

基于纵联阻抗幅值的输电线路纵联保护

夏经德, 索南加乐, 王莉, 何世恩, 刘凯, 邓旭阳

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 提出了一种基于纵联阻抗幅值的输电线路纵联保护。该纵联阻抗是由线路两端各相电压故障分量差与电流故障分量和的比值计算而来的, 利用这个阻抗的幅值判断故障是否发生在区内。区外故障时, 上述阻抗的幅值明显大于全线串联正序阻抗的幅值; 区内故障时, 该阻抗的幅值明显小于上述定值。该保护不仅易整定、具有自选相功能, 性能稳定、动作灵敏、适应性强, 而且能有效抵御由线路电容电流和 CT 饱和所带来的影响。在 EMTP 数字仿真和动模试验中, 建立一条 1 000 kV、500 km 和一条 500 kV 50 km 输电线路的模型, 后者还考虑了 CT 饱和, 使用兰州东至咸阳 750 kV 的动模数据, 进行了各种故障下仿真, 结果表明所述纵联保护都能正确标示各种故障状态。

关键词: 输电线路; 故障分量; 纵联保护; 两端电气量; 纵联阻抗; 阻抗幅值

A transmission line pilot protection based on the amplitude of the pilot impedance

XIA Jing-de, SUONAN Jia-le, WANG Li, HE Shi-en, LIU Kai, DENG Xu-yang

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A pilot protection of transmission line based on the amplitude of the pilot impedance is proposed. The pilot impedance is computed by using the ratio of the difference of the fault-superimposed components of voltage to the summation of the fault-superimposed component of current at each phase of the both terminals of the line, and according to the amplitude of this impedance, whether the fault occurs at the line can be judged. When the fault occurs outside of the protected zone, the amplitude of the aforesaid impedance is significantly greater than the amplitude of series positive sequence impedance of the fully line, while it is obviously smaller than the determined value when the fault occurred inside of the protected zone. The proposed pilot protection not only has the characteristics of easy protective coordination, independent phase selection, stable function, sensitive operation and strong adaptation, but also possesses identity of the effective resistance of the influence brought by the line capacitor current and CT saturation. In EMTP simulation and the dynamic model experiment, the transmission line models of a 1000 kV 500 km and a 500 kV 50 km are established, and the latter considers CT saturation, uses the dynamic model data of Lanzhou-Xianyang 750 kV line, and executes the simulations under each fault. The simulation results indicate that the mentioned pilot protection can all correctly mark each fault state.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50677051 and No. 50877061).

Key words: transmission line; fault component; pilot protection; two-terminal electrical quantities; pilot impedance; impedance amplitude

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)04-0043-09

0 引言

在过去的十多年里, 由于现代数字光纤的普及, 大容量高速实时同步远距离进行数据传输已经开始成形, 在此基础上, 纵联保护也在悄然发生着变化,

其中以线路两端电气量为状态量, 具有对称的计算结构, 其计算结果为阻抗量纲的纵联保护正在悄然兴起^[1-2]。

此外, 在纵联保护中, 近年来, 输电线路方向保护仍是研究的热点和重点之一。其中, 文献[3-4]针对纵联零序方向保护在实际应用中所出现的典型问题, 提出了多种改进方案, 提高了其保护的性能; 文献[5]根据复杂环网方向保护的特点, 提出了相应

基金项目: 国家自然科学基金项目(50677051, 50877061); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20070698057)

的计算方法和整定原则，可满足其在上述使用环境中的具体要求；文献[6]利用故障电流与负荷电流在相位上所反映的差值，构成了一种新的方向保护元件，具有一定的实用性和借鉴性；文献[7-8]分析了多回输电线路的运行特性，针对存在的线间耦合问题，提出了多种改进措施，可有效地消除多回线间耦合影响；文献[9]在零（负）序电压幅值达不到方向元件启动的门槛值时，以正序电压作为零序电流的参考方向，有效地解决了上述问题；文献[10]介绍了基于光纤通信下微机纵联零序方向保护的配置形式及方案；文献[11]基于 R-L 模型的基础上，构架出相应的参数甄别方向保护原理，实用意义明显；此外，文献[12-13]将小波和数学形态学技术运用于输电线路的方向保护，并取得一定成果。尽管如此，仍然有许多工作值得进行深入的研究。

尽管基于故障分量的电流向量差动保护具有许多优异的性能，但其应用于输电线路时仍然还面临着下列几个问题有待进一步解决：①区外故障时电流互感器（CT）饱和^[14-15]的影响；②超高压长线分布电容电流的影响^[16]；③暂态信号的影响^[17-18]。上述问题严重地影响着其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呈现的特性，引入了纵联阻抗，这个纵联阻抗是由线路两端各相电压故障分量相量差与电流故障分量相量和的比值计算而来的，按照这纵联阻抗的幅值在线路故障时的特性，构建了输电线路纵联保护。在区外故障时该阻抗的幅值显著大于全线串联正序阻抗的幅值，在区内故障时该阻抗的幅值明显小于上述定值，因此具有明显的故障特征。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^[19-20]。经理论分析及仿真验证，这种保护算法彻底地消除了在原分相阻抗计算中所出现的死区问题，并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时电流互感器（CT）饱和所带来的影响。EMTP 数字仿真和动模仿真结果验证了它的正确性和准确性，可成为未来输电线路纵联保护的一种新形式。

1 单相线路下的纵联阻抗

图 1 为基于 R-L 线路集中参数模型下，单相故障附加网络。

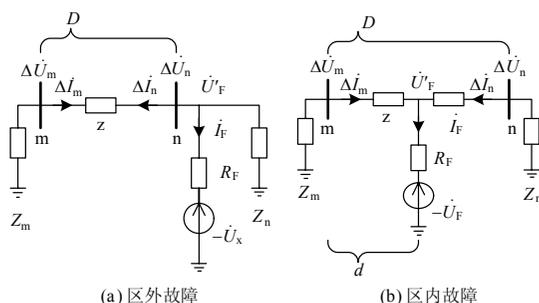


图 1 单相故障附加网络

Fig.1 Single-phase super-imposed network for fault

图 1 中： Z_m, Z_n 为两端区外等效系统阻抗； z 为单位长度线路阻抗； D 为线路全长； d 为故障距离（距 m 端）；线路两端电压、电流故障分量分别示于图 1 中； $\dot{U}'_F, \dot{I}_F, R_F$ 为故障附加电压、故障电流、故障电阻； \dot{U}'_F 为故障点等效附加电压。

1.1 纵联阻抗的定义

基于图 1 所示故障附加网络，定义纵联阻抗为：

$$Z_{op} = \Delta \dot{U}_{op} / \Delta \dot{I}_{op} \quad (1)$$

其中： $\Delta \dot{U}_{op} = \Delta \dot{U}_m - \Delta \dot{U}_n$ ； $\Delta \dot{I}_{op} = \Delta \dot{I}_m + \Delta \dot{I}_n$ 。

下面在忽略故障电阻阻值的情况下，定性分析线路上发生区外、区内故障时，纵联阻抗所呈现的数值特性。

1.2 区外故障

如图 1 (a) 所示，在区外故障时线路两端的电压故障分量差（式 (1) 中的 $\Delta \dot{U}_{op}$ ）可表示为：

$$\Delta \dot{U}_{op} = \Delta \dot{I}_m z D = -\Delta \dot{I}_n z D = (\Delta \dot{I}_m - \Delta \dot{I}_n) z D / 2 \quad (2)$$

由式 (2) 可知，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，这个数值因和线路全长阻抗成正比，并且其本身也具备清晰的物理意义。根据图 1 (a) 所示，电流故障分量的相量和（式 (1) 中的 $\Delta \dot{I}_{op}$ ）可表示为：

$$\Delta \dot{I}_{op} = 0 \quad (3)$$

因此区外故障时纵联阻抗的幅值计算结果为：

$$|Z_{op}| = \left| \frac{\Delta \dot{U}_{op}}{\Delta \dot{I}_{op}} \right| = \infty > |zD| = \left| \frac{\Delta \dot{U}_{op}}{\Delta \dot{I}_m} \right| = \left| \frac{\Delta \dot{U}_{op}}{\Delta \dot{I}_n} \right| \quad (4)$$

小结如下：当线路发生区外故障时，纵联阻抗的幅值明显大于线路阻抗的幅值，具有明显的区外故障特征。

1.3 区内故障

如图 1 (b) 所示，在区内故障时线路两端的电压故障分量差可表示为：

$$\Delta \dot{U}_{op} = \Delta \dot{I}_m z d - \Delta \dot{I}_n z (D - d) \quad (5)$$

而电流故障分量的相量和表示为:

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

线路两侧电压故障分量可分别表示为:

$$\Delta \dot{U}_m = -\dot{U}'_F \frac{Z_m}{Z_m + z d}, \quad \Delta \dot{U}_n = -\dot{U}'_F \frac{Z_n}{Z_n + z (D - d)} \quad (7)$$

同时, 故障点的故障电流可以表示为:

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

将式(5)~(8)代入式(1), 因此在区内故障时, 纵联阻抗的幅值可表示为:

$$|Z_{op}| = \left| \frac{\Delta \dot{U}_{op}}{\Delta \dot{I}_{op}} \right| = \left| z \times \frac{(Z_m (D - d) - Z_n d)}{Z_m + z D + Z_n} \right| < |z D| \quad (9)$$

小结如下: 当线路发生区内故障时, 纵联阻抗的幅值明显小于线路阻抗的幅值, 具有明显的损坏/故障特征, 并且区内绝对没有死区。

2 性能分析

2.1 抵御电容电流的能力

在长距离输电线路继电保护的整定都需考虑并联电容电流及其影响, 图2为区外故障时带并联电容的单相故障附加网络:

在考虑电容电流的情况下, 电流故障分量的相量和为^[1]:

$$\Delta \dot{I}_{op} = \Delta \dot{I}_{mc} + \Delta \dot{I}_{nc} = (\Delta \dot{U}_m + \Delta \dot{U}_n) / Z_C \quad (10)$$

其中: $Z_C = 2 / j \omega c D$ 。

如图2所示, 以 $\Delta \dot{U}_n$ 为参考量, $\Delta \dot{U}_m$ 可表为:

$$\Delta \dot{U}_m = \Delta \dot{U}_n Z'_m / (z D + Z'_m) \quad (11)$$

其中: $Z'_m = Z_m Z_C / (Z_m + Z_C)$ (12)

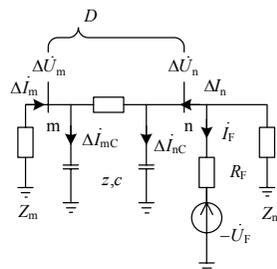


图2 区外故障时带并联电容的单相故障附加网络
Fig.2 Single-phase super-imposed network taken shunt capacitors when external fault occurs

为了定性分析电容电流对于纵联阻抗的影响, 假设两侧系统阻抗和单位长度线路阻抗的相角相等并都设定其数值为 90° :

$$\arg Z_m = \arg Z_n = \arg z = 90^\circ \quad (13)$$

将式(10)和(11)代入式(1), 得:

$$|Z_{op}| = K_C |z D| \quad (14)$$

其中: $K_C = |Z_C / (2Z'_m + z D)|$ 。

根据式(14)表示形式可知, 只有当 $|K_C| > 1$, 比值的幅值数值才能确保和在区内故障时的明确可分, 这个条件必须得到满足。以本文 EMTP 仿真用 1 000 kV 500 km 线路为例说明, 可分别计算得到:

$$Z_C = 2 / j \omega c D \approx -j 909 \Omega, \quad z D = 129.63 \angle 88^\circ \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)和(12), 只要系统的等效阻抗满足:

$$|Z_m| < 272 \Omega \quad (16)$$

就可满足式(14)所设条件。通过这个阻抗可以反映出系统的短路容量, 按照系统运行方式的要求, 系统的短路容量不得小于(实际短路容量将远大于)输电线路传输的自然功率。输电线路传输的自然功率受制于线路的特征阻抗, 由上述线路正序参数可得该线路的特征阻抗 Z_T 为:

$$|Z_T| \approx \sqrt{l/c} \approx 243 \Omega \quad (17)$$

由于在式(16)中阻抗的限制值大于式(17)线路的特征阻抗, 因此在满足线路各种运行方式的条件下系统等效阻抗满足式(16)条件。短距离线路由于 Z_C 幅值与线路长度反比增大, $z D$ 幅值与线路长度线性缩小, 对区外等效阻抗的要求可进一步放宽, 因此上述条件更容易满足。上述推算过程在此省略。

当系统阻抗不能满足式(16)数值条件时, 说明该侧的系统状态不能满足系统最小运行方式要求, 即通常称之为弱电系统。当另一侧的强系统发生区外故障时, 弱电系统经过长距离的线路全长后所能提供的短路电流必然非常小, 因此可以设置合适的纵联保护启动门槛屏蔽之, 也就是式(33)的第一项。

2.2 抵御 CT 饱和的能力

在区外故障时, 经常会造成电源侧 CT 饱和, 对于纵联阻抗的幅值可能产生如下影响:

CT 饱和使得在饱和侧 CT 二次绕组上所获得的实测电流故障分量较理论估算值有所减少, 增加了电流差动的不平衡量。随着 CT 饱和程度的加重, 电流差动的不平衡量也将增加, 由此纵联阻抗的幅值也同步减少, 也使其纵联保护状态识别的分辨余量同步缩小。本文在理论分析和仿真验证时只涉及线路单端 CT 出现饱和的情况。

为了便于定性分析 CT 饱和对电流工频故障

分量的影响, 针对在稳态饱和^[21]和暂态饱和^[22]状态下电流故障分量的特性, 电流在过零点后不是马上进入饱和而需要达到一定数值/角度后才反映出饱和的特性, 因此可以将电流过零点到饱和点间的相角之差定义为导通/非间断角 φ_x 。电流在导通角内的数值和不发生饱和时相同, 而过了导通角后由于饱和电流呈衰减状态并且其幅值明显小于正常数值。随着饱和程度的增加, 不仅可表示为导通角的减少, 而且还反映为饱和后衰减量幅值的变小, 因此可反映为电流数量上的减小。为了定性分析饱和对电流数值的影响, 将 CT 饱和所造成电流故障分量的衰减损耗, 只单纯反映在导通角的数值上, 将饱和后残存的衰减电流工频故障分量忽略不计或等效地换算为对导通/非间断角的修正和补充, 见图 3 显示故障和 CT 饱和后电流故障分量状态示意图。

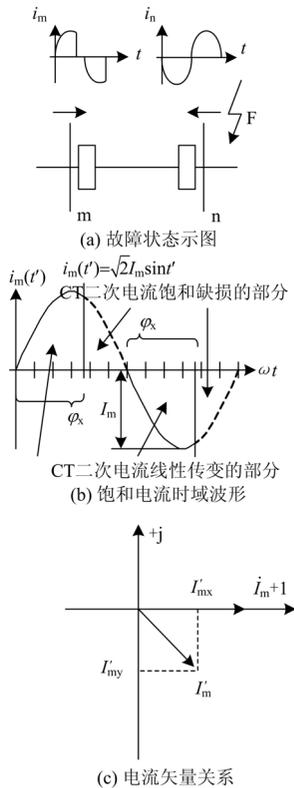


图 3 CT 饱和后故障和电流故障分量状态示意图

Fig.3 Schematic diagram of the state of the fault and the current fault component after CT saturation

在图 3 中, 线路在 n 端区外发生故障, 使电源侧 m 端 CT 发生饱和, 可以假设在不考虑 CT 饱和的情况下 m 端 CT 二次绕组获得的理想电流故障分量的时域和相量表达形式分别为:

$$i_m(t') = \sqrt{2}I_m \sin t' \quad (18)$$

$$\Delta \dot{I}_m = I_m \angle 0^\circ \quad (19)$$

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

可根据傅立叶变换求得 CT 饱和后电流故障分量的相量表达, 在图 3 (c) 中 CT 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:

$$I'_{mx} = \frac{\sqrt{2}I_m}{\pi} \int_0^{\varphi_x} i_m(t') \sin t' dt' = \frac{I_m}{\pi} (\varphi_x - \frac{\sin 2\varphi_x}{2}) \quad (20)$$

$$I'_{my} = \frac{\sqrt{2}I_m}{\pi} \int_0^{\varphi_x} i_m(t') \cos t' dt' = \frac{I_m}{\pi} (\frac{1 - \cos 2\varphi_x}{2}) \quad (21)$$

以导通/非间断角的变化范围和方式设定为: $\varphi_x: \pi \rightarrow 0$, 式 (20) 的值随导通/非间断角的减少而单调减少, 式 (21) 的值在导通/非间断角变化范围内为有限值, 其中绝对值最大在: $\varphi_x = \pi/2$ 处, 此角度下可得电流故障分量在实轴和虚轴的投影值分别为:

$$I'_{mx} = \frac{I_m}{2}, I'_{my} = \frac{I_m}{\pi} \quad (22)$$

导通角在该角度下可综合定性地反映为电流因饱和和衰减为原来的一半, 在此基础上分析单端 CT 饱和对电流差动保护和纵联阻抗幅值的影响, 因此可得到此导通角度下电流工频故障分量的相量表达形式为:

$$\Delta \dot{I}'_m = I'_{mx} + jI'_{my} \approx 0.59I_m \angle 32^\circ \quad (23)$$

由于 CT 发生饱和, 式 (3) 中的 $\Delta \dot{I}_m$ 衰减后成为式 (23) 的 $\Delta \dot{I}'_m$, 将式 (23) 代入式 (3), 可得电流工频故障分量的相量和在此状态下所呈现的不平衡量为:

$$|\Delta \dot{I}'_{op}| = |\Delta \dot{I}'_m + \Delta \dot{I}_n| = |\Delta \dot{I}'_m - \Delta \dot{I}_m| \approx 0.59I_m \quad (24)$$

将式 (24) 代入式 (4), 可得区外故障 CT 饱和和下纵联阻抗的幅值为:

$$|Z_{op}| \approx 1.68|zD| \quad (25)$$

式 (25) 和式 (9) 的计算结果之间仍能留有充分可分辨的差值。在极端状态下, 设 CT 饱和达到极限:

$$|\Delta \dot{I}'_m| \rightarrow 0 \quad (26)$$

将式 (26) 代入式 (24), 此时的不平衡量为:

$$|\Delta \dot{I}'_{op}| = |\Delta \dot{I}'_m + \Delta \dot{I}_n| \rightarrow |-\Delta \dot{I}_m| \approx I_m \quad (27)$$

根据式 (2) 结论, 因此在极端的情况下纵联阻抗的幅值还可表示为:

$$|Z_{op}| \geq |zD| \quad (28)$$

纵联阻抗的幅值仍然未小于线路阻抗的幅值, 由此可知, 无论 CT 饱和程度如何, 也丝毫不会影响纵联阻抗对各类故障进行准确判断和灵敏分辨。

3 三相线路下的纵联阻抗及其纵联保护

针对三相线路模型, 可以得到相同的结论。图 4 为基于 R-L 线路集中参数模型下, a 相区内单相接地故障时的三相线路故障附加网络。图 5 为系统零序网络。

图 5 中, Z_{1m}, Z_{1n} 为两端区外等效系统正序阻抗; Z_s, Z_m, Z_1, Z_0 为单位长度线路自、互、正序、零序电抗; $\dot{U}_{F0}, \dot{I}_{F0}, R_{F0}$ 为故障点零序电压、电流及故障电阻。

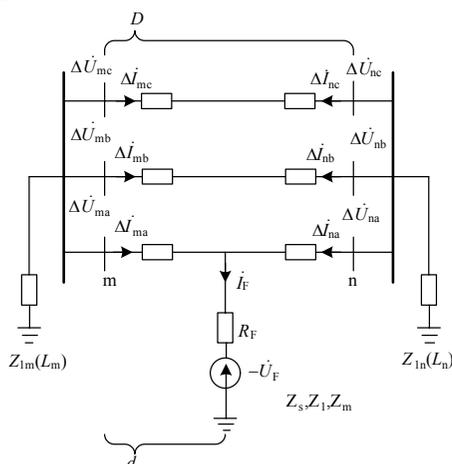


图 4 a 相单相接地时的三相故障附加网络
Fig.4 Three-phase super-imposed network for single-phase-ground fault

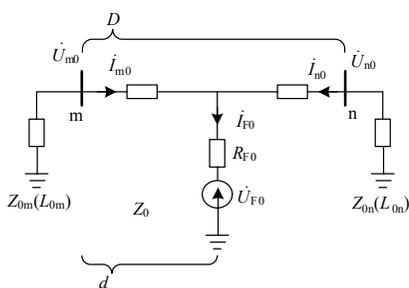


图 5 系统的零序网络
Fig.5 System's zero-sequence network

三相线路中各相线路两端电压故障分量差可表为:

$$\Delta \dot{U}_{\text{op}\varphi} = \Delta \dot{U}_{\text{mp}} - \Delta \dot{U}_{\text{np}} = \Delta \dot{I}_{\text{mp}\Sigma} z_1 d - \Delta \dot{I}_{\text{np}\Sigma} z_1 (D-d) \quad (29)$$

其中: $\Delta \dot{I}_{\text{mp}\Sigma} = \Delta \dot{I}_{\text{mp}} + K \times 3 \dot{I}_{\text{m}0}$; $\Delta \dot{I}_{\text{np}\Sigma} = \Delta \dot{I}_{\text{np}} + 3K \dot{I}_{\text{n}0}$; $\varphi = a, b, c$; $K = (z_0 - z_1) / 3z_1$ 。

由图 5 的零序网络可得零序电压和零序电流的关系为:

$$\dot{U}_{\text{op}0} = \dot{U}_{\text{m}0} - \dot{U}_{\text{n}0} = \dot{I}_{\text{m}0} z_0 d - \dot{I}_{\text{n}0} z_0 (D-d) \quad (30)$$

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 (29) 中的零序电流用式 (30) 中的零序电压代替, 整理后的式 (29) 可表示为:

$$\Delta \dot{U}_{\text{op}\varphi\Sigma} = \Delta \dot{U}_{\text{mp}\Sigma} - \Delta \dot{U}_{\text{np}\Sigma} = \Delta \dot{I}_{\text{mp}\Sigma} z_1 d - \Delta \dot{I}_{\text{np}\Sigma} z_1 (D-d) \quad (31)$$

其中: $\Delta \dot{U}_{\text{mp}\Sigma} = \Delta \dot{U}_{\text{mp}} - 3Z_m \dot{U}_{\text{m}0} / Z_0$; $\Delta \dot{U}_{\text{np}\Sigma} = \Delta \dot{U}_{\text{np}} - 3Z_n \dot{U}_{\text{n}0} / Z_0$ 。

针对健全相 (b 相), 式 (31) 可表示为:

$$\Delta \dot{U}_{\text{opb}\Sigma} = (\Delta \dot{I}_{\text{mb}} - \Delta \dot{I}_{\text{nb}}) z_1 D / 2 \quad (32)$$

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, 都具有完全同样的表达形式。

在三相线路中, 由于存在相间耦合关系, 当发生不平衡的接地故障时, 在各相电路中形成由零序电流产生的相间耦合。根据式 (31) 可构建基于图 4 消除相间耦合后的由线路正序参数组成的通用相故障附加电路, 并且上述单位长度线路的阻抗就是单位长度线路的正序阻抗, 见图 6。

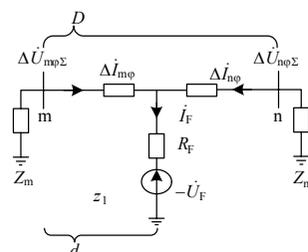


图 6 通用故障相电路模型
Fig.6 General circuit model of fault phase

据此可得出以下结论: 由于在式 (31) 中使用零序电压补偿并消除了相间耦合的影响, 在 1.2 和 1.3 节中基于单相线路模型下所描述纵联阻抗的幅值特征完全准确无误地反映出基于三相线路模型下纵联阻抗的实际性能特征。

总之, 当区外故障时, 纵联阻抗的幅值明显大于线路串联正序阻抗; 区内故障时, 纵联阻抗的幅值显著小于上述定值; 上述算法严格地建立在三相电路模型基础上, 因此可适用于各种故障状态下的健全相和故障相。

根据 1.2 和 1.3 节的内容, 提出了基于纵联阻抗幅值的输电线路分相纵联保护。该纵联保护由两个计算项组成, 分别是各相的电流故障分量相量和的模数计算项和各相的纵联阻抗内部故障判别的幅值计算项, 这两个计算项通过逻辑与运算联合, 表示为:

$$\begin{cases} |\Delta i_{m\phi} + \Delta i_{n\phi}| > I_{set} \\ Z_{op\phi} = K_k \left| \frac{\Delta \dot{U}_{op\phi 2}}{\Delta \dot{I}_{op\phi}} \right| < |z_1 D| \end{cases} \quad (33)$$

其中： K_k 为灵敏度选择系数，可根据具体线路情况设置，通常可供选择的取值范围为：1~1.3；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）；阻抗幅值的单位为欧姆（ Ω ），当其数值小于线路串联正序阻抗的幅值时，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7所示。

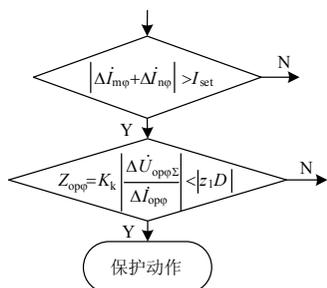


图7 纵联保护内部故障判别流程图

Fig.7 Flow chart of internal fault differentiating of pilot protection

尽管电流差动保护具有简单可靠、动作速度快且不受系统振荡影响的特性^[23]，但在实际运用中还是存在下列问题：①高压长距离输电线路的电容电流相对较大，对其灵敏度影响较大，②系统负荷对制动电流的影响，特别针对重载线路；在上述情况下当遇到高阻故障都将使制动量大于动作量，造成保护拒动。而基于故障分量的电流差动保护可有效

克服上述问题，具有较高的灵敏度，可在任何环境下检测出各种高阻故障。本文正是利用故障分量电流差动保护的高灵敏性作为该纵联保护式(33)的启动元件。另外由于本文所述的纵联阻抗是基于故障分量的，因此在式(34)中也使用故障分量电流差动保护，便于在相同条件下作性能对比。

4 仿真实验

在EMTP仿真系统中，线路均采用的是分布参数模型，长距离线路电压等级为1000 kV，短距离线路电压等级为500 kV。在动模仿真中系统的额定电压为750 kV。

4.1 EMTP 仿真实验

(1) 在EMTP仿真中的长距离线路参数和故障电阻数值参见文献[19]。

(2) 在EMTP仿真中的短距离线路参数和故障电阻数值参见文献[20]。另外：

$$z_1 D = 15.22 \angle 85^\circ, E_{sm}: 525 \text{ kV}, f: 50 \text{ Hz}, \theta_m: 0^\circ, E_{sn}: 500 \text{ kV}, f: 50 \text{ Hz}, \theta_n: -10^\circ.$$

图8为EMTP仿真中故障位置设置示意图，其中：k1为m端出口区外，k2为m端出口区内，k3为区内中点，k4为n端出口区内，k5为n端出口区外。

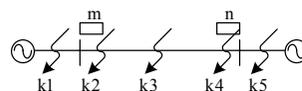


图8 故障位置示意图

Fig.8 Schematic diagram of fault location

表1为长距离线路a相单相接地和三相短路时纵联阻抗的幅值，表2为长距离线路a-b相间短路和a-b相间接地时纵联阻抗的幅值，阻抗幅值的单位为欧姆（ Ω ）。

表1 EMTP仿真中长距离线路a相单相接地和三相短路时纵联阻抗的幅值 ($|z_1 D| = 130 \Omega, K_k = 1.3$)

Tab.1 Pilot impedance amplitudes when A single-phase-ground fault and 3-phases fault of long distant line on EMTP ($|z_1 D| = 130 \Omega, K_k = 1.3$)

故障类型	AG		AG		ABC			
	$R_f=0 \Omega$		$R_f=500 \Omega$		$R_f=0 \Omega$			
故障位置	Z_{opa}	保护动作	Z_{opa}	保护动作	Z_{opa}	Z_{opb}	Z_{opc}	保护动作
k1	300.54	×	275.82	×	305.07	290.87	355.35	×
k2	17.49	✓	16.95	✓	25.26	25.24	27.26	✓
k3	11.46	✓	12.03	✓	13.82	15.11	13.85	✓
k4	41.08	✓	35.56	✓	45.54	45.58	52.04	✓
k5	481.58	×	420.84	×	532.64	467.25	508.06	×

表 2 EMTP 仿真中长途线路 a-b 相间短路和 a-b 相间接地时纵联阻抗的幅值 ($|z_1 D| = 130 \Omega, K_k = 1.3$)Tab.2 Pilot impedance amplitudes when a-b double-phases fault and a-b double-phases ground fault of long distant line on EMTP($|z_1 D| = 130 \Omega, K_k = 1.3$)

故障类型	AB			AB			ABG			ABG		
故障电阻	$R_F=0 \Omega$			$R_F=100 \Omega$			$R_F=0 \Omega$			$R_F=100 \Omega$		
故障位置	Z_{opa}	Z_{opb}	保护动作	Z_{opa}	Z_{opb}	保护动作	Z_{opa}	Z_{opb}	保护动作	Z_{opa}	Z_{opb}	保护动作
k1	322.45	322.45	×	296.74	296.74	×	316.92	320.13	×	296.65	291.18	×
k2	59.25	59.25	✓	52.39	52.39	✓	20.65	19.06	✓	21.76	19.57	✓
k3	20.27	19.59	✓	20.33	19.65	✓	16.39	12.88	✓	16.52	13.02	✓
k4	56.89	56.89	✓	54.06	54.06	✓	42.72	36.97	✓	40.43	38.57	✓
k5	453.26	453.26	×	439.52	439.52	×	480.07	518.87	×	434.02	441.41	×

表 3 为单端 CT 饱和时短距离线路纵联阻抗的幅值, 阻抗幅值的单位为欧姆 (Ω)。表 3 中的对照数据为电流故障分量差动量与比例制动量的比值,

具体计算公式为^[24]:

$$K_{I\phi} = (|\Delta \dot{I}_{m\phi} + \Delta \dot{I}_{n\phi}|) / 0.5 \times (|\Delta \dot{I}_{m\phi}| + |\Delta \dot{I}_{n\phi}|) \quad (34)$$

表 3 EMTP 仿真中 a 单相接地故障时 m 单端 CT 饱和时短距离线路纵联阻抗的幅值 ($|z_1 D| = 15 \Omega, K_k = 1.3$)Tab.3 Pilot impedance amplitudes of short distant line based on CT saturation of m single terminal when a single phases ground fault on EMTP($|z_1 D| = 15 \Omega, K_k = 1.3$)

故障类型	故障电阻	故障位置	序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AG	$R_F=0 \Omega$	k5	Z_{opa}	266	196	83	57	46	40	36	33	30	29	27	26
			K_{Ia}^*	0.06	0.08	0.20	0.32	0.40	0.46	0.54	0.60	0.66	0.72	0.76	0.80
	$R_F=300 \Omega$	k5	Z_{opa}	333	301	272	248	227	209	193	180	167	157	147	139
			K_{Ia}^*	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13

注: 表中第二行和第四行中带*号的数据 K_{Ia} 来源于式 (34)。

4.2 动模仿真验证

在动模仿真中的线路模型参数和各发电机的主要参数参见文献[20]。表 4 为动模仿真中纵联阻

抗的幅值, 阻抗幅值的单位为欧姆 (Ω)。图 9 为兰州东—咸阳 750 kV 长距离输电系统模拟接线图, 故障位置见图 9。

表 4 动模仿真中纵联阻抗的幅值 ($|z_1 D| = 133 \Omega, K_k = 1.3$)Tab.4 Pilot impedance amplitudes on dynamic simulation($|z_1 D| = 133 \Omega, K_k = 1.3$)

故障位置	k6			k7			k7			k8			k9			k9					
故障类型	BG			ABC			AG			BC			AG			BCG			BC		
故障电阻 R_F	400 Ω			0 Ω			400 Ω			0 Ω			0 Ω			0 Ω			0 Ω		
故障相别	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Z_{opp}	87*	2	72*	23	23	23	10	796*	601*	720*	22	22	17	3 776	7 481	4 000	3 781	3 580	2 163*	4 280	3 741
保护动作	×	✓	×	✓	✓	✓	✓	×	×	×	✓	✓	✓	×	×	×	×	×	×	×	×

注: 在动模仿真数据中, 凡幅值数据右上角带**的, 由于其相电流故障分量相量和的模数小于最小启动量门槛, 因此保护不动。

4.3 结果分析

由计算结果可得出:

(1) 在区外故障时, 各纵联阻抗的幅值都明显大于线路串联正序阻抗, 处在保护判据式 (33) 的动作选择区域外, 保护可靠不动。

(2) 在区内任何位置故障时, 各纵联阻抗的幅

值都显著小于线路串联正序阻抗, 落在保护判据式 (33) 的动作选择区域内, 保护可靠并正确动作。

(3) 该保护不受分布电容电流影响, 因此在不进行电容电流补偿的情况下, 幅值基本稳定可靠, 说明该保护在理论证明的基础上可应用中长距离以下的各输电线路路上。

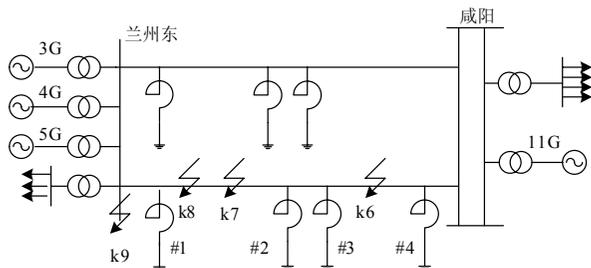


图9 兰州东—咸阳 750 kV 长距离输电系统模拟接线图

Fig.9 Lanzhoudong-Xianyang 750 kV simulation wiring diagram of long-distance transmission system

(4) 由于 CT 饱和造成的电流故障分量相量和的不平衡量只能有限地降低纵联阻抗的幅值, 因此其抵抗 CT 饱和的能力相对较强。

5 结论

本文提出了一种基于纵联阻抗幅值的输电线路纵联保护, 并进行了理论证明、EMTP 仿真和动模仿真实验验证。理论分析和仿真结果表明, 在区外故障时, 纵联阻抗的幅值都明显大于线路正序阻抗的幅值, 从而保证上述分相纵联保护的可靠性; 在区内故障时, 纵联阻抗的幅值都显著小于上述定值, 故障特征明显, 保证上述纵联保护的灵敏性。该保护数值稳定、结构简单、整定容易, 区内全线无死区, 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 CT 饱和能力强, 适合各种复杂运行环境。在 EMTP 数字仿真和动模仿真中, 建立两条输电线路的模型, 并考虑了 CT 饱和, 使用了电科院验证的动模数据, 进行了各种条件下仿真, 结果表明本文所述纵联保护都能正确标示各种故障状态。

参考文献

- [1] 索南加乐, 刘凯, 粟小华, 等. 基于故障分量综合阻抗的输电线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (31): 54-61.
SUONAN Jia-le, LIU Kai, SU Xiao-hua, et al. A novel transmission line pilot protection based on fault component integrated impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (31): 54-61.
- [2] 索南加乐, 何世恩, 粟小华, 等. 带可控串补和可调电抗器输电线路纵联保护新原理[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (10): 1259-1263.
SUONAN Jia-le, HE Shi-en, SU Xiao-hua, et al. New pilot protection principle of transmission line with thyristor controlled series capacitors and thyristor controlled reactor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42 (10): 1259-1263.
- [3] 张弛, 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, 76.
ZHANG Chi, LI Yi-quan, ZENG Geng-hui. Principle investigation and simulation research on pilot zero sequence directional protection with compensation of negative sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (21): 18-23, 76.
- [4] 汪萍, 陈久林. 纵联零序方向保护误动原因分析及其对策[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (7): 122-125.
WANG Ping, CHEN Jiu-lin. Analysis of longitudinal zero sequence direction protection misoperation and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (7): 122-125.
- [5] 蔡国伟, 王建元, 潘超, 等. 基于适应型 Petri 网的多环电网方向保护简单回路拓扑分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (1): 1-4.
CAI Guo-wei, WANG Jian-yuan, PAN Chao, et al. Simple loop topology analysis based on adaptive Petri net for directional protections in multi-loop electric power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (1): 1-4.
- [6] 焦姣, 和敬涵. 基于同侧电流变化的线路方向保护算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (17): 1-4.
JIAO Jiao, HE Jing-han. A circuit directional protection algorithm based on current changes with one side protects [J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (17): 1-4.
- [7] 赵一, 罗建, 鄢安河, 等. 横联差动电流方向保护闭锁措施的研究[J]. 继电器, 2008, 36 (7): 6-9, 14.
ZHAO Yi, LUO Jian, YAN An-he, et al. The lock method study of transverse differential current direction protection[J]. Relay, 2008, 36 (7): 6-9, 14.
- [8] 王兴国, 黄少锋, 刘千宽. 一种基于方向行波的平行双回线保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (21): 7-11, 60.
WANG Xing-guo, HUANG Shao-feng, LIU Qian-kuan. Directional comparison pilot protection for six-phase transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (21): 7-11, 60.
- [9] 汤枫, 袁越, 王宾, 等. 特高压交流输电线路负序方向保护动作特性仿真分析[J]. 继电器, 2007, 35 (S1): 30-35.
TANG Feng, YUAN Yue, WANG Bin, et al. Analysis of negative sequence protection operation characteristics for UHV AC transmission line[J]. Relay, 2007, 35 (S1): 30-35.
- [10] 夏明超, 黄益庄, 王勋. 高压输电线路暂态保护的发展与现状[J]. 电网技术, 2002, 26 (11): 65-69.
XIA Ming-chao, HUANG Yi-zhuang, WANG Xun. Development and present situation of transient based protections for high voltage power transmission lines[J].

- Power System Technology, 2002, 26 (11): 65-69.
- [11] 索南加乐, 王向兵, 孟祥来, 等. 基于 R-L 模型的参数识别快速方向元件[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40 (6): 689-693.
SUONAN Jia-le, WANG Xiang-bing, MENG Xiang-lai, et al. Quick directional element based on R-L model parameter identification[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40 (6): 689-693.
- [12] 李幼仪, 董新洲, 孙元章. 不同行波方向元件原理与判据的比较[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46 (7): 1208-1211.
LI You-yi, DONG Xin-zhou, SUN Yuan-zhang. Comparison about principles and criteria of different directional relays based on travelling waves[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2006, 46 (7): 1208-1211.
- [13] 林湘宁, 刘沛, 高艳. 基于故障暂态和数学形态学的超高速线路方向保护[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (4): 13-18.
LIN Xiang-ning, LIU Pei, GAO Yan. Ultra-high-speed line directional protection based on transient and mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (4): 13-18.
- [14] 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 Da-li, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Research on multi-differential protection scheme for transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32 (7): 87-91.
- [15] 吴大立, 尹项根, 张哲. 输电线路复合差动保护方案[J]. 电网技术, 2007, 32 (7): 87-91.
WU Da-li, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Research on multi-differential protection scheme for transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32 (7): 87-91.
- [16] 苗世洪, 刘沛, 程时杰, 等. 750 kV 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 Shi-hong, LIU Pei, CHENG Shi-jie, 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.
- [17] 罗四倍, 张保会, 曹瑞峰, 等. 基于中值滤波的超高速暂态量方向元件[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (34): 64-69.
LUO Si-bei, ZHANG Bao-hui, CAO Rui-feng, et al. Ultra-high-speed transient directional unit based on median filtering[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (34): 64-69.
- [18] 罗四倍, 段建东, 张保会. 基于暂态量的 EHV/UHV 输电线路超高速保护研究现状与展望[J]. 电网技术, 2006, 30 (22): 32-41.
LUO Si-bei, DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui. Present status and prospect of research and development of transient component based ultra-high-speed protection for EHV/UHV transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30 (22): 32-41.
- [19] 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 Jia-le, XIA Jing-de, 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.
- [20] 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 Jia-le, XIA Jing-de, JIAO Zai-bin, 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.
- [21] 李瑞生, 路光辉, 王强. 用于线路差动保护的电流互感器饱和判据[J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (4): 70-73.
LI Rui-sheng, LU Guang-hui, WANG Qiang. Transformer saturation criterion for line differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (4): 70-73.
- [22] 陈丽艳, 何奔腾, 钱国明, 等. 基于电流极性比较的抗电流互感器饱和新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (8): 56-61.
CHEN Li-yan, HE Ben-teng, QIAN Guo-ming, et al. A novel method for current transformer saturation countermeasure based on comparing two currents polarities[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (8): 56-61.
- [23] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理和技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 24-27.
- [24] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 146-158.

收稿日期: 2010-02-05; 修回日期: 2010-05-27

作者简介:

夏经德 (1961-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xia.jingde@stu.xjtu.edu.cn

索南加乐 (1960-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护;

王莉 (1975-), 女, 工程师, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护。