的反方向平移距离 D ,代入式(1),可得

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}'_{op} &= \Delta \dot{U}'_m - \Delta \dot{U}'_n = (\Delta \dot{U}_m + zD\Delta \dot{I}_m) - \\ &(\Delta \dot{U}_n - zD\Delta \dot{I}_n) = \Delta \dot{U}_m - \Delta \dot{U}_n + zD\Delta \dot{I}_{op} = \Delta \dot{U}_{op} \end{aligned} \quad (2)$$

将线路两端电压故障分量的测量点同步地向 m 的正方向平移上述同样的距离 D ,同样可得

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}''_{op} &= \Delta \dot{U}''_m - \Delta \dot{U}''_n = (\Delta \dot{U}_m - zD\Delta \dot{I}_m) - \\ &(\Delta \dot{U}_n + zD\Delta \dot{I}_n) = \Delta \dot{U}_m - \Delta \dot{U}_n - zD\Delta \dot{I}_{op} = \Delta \dot{U}_{op} \end{aligned} \quad (3)$$

图 2 显示平移前后各电压故障分量的物理位置,根据式(2)和式(3),可得

$$|\Delta \dot{U}_{op}| > |zD\Delta \dot{I}_{op}| \quad (4)$$

$$\arg K_u = \arg(\Delta \dot{U}'_{op}/\Delta \dot{U}''_{op}) = 0^\circ \quad (5)$$

当线路发生区外故障时,以选定的线路全长距离向 m 端的正方向和反方向两侧平移后,得到两组等效电压相除,其相位为 0° .

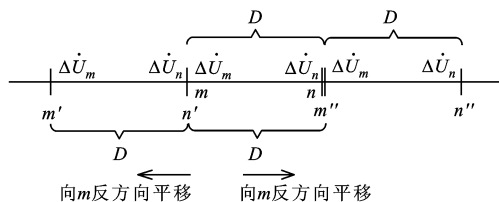


图 2 平移前后各电压故障分量的物理位置

1.2 区内故障

当发生区内故障时,有

$$\Delta \dot{I}_{op} = \Delta \dot{I}_m + \Delta \dot{I}_n = \dot{I}_F \quad (6)$$

线路两侧的电压故障分量可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_m &= -\dot{U}_F \frac{Z_m}{Z_m + zd} \\ \Delta \dot{U}_n &= -\dot{U}_F \frac{Z_n}{Z_n + z(D-d)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

故障点的故障电流可以表示为

$$\dot{I}_F = -\dot{U}_F \frac{Z_m + zD + Z_n}{(Z_m + zd)(Z_n + z(D-d))} \quad (8)$$

因此在发生区内故障时,电压故障分量差的幅值为

$$\begin{aligned} |\Delta \dot{U}_{op}| &= \\ \left| z \frac{(Z_m(D-d) - Z_nd)}{Z_m + zD + Z_n} \Delta \dot{I}_{op} \right| &< |zD\Delta \dot{I}_{op}| \end{aligned} \quad (9)$$

根据式(9)计算结果,当以线路全长分别向 m 端的正方向和反方向平移时,所得等效电压故障分量差比值的相位为

$$\arg K_u = \arg \frac{\Delta \dot{U}'_{op}}{\Delta \dot{U}''_{op}} = \arg \frac{\Delta \dot{U}_{op} + zD\Delta \dot{I}_{op}}{\Delta \dot{U}_{op} - zD\Delta \dot{I}_{op}} = 180^\circ \quad (10)$$

当线路发生区内故障时,获得的比值的相位将保证始终为 180° .

2 性能分析

2.1 抵御并联电容电流的能力

在长距离输电线路继电保护的整定中需考虑并联电容电流的影响,图 3 为区外故障时带并联电容的单相故障附加网络. 电流故障分量的相量和为

$$\Delta \dot{I}_{op} = \Delta \dot{I}_{nC} + \Delta \dot{I}_C = (\Delta \dot{U}_m + \Delta \dot{U}_n)/Z_C \quad (11)$$

式中: $Z_C = 2/j\omega cD$. 以 $\Delta \dot{U}_n$ 为参考量, $\Delta \dot{U}_m$ 可表示为

$$\Delta \dot{U}_m = \Delta \dot{U}_n Z'_m / (zD + Z'_m) \quad (12)$$

$$Z'_m = Z_m Z_C / (Z_m + Z_C) \quad (13)$$

为了定性分析并联电容电流对于相位的影响,

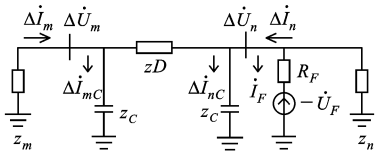


图 3 区外故障时带并联电容的单相故障附加网络

特设下列条件

$$\arg Z_m = \arg Z_n = \arg z = 90^\circ \tag{14}$$

将式(13)和(14)代入式(2)和(3),分别得

$$\Delta \dot{U}_{op} = -zD \Delta \dot{U}_n / (Z'_m + zD) \tag{15}$$

$$\Delta \dot{U}'_{op} = \Delta \dot{U}_{op} (1 - K_C); \Delta \dot{U}''_{op} = \Delta \dot{U}_{op} (1 + K_C) \tag{16}$$

式中: $K_C = (2Z'_m + zD) / Z_C$. 将式(16)带入式(5),可得发生区外故障时

$$\arg K_u = \arg \frac{\Delta \dot{U}'_{op}}{\Delta \dot{U}''_{op}} = \arg \frac{1 - K_C}{1 + K_C} \tag{17}$$

只有当 $|K_C| < 1$ 时,相位才能确保和在区内故障时有明确的分界,这个条件必须得到满足. 以 1 000 kV、500 km 线路为例,可分别计算得到

$$Z_C = 2/j\omega cD \approx -j909 \Omega; zD = 129.63 \Omega \angle 88^\circ \tag{18}$$

将式(18)代入式(15)、(16),若系统的等效阻抗满足

$$|Z_m| < 272 \Omega \tag{19}$$

就可满足式(17)所设条件. 该阻抗可表示为系统的短路容量,按运行方式,短路容量不得小于传输的自然功率. 自然功率受制于线路的特征阻抗,上述线路的特征阻抗为

$$|Z_T| \approx |(l/c)^{1/2}| \approx 243 \Omega \tag{20}$$

由于式(19)中阻抗限制大于式(20)特征阻抗,因此在满足线路各种运行方式下系统等效阻抗都满足式(19)条件. 短距离线路更容易满足上述条件.

当系统阻抗不能满足式(19)时,说明该侧的系统状态不能满足系统最小运行方式的要求,其短路电流必然非常小,因此可设置合适的保护启动门槛屏蔽之.

2.2 抵御 TA 饱和的能力

在发生区外故障时,经常会造成电源侧 TA 饱和. TA 饱和使得饱和侧 TA 二次绕组上所得的电流故障分量较理论值有所减小,增加了电流差动的不平衡量. 随着饱和程度的加重,不平衡量也将增加,使得式(4)左边部分的数值也相应增加,通过改变比值的数值可最终改变其相位. 本文只涉及线路

单端 TA 出现饱和的情况.

为便于定性分析 TA 饱和对电流工频故障分量的影响,将 TA 饱和所造成的衰减损耗只单纯反映在导通角 φ_x 上,忽略不计饱和后残存的衰减,或换算为对导通角的修正上,见图 4.

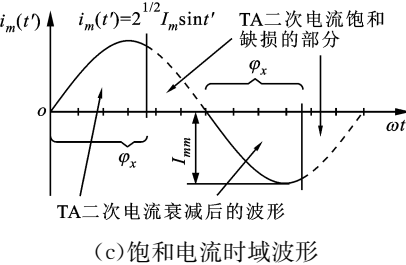
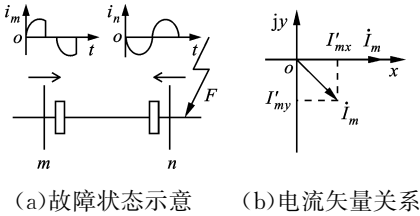


图 4 TA 饱和后故障和电流故障分量状态示意图

在图 4 中,线路在 n 端区外发生故障,使电源侧 m 端 TA 发生饱和,可以假设在不饱和的情况下 m 端 TA 二次绕组理想电流为

$$i_m(t') = 2^{1/2} I_m \sin t' \tag{21}$$

$$\Delta \dot{I}_m = I_m \angle 0^\circ \tag{22}$$

式中: $t' = \omega t + \varphi_0$; ω 为系统角频率; φ_0 为时域电流故障分量的初始角.

可根据傅里叶变换求得 TA 饱和后电流故障分量的相量表达,在图 4b 中 TA 饱和后电流工频故障分量在实轴和虚轴的投影分别表示为

$$I'_{mx} = \frac{2^{1/2} I_m}{\pi} \int_0^{\varphi_x} i_m(t') \sin t' dt' = \frac{I_m}{\pi} \left(\varphi_x - \frac{\sin 2\varphi_x}{2} \right) \tag{23}$$

$$I'_{my} = \frac{2^{1/2} I_m}{\pi} \int_0^{\varphi_x} i_m(t') \cos t' dt' = \frac{I_m}{\pi} \left(\frac{1 - \cos 2\varphi_x}{2} \right) \tag{24}$$

将导通角的变化范围设定为 $\varphi_x: \pi \rightarrow 0$, I'_{mx} 随导通角的减小而单调减小, I'_{my} 在导通角变化范围内为有限值,其中绝对值最大在 $\varphi_x = \pi/2$ 处,此时可得电流在实轴和虚轴的投影分别为

$$I'_{mx} = I_m/2; I'_{my} = I_m/\pi \tag{25}$$

因此可得到此角度下电流工频故障分量的相量表达形式为

$$\Delta \dot{I}'_m = I'_{mx} + jI'_{my} \approx 0.59 I_m \angle 32^\circ \tag{26}$$

由于 TA 发生饱和, $\Delta \dot{I}_m$ 衰减后成为 $\Delta \dot{I}'_m$, 将式(26)代入式(1), 可得电流的相量和为

$$\Delta \dot{I}_{op} = \Delta \dot{I}'_m + \Delta \dot{I}_n = \Delta \dot{I}'_m - \Delta \dot{I}_m \approx 0.59 I_m \angle 148^\circ \quad (27)$$

将式(27)代入式(5), 可得

$$\arg K_u = \arg \frac{\Delta \dot{U}'_{op}}{\Delta \dot{U}''_{op}} = \arg \frac{I_m/2 - jI_m/\pi}{3I_m/2 + jI_m/\pi} \approx -44^\circ \quad (28)$$

式(28)和式(10)的结果之间仍保留有充分的分辨余量. 在极端状态下, 设 TA 饱和达到极限

$$|\Delta \dot{I}'_m| \rightarrow 0 \quad (29)$$

将式(29)代入式(27), 此时的不平衡量为

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{I}_{op} &= \Delta \dot{I}'_m + \Delta \dot{I}_n \rightarrow -\Delta \dot{I}_m \approx I_m \angle 180^\circ \\ |\Delta \dot{U}_{op}| &= |zD\Delta \dot{I}_n| > |zD\Delta \dot{I}_{op}| \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

根据式(30), 在极端的情况下

$$\left. \begin{aligned} \arg K_u &= \arg \frac{\Delta \dot{U}'_{op}}{\Delta \dot{U}''_{op}} \rightarrow \arg \frac{\Delta \dot{U}_{op} - zDI_m}{\Delta \dot{U}_{op} + zDI_m} \\ -90^\circ &\leq \arg K_u \leq 90^\circ \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

由此可知, 无论 TA 饱和程度如何, 也丝毫不会影响利用相位对各类故障进行准确的判断.

当发生区内故障时, 同样可能产生 TA 饱和. 假设在上述系统中发生 m 端区内出口故障, 其饱和也达到了极限, 如式(29), 根据图 1, 仍可以得到

$$|\Delta \dot{U}_{op}| \leq |zD\Delta \dot{I}_n| < |zD\Delta \dot{I}_{op}| \quad (32)$$

将式(32)带入式(10), 可得

$$\left. \begin{aligned} \arg K_u &= \arg \frac{\Delta \dot{U}'_{op}}{\Delta \dot{U}''_{op}} \rightarrow \arg \frac{\Delta \dot{U}_{op} + zD\Delta \dot{I}_n}{\Delta \dot{U}_{op} - zD\Delta \dot{I}_n} \\ -90^\circ &\geq \arg K_u \geq 90^\circ \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

在发生区内故障时, 无论 TA 饱和到何种程度, 只会对其灵敏度产生一定的影响, 都不会影响到对故障的分辨.

2.3 算法的性能和特点

(1) 等效电压故障分量比值的相位在发生区外故障时为 0° , 在区内故障时为 180° , 故障识别的裕度角大.

(2) 算法抗线路电容能力强, 可不经补偿运用于 500 km 以下的输电线路, 性能优于电流差动保护.

(3) 算法可以抗任意程度的 TA 饱和, 因此性能优于故障分量相量差动保护, 更优于采样值差动保护.

(4) 由于建立起线路两端电气量之间的物理联系, 因此其稳定性和可靠性强于方向比较纵联保护.

(5) 该纵联保护电流故障分量相量和只起到启动保护作用, 可取非常小的门槛值, 因此灵敏度也强于相量差动保护, 更优于采样值差动保护.

(6) 由于其相位值取决于分式中幅值最大项的相位, 其他项幅值相比都较小, 对比值相位的影响有限, 因此该保护速度快.

(7) 算法需要数据量大, 对通信信道压力大, 必须建立在输电线路光纤纵联保护的基础上.

(8) 算法计算公式相对电流差动保护或方向比较纵联保护略为复杂些.

3 三相线路下的相位数值及其纵联保护

针对三相线路模型也可以得到上述相同的结论, 其中的三相故障附加网络和零序网络及电气符号参见文献[5]. 三相线路中各相线路两端电压故障分量差可表示为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{op\varphi} &= \Delta \dot{U}_{m\varphi} - \Delta \dot{U}_{n\varphi} = \\ \Delta \dot{I}_{m\varphi} z_1 d - \Delta \dot{I}_{n\varphi} z_1 (D-d) \end{aligned} \quad (34)$$

式中: $\Delta \dot{I}_{m\varphi} = \Delta \dot{I}_{m\varphi} + 3K \dot{I}_{m0}$, $K = (z_0 - z_1)/3z_1$; $\Delta \dot{I}_{n\varphi} = \Delta \dot{I}_{n\varphi} + 3K \dot{I}_{n0}$; φ 为 a 相、b 相、c 相.

由文献[5]的零序网络可得零序电压和零序电流的关系为

$$\dot{U}_{op0} = \dot{U}_{m0} - \dot{U}_{n0} = \dot{I}_{m0} z_0 d - \dot{I}_{n0} z_0 (D-d) \quad (35)$$

针对在三相电路中遇到不平衡接地故障时所产生的相间耦合, 将式(34)中的零序电流用式(35)中的零序电压代替, 整理后为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{op\varphi} &= \Delta \dot{U}_{m\varphi} - \Delta \dot{U}_{n\varphi} = \\ \Delta \dot{I}_{m\varphi} z_1 d - \Delta \dot{I}_{n\varphi} z_1 (D-d) \end{aligned} \quad (36)$$

式中: $\dot{U}_{m\varphi} = \Delta \dot{U}_{m\varphi} - 3Z_m \dot{U}_{m0}/Z_0$; $\Delta \dot{U}_{n\varphi} = \Delta \dot{U}_{n\varphi} - 3Z_m \dot{U}_{n0}/Z_0$.

针对健全相(b相), 式(36)可表示为

$$\Delta \dot{U}_{opb} = (\Delta \dot{I}_{mb} - \Delta \dot{I}_{nb}) z_1 D/2 \quad (37)$$

这样, 基于三相线路模型下健全相的电压故障分量差和基于单相线路模型下区外故障时的电压故障分量差一样, 都具有完全相同的表达形式. 根据式(35)可构建简化的通用相故障附加电路, 见图 5. 上述单位长度线路的阻抗就是单位长度线路正序阻抗.

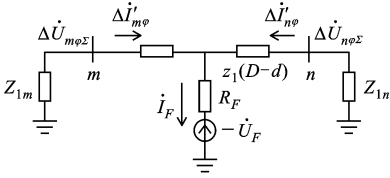


图 5 通用故障相电路模型

基于等效电压故障分量差比值的纵联保护由两个计算项组成

$$|\Delta \dot{I}_{m\varphi} + \Delta \dot{I}_{n\varphi}| > I_{\text{set}}$$
$$|\arg K_{u\varphi}| = \left| \arg \frac{\Delta \dot{U}'_{\text{op}\varphi\Sigma}}{\Delta \dot{U}''_{\text{op}\varphi\Sigma}} \right| > 90^\circ$$

(38)

式中： $\dot{I}_{\text{op}\varphi} = \Delta \dot{I}_{m\varphi} + \Delta \dot{I}_{n\varphi}$ ； $\dot{U}'_{\text{op}\varphi} = \Delta \dot{U}_{\text{op}\varphi} + zD\Delta \dot{I}_{\text{op}\varphi}$ ； $\dot{U}''_{\text{op}\varphi} = \Delta \dot{U}_{\text{op}\varphi} - zD\Delta \dot{I}_{\text{op}\varphi}$ 。在纵联保护中利用各相电流故障分量相量和的模数作为启动单元， I_{set} 作为保护动作的最小启动量门槛，应保证能躲过在发生区外故障时所产生的不平衡电流及其影响， I_{set} 可固定地取为 0.1 A(二次侧电流)。当其相位大于 90° 时，必为区内故障，线路两侧保护同时动作；否则为区外故障，保护可靠不动。纵联保护内部故障判别流程如图 6 所示。

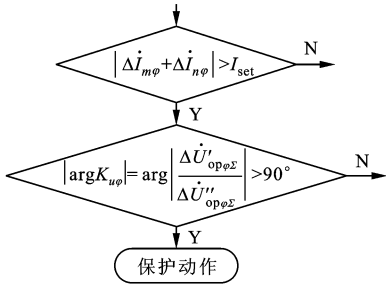


图 6 纵联保护内部故障判别流程

4 仿真验证

在 EMTP 仿真系统中，线路均采用的是分布参数模型，长距离线路电压为 1 000 kV，短距离线路

电压为 500 kV。在动模仿真中系统的额定电压为 750 kV。

4.1 EMTP 数字仿真

仿真中的长距离线路参数和故障电阻参见文献[5]，TA 饱和短距离线路参数和故障电阻参见文献[4]。TA 饱和长距离线路参数 D 为 50 km， E_{sm} 为 525 kV， f 为 50 Hz， θ_m 为 0° ， L_{1m} 为 71.9 mH， L_{0m} 为 37 mH。 E_{sn} 为 500 kV， f 为 50 Hz， θ_n 为 -10° ，其余参数同文献[4]。

故障位置参见文献[5]。仿真结果见表 1～表 4。表 3 和表 4 中对照数据为电流故障分量差动量与比例制动量的比值，具体计算公式如下

$$K_{I\varphi} = |\Delta \dot{I}_{m\varphi} + \Delta \dot{I}_{n\varphi}| / 0.5(|\Delta \dot{I}_{m\varphi}| + |\Delta \dot{I}_{n\varphi}|)$$
$$K_{I\varphi}^N = \frac{\sum_{k=1}^{N=25} (|\Delta i_{m\varphi}(k)| + |\Delta i_{n\varphi}(k)|)}{\sum_{k=1}^{N=25} (|\Delta i_{m\varphi}(k)| + |\Delta i_{n\varphi}(k)|) / 2}$$

(39)

式中： $\Delta i_{m\varphi}(k)$ 、 $\Delta i_{n\varphi}(k)$ 为线路两端电流故障分量瞬时采样值。

在短距离线路保护中，数据采样频率为 2 500 Hz，其幅值为故障发生 TA 饱和后连续 25 个点(半个周波)的平均值。故障及 TA 饱和位置见图 4。

4.2 动模仿真

动模仿真中的线路模型参数和发电机参数参见文献[5]，仿真结果见表 5。

图 7 为兰州东—咸阳 750 kV 长距离输电系统模拟接线图，故障位置也见图 7。对仿真结果分析如下。

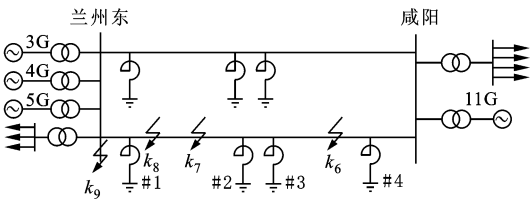


图 7 兰州东—咸阳 750 kV 长距离输电系统模拟接线图

表 1 长距离线路的 EMTP 仿真结果

故障位置	AG 故障				ABC 故障			
	$R_F=0\ \Omega$		$R_F=500\ \Omega$		$R_F=0\ \Omega$			
	$\arg K_{ua}/(^{\circ})$	保护动作	$\arg K_{ua}/(^{\circ})$	保护动作	$\arg K_{ua}/(^{\circ})$	$\arg K_{ub}/(^{\circ})$	$\arg K_{uc}/(^{\circ})$	保护动作
k_1	-2	×	-3	×	-2	-1	-1	×
k_2	180	✓	180	✓	-179	-179	-179	✓
k_3	180	✓	180	✓	180	180	180	✓
k_4	178	✓	178	✓	179	179	179	✓
k_5	1	×	1	×	0	0	0	×

表 2 长距离线路 a 相接地时 3 种方法的仿真结果比较

故障位置	$R_F=0\ \Omega$			$R_F=500\ \Omega$		
	$\arg K_{ua}/(^{\circ})$	K_{Ia}	K_{Ia}^N	$\arg K_{ua}/(^{\circ})$	K_{Ia}	K_{Ia}^N
k_1	21	0.44	0.47	35	0.64	0.68
k_2	178	2.00	1.94	177	2.00	1.98
k_3	179	2.00	1.96	178	2.00	1.98
k_4	177	2.00	1.98	174	2.00	1.98
k_5	10	0.26	0.27	7	0.33	0.34

表 3 m 端 TA 饱和时短距离线路的 EMTP 仿真结果

序号	$R_F=0\ \Omega$		$R_F=300\ \Omega$	
	$\arg K_{ua}/(^{\circ})$	K_{Ia}	$\arg K_{ua}/(^{\circ})$	K_{Ia}
1	6	0.06	5	0.04
2	8	0.08	6	0.05
3	17	0.20	6	0.06
4	22	0.32	6	0.07
5	24	0.40	8	0.08
6	25	0.46	8	0.08
7	26	0.54	9	0.09
8	27	0.60	10	0.10
9	27	0.66	10	0.10
10	27	0.72	11	0.11
11	27	0.76	11	0.12
12	28	0.80	12	0.13

注:故障类型为 AG,故障位置为 k_5 .

表 4 m 端 TA 饱和时长距离线路的 EMTP 仿真结果

序号	$R_F=0\ \Omega$		$R_F=300\ \Omega$	
	$\arg K_{ua}/(^{\circ})$	K_{Ia}	$\arg K_{ua}/(^{\circ})$	K_{Ia}
1	179	1.99	176	2.00
2	179	1.97	176	2.00
3	179	1.95	176	2.00
4	179	1.93	176	2.00
5	179	1.92	176	2.00
6	179	1.90	176	2.00
7	179	1.89	176	2.00
8	179	1.87	176	2.00
9	179	1.85	176	2.00
10	179	1.83	176	2.00
11	179	1.81	176	2.00
12	179	1.79	176	1.99

注:故障类型为 AG,故障位置为 k_2 .

表 5 动模仿真结果

故障位置	故障类型	R_F/Ω	$\arg K_{up}/(^{\circ})$			保护动作		
			a	b	c	a	b	c
k_6	BG	400	75	180	89	×	✓	×
k_7	ABC	0	179	178	179	✓	✓	✓
k_7	AG	400	181	6	9	✓	×	×
k_7	BC	0	−8	178	179	×	✓	✓
k_8	AG	0	180	−1	0	✓	×	×
k_9	BCG	0	0	0	0	×	×	×
k_9	BC	0	−4	0	0	×	×	×

(1)发生区外故障时,电压故障分量差的比值的相位都落在 0° 附近,保护可靠不动.

(2)当发生区内故障时,电压故障分量差的比值

的相位落在 180° 附近,保护可靠并正确动作.

(3)该保护不受分布电容电流影响,相位基本稳定可靠,说明保护可用于现有各线路上.

(4)无论是发生区内还是在区外故障,TA饱和只能增加电流故障分量和的不平衡量,因为保护抗TA饱和的能力相对较强。

(5)从表2可知,本文方法好于相量差动保护,更好于采样值差动保护。

(6)从表4可知,发生区内故障可不考虑TA饱和的影响。

5 结 论

提出了一种基于电压故障分量差下输电线路分相的相位纵联保护。理论分析和仿真结果表明,当发生区外故障时,电压故障分量差比值的相位会准确落在 0° 附近,从而保证上述分相的相位纵联保护的可靠性。当发生区内故障时,电压故障分量差比值的相位会准确落在 180° 附近,故障特征明显,保证上述分相的相位纵联保护选择的灵敏性。该保护数值稳定、结构简单、整定容易,由于采用分相保护原理,具有自选相功能,动作灵敏,抗故障电阻、分布电容和TA饱和能力强,适合各种复杂运行环境。EMTP仿真结果和动模仿真验证了该保护的有效性。

参考文献:

- [1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社, 2007: 63-106.
- [2] 吴大立, 尹项根, 张哲, 等. 输电线路复合差动保护方案[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 87-91.
WU Dali, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Research on multi-differential protection scheme for transmission line [J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 87-91.
- [3] 苗世洪, 刘沛, 程时杰, 等. 750kV输电线路相差保护中的电容电流补偿问题仿真研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 54-60.
MIAO Shihong, LIU Pei, CHENG Shijie, et al. Research and simulation of capacitance current compensating countermeasure for phase differential protection of 750 kV transmission lines [J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 54-60.
- [4] 索南加乐, 夏经德, 阿里木江·卡德尔, 等. 输电线路分相复合阻抗纵联保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 80-86.

SUONAN Jiale, XIA Jingde, ALIMJAN Kader, et al. A novel transmission line pilot protection principle based on composite impedance of individual phase [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 80-86.

- [5] 索南加乐, 夏经德, 焦在滨, 等. 故障全量的分相复合阻抗输电线路纵联保护原理[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(2): 92-97.

SUONAN Jiale, XIA Jingde, JIAO Zaibin, et al. Transmission line pilot protection principle of fault total content based on composite impedance of individual phase [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(2): 92-97.

[本刊相关文献链接]

- 交直流混联系统对距离保护暂态超越的影响及解决措施. 西安交通大学学报, 2010, 44(4): 57-61.
- 故障全量的分相复合阻抗输电线路纵联保护原理. 西安交通大学学报, 2010, 44(2): 92-97.
- 基于模型识别的平行线路零序方向元件. 西安交通大学学报, 2010, 44(2): 102-107.
- 双端带并联电抗器的输电线路纵联保护. 西安交通大学学报, 2009, 43(10): 99-103.
- 继电保护装置信号端口电磁干扰传播通道的建模与仿真. 西安交通大学学报, 2009, 43(10): 104-108.
- 基于模型识别的并联电容器保护. 西安交通大学学报, 2008, 42(12): 1506-1509.
- 带可控串补和可调电抗器输电线路纵联保护新原理. 西安交通大学学报, 2008, 42(10): 1259-1263.
- 输电线路超高速保护中小波算法的研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(2): 194-198.
- 变压器漏电感参数在线辨识方法研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(2): 199-203.
- 基于励磁电感参数识别的变压器励磁涌流判别方法. 西安交通大学学报, 2007, 41(12): 1214-1218.
- 一种新的高压线路振荡选相元件. 西安交通大学学报, 2007, 41(8): 945-953.
- 一种新型的分布式隐私保护计算模型及其应用. 西安交通大学学报, 2007, 41(8): 954-958.
- 基于形态梯度的输电线路电流行波比较式超高速保护. 西安交通大学学报, 2007, 41(4): 484-488.

(编辑 杜秀杰)