

零序互感对相邻线路纵联零序方向保护的影响

吴麟琳, 黄少锋

(华北电力大学四方研究所, 北京 102206)

摘要:就零序互感对相邻线路纵联零序方向保护的影响进行了分析。采用互感线路一般模型, 结合零序方向元件的动作原理, 分别在发生内部故障和出口处反方向故障的情况下, 对纵联零序方向元件的动作行为进行了详细的理论推导。研究表明, 不论本线路发生内部故障或出口处反方向故障, 该线路纵联零序方向保护不受零序互感的影响, 能够正确动作; 与其相邻的互感线路纵联零序方向保护是否误动, 取决于两互感线路间电气联系的紧密程度, 电气联系越强, 误动可能性越小。利用 PSCAD 进行了仿真实验。

关键词:互感线路; 纵联零序方向保护; 零序互感; 电气联系; 同杆并架

Effects of zero-sequence mutual inductance on zero-sequence pilot protection of parallel lines

WU Lin-lin, HUANG Shao-feng

(Sifang Research Institute, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Effects of mutual inductance on zero-sequence pilot protection of parallel lines are analyzed. Using a general model of mutual inductance lines and combining with the operating principle of the zero-sequence directional element, a detailed theoretical analysis is carried out on the actions of zero-sequence pilot protection under the conditions of inner fault and fault at the exit in the opposite direction. Studies show that in the case of internal fault or fault at the exit in the opposite direction, the zero-sequence directional protection of the fault line is immune to the impact of zero-sequence mutual inductance, and can operate correctly; the maloperation of the zero-sequence pilot protection of its parallel line depends on the tightness extent of electrical connection between the two mutual lines, the stronger the electrical connection is, the smaller the possibility of malfunction will be. At last, PSCAD simulation is carried out.

Key words: transmission lines with mutual inductance; zero-sequence pilot protection; zero-sequence mutual inductance; electrical connection; the double circuits on the same tower

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)03-0024-05

0 引言

随着国家电网建设的快速发展, 为了提高土地利用效率和降低电力建设成本, 相邻线路日益增多, 线路走廊日趋紧密, 线路间存在的零序互感对线路纵联零序方向保护所产生的影响, 已造成多起保护误动作^[1-6]。本文采用互感线路的一般模型, 着重进行了零序互感对相邻线路零序方向元件影响的理论分析, 使零序方向元件受相邻线路电气联系强弱影响的现象更加直观化, 并用 PSCAD 仿真实验验证了其结论的正确性。

1 互感线路内部故障时的影响

1.1 零序等值网络和故障计算

互感线路存在多种不同的形式, 本文采用互感

线路的一般模型, 如图1所示。

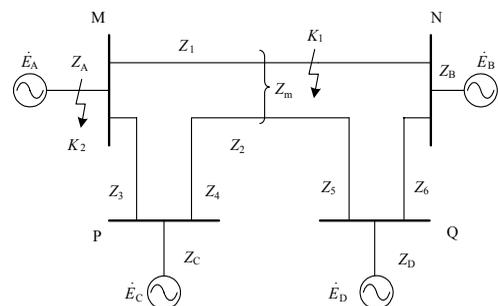


图1 互感线路模型

Fig.1 A mutual lines model

其中 Z_m 为线路MN和PQ的互感阻抗, 线路阻抗 Z_3 、 Z_4 、 Z_5 和 Z_6 取不同值时, 可以得到多种形式的互感线路网络模型。

首先分析互感线路内部 K_1 处发生接地故障的情

况,不妨设两线路之间全程存在互感,短路点 K_1 距M侧和N侧母线的距离与互感线路MN全长之比分别为 α 和 $\beta=1-\alpha$,其中 $1>\alpha>0$ 。分别将M、P、O电位所构成的电路和N、Q、O电位所构成的电路进行 Δ/Y 变换。同时根据电路原理,互感电压的作用可以用电流控制的电压源代替,从而得到图2所示的零序等值电路。本文中为了简便起见,忽略图中各零序分量的下标。

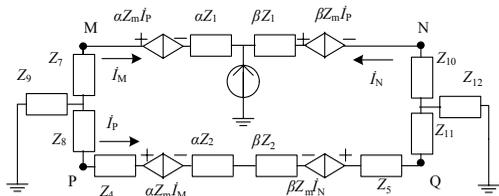


图2 K1处接地故障时零序等值网络

Fig.2 Zero-sequence equivalent network with earth fault at K1

设 \dot{U}_{K1} 为短路点 K_1 处的零序电压,由图2所示零序等值网络可得:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & 0 & A \\ 0 & a_{22} & -B \\ A & -B & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_M \\ \dot{I}_N \\ \dot{I}_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{U}_{K1} \\ -\dot{U}_{K1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} a_{11} = \alpha Z_1 + Z_7 + Z_9 \\ a_{22} = (1-\alpha)Z_1 + Z_{10} + Z_{12} \\ a_{33} = Z_2 + Z_4 + Z_5 + Z_8 + Z_9 + Z_{11} + Z_{12} \\ A = \alpha Z_m + Z_9 \\ B = (1-\alpha)Z_m + Z_{12} \end{cases} \quad (2)$$

通过求解式(1),可以得到 \dot{I}_M 、 \dot{I}_N 和 \dot{I}_P 的具体表达式。取 \dot{U}_M 、 \dot{U}_N 、 \dot{U}_P 和 \dot{U}_Q 分别为线路MN和PQ两端保护安装处的零序电压,根据纵联零序方向保护原理^[5],对于M、N、P和Q侧零序方向元件分别有:

$$\begin{cases} \frac{\dot{U}_M}{\dot{I}_M} = \frac{-\dot{I}_M Z_7 - (\dot{I}_M + \dot{I}_P)Z_9}{\dot{I}_M} = -Z_7 + K_M Z_9 \\ \frac{\dot{U}_N}{\dot{I}_N} = \frac{-\dot{I}_N Z_{10} + (\dot{I}_P - \dot{I}_N)Z_{12}}{\dot{I}_N} = -Z_{10} + K_N Z_{12} \\ \frac{\dot{U}_P}{\dot{I}_P} = \frac{-\dot{I}_P Z_8 - (\dot{I}_M + \dot{I}_P)Z_9}{\dot{I}_P} = -Z_8 + K_P Z_9 \\ \frac{\dot{U}_Q}{-\dot{I}_P} = \frac{\dot{I}_P Z_{11} + (\dot{I}_P - \dot{I}_N)Z_{12}}{-\dot{I}_P} = -Z_{11} + K_Q Z_{12} \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} K_M = \frac{K_{M1}}{K_{M2}} = \frac{-(a_{22}a_{33} - B^2 - AB + a_{11}B - a_{22}A)}{a_{22}a_{33} - B^2 - AB} \\ K_N = \frac{K_{N1}}{K_{N2}} = \frac{-(a_{11}a_{33} - A^2 - AB - a_{11}B + a_{22}A)}{a_{11}a_{33} - A^2 - AB} \\ K_P = \frac{K_{P1}}{K} = \frac{a_{22}a_{33} - B^2 - AB + a_{11}B - a_{22}A}{a_{22}A - a_{11}B} \\ K_Q = \frac{K_{Q1}}{K} = \frac{-a_{11}a_{33} + A^2 + AB + a_{11}B - a_{22}A}{a_{22}A - a_{11}B} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 互感线路各侧零序方向元件动作分析

对于M侧零序方向元件有:

$$\dot{U}_M / \dot{I}_M = -Z_7 + K_M Z_9 \quad (5)$$

假设线路阻抗和系统的零序阻抗均为纯电抗^[2],则 K_M 为实数,为了得到 K_M 的正负性,下面首先对 K_{M1} 和 K_{M2} 进行分析。

由于互感线路的特性有 $Z_1 > Z_m$ 和 $Z_2 > Z_m$,再由式(2)可得: $a_{11} > A, a_{22} > B$

$$-a_{11}B < -AB, -a_{22}B < -B^2$$

$$\begin{aligned} -K_{M1} &= a_{22}a_{33} - B^2 - AB + a_{11}B - a_{22}A > \\ &= a_{22}a_{33} - a_{22}B - a_{11}B + a_{11}B - a_{22}A = \\ &= a_{22}(Z_2 - Z_m + Z_4 + Z_5 + Z_8 + Z_{11}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{因为 } K_{M2} &= a_{22}a_{33} - B^2 - AB = \\ &= a_{22}a_{33} - B(Z_m + Z_9 + Z_{12}) \end{aligned}$$

同时由式(2)可得:

$$a_{22} > B, \quad a_{33} > Z_m + Z_9 + Z_{12}$$

$$-K_{M1}/K_{M2} > 0, \quad \text{即 } K_M = K_{M1}/K_{M2} < 0$$

同理可以得到: $K_N < 0, K_{P1}/K_{Q1} < 0$, 即 K_P 与 K_Q 一定异号。

由上述分析可以得到如下结论。

(1) 对于非故障线路PQ有:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{U}_P}{\dot{I}_P} &= -Z_8 + K_P Z_9 = -\frac{Z_C}{(Z_A + Z_C)/Z_3 + 1} + K_P \frac{Z_A Z_C}{Z_A + Z_C + Z_3} \\ \frac{\dot{U}_Q}{-\dot{I}_Q} &= -Z_{11} + K_Q Z_{12} = -\frac{Z_D}{(Z_B + Z_D)/Z_6 + 1} + K_Q \frac{Z_B Z_D}{Z_B + Z_D + Z_6} \end{aligned}$$

由于 K_P 和 K_Q 异号,可见PQ两侧的零序方向元件是否会误动取决于 Z_3 和 Z_6 的大小。 Z_3 和 Z_6 的大小分别代表了MP两侧、NQ两侧电气联系的强弱情况。

电气联系越强,即 Z_3 、 Z_6 越小,则 Z_8 、 Z_{11} 越小, Z_9 、 Z_{12} 越大,此时PQ两侧的零序方向元件同时判断为正方向故障的可能性越小,即误动可能性越小;相反电气联系越弱,即 Z_3 、 Z_6 越大,则 Z_8 、 Z_{11} 越大, Z_9 、 Z_{12} 越小,此时PQ两侧的零序方向元件同时判断为正方向故障的可能性越大,即误动可能性越大。

(2) 对于故障线路MN有:

$\dot{U}_M/\dot{I}_M = -Z_7 + K_M Z_9$ 和 $\dot{U}_N/\dot{I}_N = -Z_{10} + K_N Z_{12}$
 其中, $K_M < 0$, $K_N < 0$ 。可见M侧和N侧的零序方向元件都能正确判别出正方向故障, 与互感线路之间电气联系情况无关。

2 反方向出口处接地故障情况下的影响

由图1可以得到 K_2 处发生接地故障情况下的零序等值电路, 如图3所示。

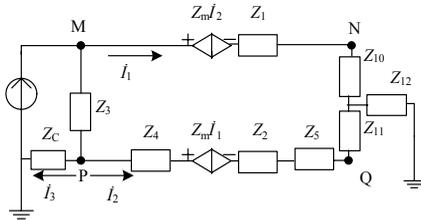


图3 K_2 处接地故障时零序等值网络

Fig.3 Zero-sequence equivalent network with earth fault at K_2

设 \dot{U}_{K1} 为短路点 K_2 处的零序电压。由图3可得:

$$\begin{bmatrix} a_{11}^1 & A^1 & 0 \\ A^1 & a_{22}^1 & B^1 \\ 0 & C^1 & a_{33}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{K2} \\ 0 \\ \dot{U}_{K2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} a_{11}^1 = Z_1 + Z_{10} + Z_{12} \\ a_{22}^1 = Z_2 + Z_4 + Z_5 + Z_{11} + Z_{12} \\ a_{33}^1 = Z_3 + Z_C \\ A^1 = Z_m + Z_{12} \\ B^1 = -Z_C \\ C^1 = Z_3 \end{cases} \quad (7)$$

通过求解式(6), 可以得到 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 和 \dot{I}_3 的具体表达式。 \dot{U}_{M2} 、 \dot{U}_{N2} 、 \dot{U}_{P2} 和 \dot{U}_{Q2} 分别为 K_2 处短路时线路MN和PQ两端保护安装处的零序电压, 此时对于M、N、P和Q侧零序方向元件分别有:

$$\begin{cases} \frac{\dot{U}_{M2}}{\dot{I}_{M2}} = \frac{(\dot{I}_2 + \dot{I}_3)Z_3 + \dot{I}_3 Z_C}{\dot{I}_1} = K_M^1 Z_3 + K_M^{\Pi} Z_C \\ \frac{\dot{U}_{N2}}{\dot{I}_{N2}} = \frac{(\dot{I}_1 + \dot{I}_2)Z_{12}}{-\dot{I}_2} = -K_{N2} Z_{12} \\ \frac{\dot{U}_{P2}}{\dot{I}_{P2}} = \frac{\dot{I}_3 Z_C}{\dot{I}_2} = K_{P2} Z_C \\ \frac{\dot{U}_{Q2}}{\dot{I}_{Q2}} = \frac{\dot{I}_2 Z_{11} + (\dot{I}_1 + \dot{I}_2)Z_{12}}{-\dot{I}_2} = -Z_{11} + K_{Q2} Z_{12} \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{cases} K_M^1 = \frac{K_1}{K_{MN}} = \frac{a_{11}^1 B + a_{33}^1 A + a_{11}^1 a_{22}^1 - (A^1)^2 + A^1 C^1}{a_{22}^1 a_{33}^1 - B^1 C^1 + A^1 B^1} \\ K_M^{\Pi} = \frac{K_2}{K_{MN}} = \frac{a_{11}^1 a_{22}^1 - (A^1)^2 + A^1 C^1}{a_{22}^1 a_{33}^1 - B^1 C^1 + A^1 B^1} \\ K_{N2} = \frac{K_5}{K_{MN}} = \frac{a_{22}^1 a_{33}^1 - B^1 C^1 + A^1 B^1 - a_{11}^1 B^1 - a_{33}^1 A^1}{a_{22}^1 a_{33}^1 - B^1 C^1 + A^1 B^1} \\ K_{P2} = \frac{K_3}{K_{PQ}} = \frac{-a_{11}^1 a_{22}^1 + (A^1)^2 - A^1 C^1}{a_{11}^1 B^1 + a_{33}^1 A^1} \\ K_{Q2} = \frac{K_4}{K_{PQ}} = \frac{a_{22}^1 a_{33}^1 - B^1 C^1 + A^1 B^1 - a_{11}^1 B^1 - a_{33}^1 A^1}{a_{11}^1 B^1 + a_{33}^1 A^1} \end{cases} \quad (9)$$

同理, 由于互感线路的特性有 $Z_1 > Z_m$ 和 $Z_2 > Z_m$, 再由式(7)可得: $a_{11}^1 > A$, $a_{22}^1 > A$, $a_{33}^1 > -B$,

经过具体分析可得: $K_M^1 > 0$, $K_M^{\Pi} > 0$, $K_{N2} > 0$, K_{P2} 与 K_{Q2} 异号。

从而得到以下结论。

(1) 对于线路PQ有:

$$\dot{U}_{P2}/\dot{I}_{P2} = K_{P2} Z_C$$

$$\frac{\dot{U}_{Q2}}{\dot{I}_{Q2}} = -Z_{11} + K_{Q2} Z_{12} = -\frac{Z_D}{(Z_B + Z_D)/Z_6 + 1} +$$

$$K_{Q2} \frac{Z_B Z_D}{Z_B + Z_D + Z_6}$$

由于 K_{P2} 与 K_{Q2} 异号, 可见当NQ之间电气联系越紧密 Z_6 越小, 而 Z_{11} 越小, Z_{12} 越大, 则两侧零序方向元件同时判断为正方向故障的可能性越小, 即纵联保护误动的可能性越小。

(2) 对于反方向出口处发生短路的线路MN:

$$\dot{U}_{M2}/\dot{U}_{M2} = K_M^1 Z_3 + K_M^{\Pi} Z_C \text{ 和 } \dot{U}_{N2}/\dot{U}_{N2} = -K_{N2} Z_{12}$$

其中, $K_M^1 > 0$, $K_M^{\Pi} > 0$, $K_{N2} > 0$, 可见M侧零序方向元件能正确判别出反方向故障, N侧零序方向元件能正确判别出正方向故障, 因此不论互感线路之间电气联系情况如何, 其纵联零序方向保护均不会误动。

3 互感线路几种常见形式的分析

由以上的分析可以得到, 对于故障线路MN而言, 不论其内部故障还是反方向出口处故障, 其纵联零序方向保护都不会误动; 对于线路PQ而言, 互感线路之间电气联系越弱误动的可能性越大。因此将借助在一般形式下推导出的表达式(3)和式(8), 重点分析线路PQ的纵联零序保护在几种常见的互感线路形式下的动作情况。

3.1 同杆并架双回线

同杆并架双回线是互感线路的一种典型的强电弱磁网络。对于同杆并架双回线, 图1中 $Z_3=Z_6=0$ 。

(1) 在线路MN内部发生接地故障的情况下,

$$\text{P侧: } \frac{\dot{U}_P}{\dot{I}_P} = K_P \frac{Z_A Z_C}{Z_A + Z_C}$$

$$\text{Q侧: } \frac{\dot{U}_Q}{\dot{I}_Q} = K_Q \frac{Z_B Z_D}{Z_B + Z_D}$$

由上文推导可知 K_P 和 K_Q 异号, 可见线路两端零序方向元件不会同时判断为正方向故障, 因此线路PQ的纵联零序保护不会误动。

(2) 在线路MN反方向出口发生接地故障的情况下, 对于线路PQ两端零序方向元件有:

$$\text{P侧: } \frac{\dot{U}_{P2}}{\dot{I}_{P2}} = K_{P2} Z_C$$

$$\text{Q侧: } \frac{\dot{U}_{Q2}}{\dot{I}_{Q2}} = K_{Q2} \frac{Z_B Z_D}{Z_B + Z_D}$$

由上文推导可知 K_{P2} 和 K_{Q2} 异号, 可见线路两端零序方向元件不会同时判断为正方向故障, 因此线路PQ的纵联零序保护不会误动。

3.2 两个电压等级的同杆架设

两个电压等级的同杆架设是互感线路的一种典型的弱电强磁网络。对于两个电压等级的同杆架设线路, 图1中 $Z_3=Z_6=\infty$ 。

1) 在线路MN内部发生接地故障的情况下, 对于线路PQ两端零序方向元件有:

$$\text{P侧: } \dot{U}_P / \dot{I}_P = -Z_C; \text{ Q侧: } \dot{U}_Q / \dot{I}_Q = -Z_D$$

可见线路两端零序方向元件同时判断为正方向故障, 因此线路PQ的纵联零序保护误动。

2) 在线路MN反方向出口发生接地故障的情况下, 对于线路PQ两端零序方向元件有:

$$\text{P侧: } \dot{U}_{P2} / \dot{I}_{P2} = K_{P2} Z_C; \text{ Q侧: } \dot{U}_{Q2} / \dot{I}_{Q2} = -Z_D$$

经过分析可得 $K_{P2} < 0$, 可见线路两端零序方向元件同时判断为正方向故障, 因此线路PQ的纵联零序保护误动。

4 仿真验证

采用PSCAD程序建立如图1所示的系统模型进行仿真验证。图中线路参数均用 Z_L 表示, 两互感线路长度均为100 km。线路基本参数为: $Z_{L1} =$

$(0.0486 + j0.2757) \Omega/\text{km}$, $Z_{L0} = (0.2245 + j0.8094) \Omega/\text{km}$, $Z_M = (0.059 + j0.3348) \Omega/\text{km}$ 。系统阻抗参数为: $Z_{A1} = Z_{A2} = 16.8 \Omega \angle 80^\circ$, $Z_{A0} = 32.1 \angle 80^\circ$; $Z_{B1} = Z_{B2} = 8.22 \Omega \angle 80^\circ$, $Z_{B0} = 9.65 \Omega \angle 80^\circ$; $Z_{C1} = Z_{C2} = 16.8 \Omega \angle 80^\circ$, $Z_{C0} = 32.1 \angle 80^\circ$; $Z_{D1} = Z_{D2} = 8.22 \Omega \angle 80^\circ$, $Z_{D0} = 9.65 \Omega \angle 80^\circ$ 。

经过仿真验证, MN线路的零序方向元件不论在其内部故障还是其反方向出口故障时, 均不受与相邻线路电气联系强弱的影响, 能够正确动作。

对于非故障线路来说, 零序电流为穿越性电流, 当零序互感造成线路两侧零序电压反向时, 零序方向元件将发生误判。如MN线路反方向出口故障, 线路MP, NQ均为100 km线路, 图4为MN线路两侧零序电压、零序电流波形图, M侧判断为反方向故障, N侧判断为正方向故障, 保护不会误动。图5为PQ两侧线路零序电压、零序电流波形图, 两侧均判断为正方向故障, 保护误动作。

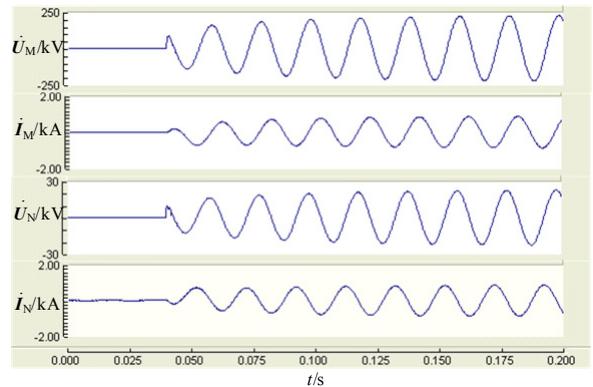


图4 MN线路两侧仿真波形

Fig.4 Simulation waveforms of line-MN both sides

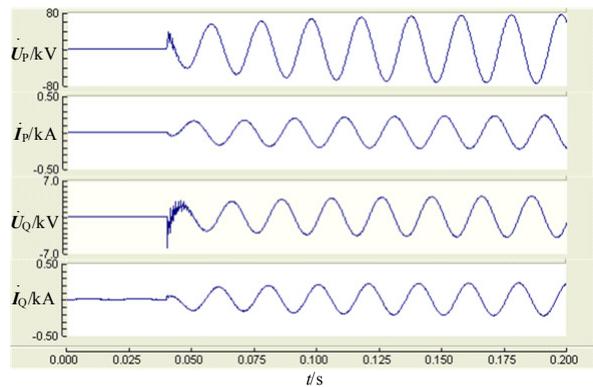


图5 PQ线路两侧仿真波形

Fig.5 Simulation waveforms of line-PQ both sides

5 结语

通过理论分析及仿真验证表明当本线路内部故

障或出口处反方向故障时, 该线路纵联零序方向保护不受零序互感的影响, 能够正确动作; 对于其相邻线路来说电气联系越紧密, 零序方向元件误动的可能性越小; 反之, 误动可能性越大。因此, 应综合考虑相邻互感线路纵联零序方向保护的配置^[6-10], 增加必要的防范措施, 确保电网稳定运行。

参考文献

[1] 李一泉, 焦邵麟, 张弛, 等. 平行线路纵联零序方向保护安全性分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 104-107.
LI Yi-quan, JIAO Shao-lin, ZHANG Chi, et al. Safety analysis on pilot zero sequence direction relay applied in parallel lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 104-107.

[2] 郭润生, 何彩红, 鄧建杰. 相邻线路零序互感对线路零序纵联方向保护的影响[J]. 继电器, 2004, 32(9): 71-73.
GUO Run-sheng, HE Cai-hong, ZHI Jian-jie. Influence of zero-sequence mutual inductance to pilot protection in parallel lines[J]. Relay, 2004, 32(9): 71-73.

[3] 康小宁, 梁振锋, 索南加乐. 相邻线路零序互感对平行双回线电流平衡保护的影响及改进措施[J]. 继电器, 2005, 33(20): 6-9.
KANG Xiao-ning, LIANG Zhen-feng, SUONAN Jia-le. Influence of zero-sequence mutual inductance to transverse differential current protection and approaches to the improved measures[J]. Relay, 2005, 33(20): 6-9.

[4] 曾耿晖, 黄明辉, 刘之尧, 等. 同杆线路纵联零序保护误动分析及措施[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 103-107.
ZENG Geng-hui, HUANG Ming-hui, LIU Zhi-yao, et al. Analysis and countermeasures of misoperation of zero sequence pilot protection on circuit lines of same pole[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 103-107.

[5] 胡宁, 郑罡, 胡志坚. 基于积分方程的互感线路参数带电测量研究[J]. 继电器, 2005, 33(16): 22-25.
HU Ning, ZHENG Gang, HU Zhi-jian. Study of live

line measurement of parameters of transmission lines with mutual inductance based on integral equations[J]. Relay, 2005, 33(16): 22-25.

[6] 李钢, 冯辰虎, 孙集伟, 等. 平行运行线路互感对纵联零序方向保护的影响[J]. 华北电力技术, 2007, 12: 1-4.
LI Gang, FENG Chen-hu, SUN Ji-wei, et al. Effects of mutual inductance of parallel transmission lines on longitudinal zero-sequence protection[J]. North China Electric Power, 2007, 12: 1-4.

[7] 朱景富. 零序互感对线路接地距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 113-115.
ZHU Jing-fu. Zero-sequence mutual inductance on the ground distance elements impact analysis[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 113-115.

[8] 高中德, 舒治淮, 王德林. 国家电网公司继电保护培训教材[J]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[9] 樊占峰, 叶东印, 李瑞生, 等. 平行线弱电强磁模型下零序方向元件改进[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 100-103.
FAN Zhan-feng, YE Dong-yin, LI Rui-sheng, et al. Improvement of zero-sequence directional relay for the parallel line with magnetically strong and electrically weak connection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 100-103.

[10] 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.

收稿日期: 2010-03-01; 修回日期: 2010-05-06

作者简介:

吴麟琳(1982-), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: aileenwu500@163.com

黄少锋(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护。

(上接第 23 页 continued from page 23)

[14] Watkins J C H, Dayan Peter. Q-learning [J]. Machine Learning, 1992, 8: 279-292.

[15] 张汝波. 强化学习理论及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2001: 69-100.

[16] Sutton R S, Barto A G. Reinforcement learning: an introduction [M]. Cambridge: MIT Press, 1998: 87-160.

[17] Kundur P. Power system stability and control[M]. McGraw-Hill, 1994.

收稿日期: 2010-02-25; 修回日期: 2010-06-10

作者简介:

余涛(1974-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为复杂电力系统的非线性控制理论和仿真研究; E-mail: taoyu1@scut.edu.cn

甄卫国(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定运行与控制。E-mail: zwg1116@126.com