

# 电力网超高压平行双回线路弱电强磁现象仿真研究

陈少华, 梁志雄, 孙何洪

(广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 同走廊出线架设的平行双回线之间存在零序互感, 产生一纵向零序电压源串接于线路。当 I 线故障时, I 线的 A 侧开关先动作跳开。从电网拓扑结构和理论分析表明, I 线和 II 线间此时存在较弱的电气联系和较强的电磁联系, 构成弱电强磁现象, 导致非故障 II 线两侧  $3U_0$  反相, 使零序功率方向元件误判为区内正向故障, 从而使保护误动作。通过比较和分析, 使 II 线两侧  $3U_0$  反相造成保护误动最主要原因是在 I、II 平行双回线路上形成弱电强磁现象。电力系统综合分析程序 PSASP 仿真结果也表明这一结论的正确性。

**关键词:** 弱电强磁; 平行双回线; 零序互感; 零序电压反相; 保护误动

## Simulation and research of weak current and strong magnetic phenomenon in EHV parallel double lines

CHEN Shao-hua, LIANG Zhi-xiong, SUN He-hong

(Automatization Academy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** There exists zero-sequence mutual induction between the parallel double lines run in the same corridor outlet, and it will form a longitudinal zero-sequence voltage source series connected in the lines. When fault occurs in the I line, the switch of A side in the I line operates first and trips, according to the topology conclusion of power network and theoretical analysis, weak current relation and strong magnetic relation are existing between I line and II line, it constitutes the weak current and strong magnetic phenomenon and causes tripler zero-sequence voltage opposite phase in the both sides of non-fault II line. It makes directional zero-order power component misjudge the direction of fault to regional forward direction and causes the protection malfunction. According to the comparison and analysis in the paper, the main reason that makes tripler zero-sequence voltage opposite phase in the both sides of non-fault II line so that the protection malfunction is the weak current and strong magnetic phenomenon that exists in the parallel double lines of I and II. The simulation result of power system analysis software package in the laboratory also indicates that the conclusion above is right.

**Key words:** weak current and strong magnetic; parallel double lines; zero-sequence mutual induction; zero-sequence voltage opposite phase; protection malfunction

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)22-0001-07

## 0 引言

随着国民经济的发展, 电力需求量也呈快速增长的趋势, 为了加快电网建设适应这一趋势同时也要有效利用土地和降低电力建设投资, 线路走廊越来越紧密。同杆和同走廊架设的双回线路将越来越多。因此在平行双回线中不可避免地出现更大的零序互感, 线路零序互感对线路继电保护的影响也日益严峻, 在许多情况下可能导致保护误动或拒动<sup>[1~3, 8, 12]</sup>。在弱电强磁<sup>[8]</sup>回路中, 将

会导致纵联零序保护误动。本文通过建立弱电强磁现象的线路模型, 深入分析其对纵联零序保护的影响, 并用 PSASP<sup>[13,14]</sup>仿真验证其结论的正确性。

## 1 弱电强磁现象简述

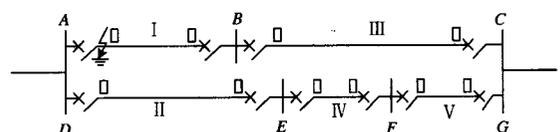


图 1 电网拓扑示意图

Fig.1 Topology schematic diagram of network

如图 1 超高压输电电网所示, I 线和 II 线间存在着较长距离的同杆架设平行线路。I 线 A 侧和 II 线 D 侧因共端点有着较强的电气联系, 而 B 侧和 E 侧需经多个变电站才连接 I 线和 II 线, 其电气联系较弱。II 线上装设了纵联零序保护。当 I 线发生单相接地故障时, 其 A 和 B 两侧保护动作相继切除故障, 设 A 侧保护先于 B 侧保护动作。当 A 侧保护动作而 B 侧保护未动作期间, I 线和 II 线间因为 A 侧保护动作破坏了原来较强的电气联系, 使 I 线和 II 线仅存较弱的电气联系。而两线因同杆平行架设存在着较强的零序互感, 有着强磁耦合关系。因此 I、II 线间形成弱电强磁联系, 并在 II 线上产生纵向零序电压源<sup>[2]</sup>, 影响了 II 线两侧对地电压, 最终导致 II 线两侧  $3U_0$  反相, II 线两侧纵联零序保护误动作先后跳闸。

### 2 弱电强磁与区内外故障电气量特征比较

通过比较表 1、表 2 和表 3 可以看出, 表 1 弱电强磁现象的第 1、2、3 点特征和表 3 区外发生单相接地故障的第 1、2、3 点特征相同。而第 4 点电气量特征不同。线路两侧  $3U_0$  反相既不符合表 2 区内故障时特点, 也不符合表 3 区外故障时特点。

表 1 弱电强磁现象时线路两侧电气量特征表

Tab.1 Line two-terminal electrical phasor characteristic in weak current and strong magnetic phenomenon

特征号	两侧故障量特征
1	线路两侧电流 $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$ 对应相反相
2	线路两侧 $3I_0$ 反相
3	线路两侧电压 $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 对应相同相
4	线路两侧 $3U_0$ 反相

表 2 区内发生单相接地故障时两侧电气量特征表

Tab.2 Line two-terminal electrical phasor characteristic in regional single-phase earth fault inside

特征号	两侧故障量特征
1	线路两侧电流 $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$ 对应相同相
2	线路两侧 $3I_0$ 同相
3	线路两侧电压 $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 对应相同相
4	线路两侧 $3U_0$ 同相

表 3 区外发生单相接地故障时两侧电气量特征表

Tab.3 Line two-terminal electrical phasor characteristic in regional single-phase earth fault inside

特征号	两侧故障量特征
1	线路两侧电流 $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$ 对应相反相
2	线路两侧 $3I_0$ 反相
3	线路两侧电压 $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 对应相同相
4	线路两侧 $3U_0$ 同相

注: 电流正方向规定为母线流向被保护线路

若排除保护装置本身存在问题的可能性, 从理论分析和仿真计算值上能够证明两侧  $3U_0$  反相, 即满足线路两侧  $3I_0$ 、 $3U_0$  均反相。根据零序功率方向元件动作原理, 判断为正方向区内故障, 等同于表 2 中真正发生区内故障时线路两侧  $3I_0$ 、 $3U_0$  均同相导致保护正确动作的效果。

### 3 弱电强磁引起保护误动的理论分析

为进一步清楚认识弱电强磁现象对纵联零序保护的影响。本文对有互感平行双回线的电网模型进行理论分析, 如图 2 所示。并设想 AB 线 A 侧发生

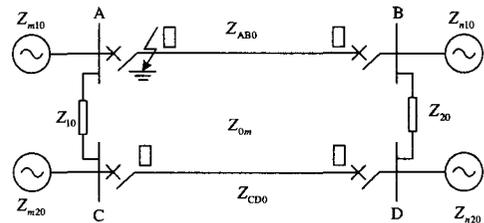


图 2 有互感平行双回线拓扑图

Fig.2 Topology diagram of parallel double lines in which mutual inductance exists

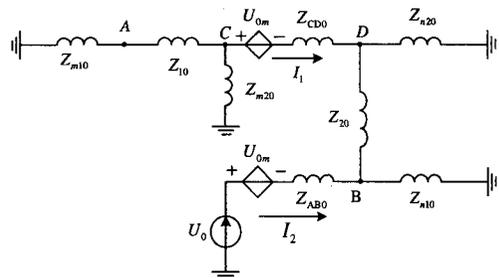


图 3 零序网络图

Fig.3 Zero-sequence network diagram

单相永久性接地故障, A 侧开关断开, 双回线存在互感  $Z_{0m}$ , A 侧和 C 侧用  $Z_{10}$  联系, B 侧和 D 侧用  $Z_{20}$  联系。在此故障情况下画出其零序回路图如图 3 所示, 经网络化简后进一步变成如图 4 所示。

考虑线路互感也同时忽略电阻影响, 设线路 AB、CD 两侧的系统零序阻抗相等, 有  $Z_{m10} = Z_{n10} = Z_{m20} = Z_{n20}$ , 线路 AB、CD 零序阻抗相等  $Z_{AB0} = Z_{CD0}$ 。根据每回线路的零序电压和由零序互感产生的零序电压源、KCL 方程, 可列出以下方程组 (假设电流正方向如 4 所示):

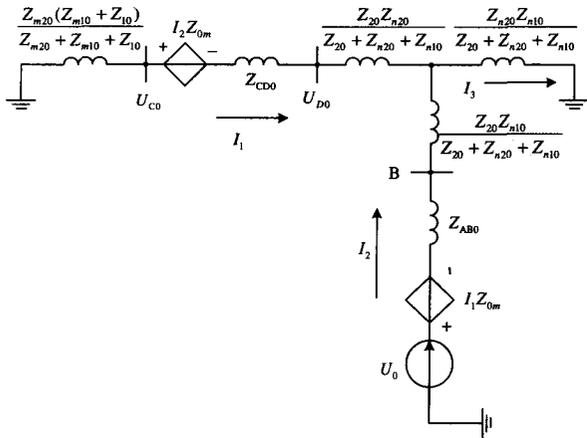


图 4 化简后的零序网络图

Fig.4 Zero-sequence network diagram after simplification

$$\begin{cases} U_0 = (Z_{AB0} + \frac{Z_{20}Z_{n10}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}})I_2 + \frac{Z_{20}Z_{n10}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}}I_3 + Z_{0m}I_1 \\ 0 - U_{D0} = \frac{Z_{n20}(Z_{n10}+Z_{10})}{Z_{n20}+Z_{n10}+Z_{10}} + Z_{CD0}I_1 + Z_{0m}I_2 \\ U_{D0} - 0 = \frac{Z_{20}Z_{n20}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}}I_1 + \frac{Z_{20}Z_{n10}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}}I_3 \\ U_{C0} = -I_1 \frac{Z_{n20}(Z_{n10}+Z_{10})}{Z_{n20}+Z_{n10}+Z_{10}} = U_{D0} + I_1 Z_{CD0} + I_2 Z_{0m} \\ I_1 + I_2 = I_3 \end{cases} \quad (1)$$

对方程组进行求解可求得:

$$U_{D0} = \frac{1}{Z} U_0 \left[ \frac{Z_{n20}Z_{n10}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}} (Z_{CD0} + \frac{Z_{m20}(Z_{m10}+Z_{10})}{Z_{m20}+Z_{m10}+Z_{10}}) - Z_{0m} (\frac{Z_{20}Z_{n10}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}} + \frac{Z_{20}Z_{n20}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}}) \right] \quad (2)$$

$$U_{C0} = \frac{1}{Z} U_0 \left( \frac{Z_{n20}Z_{n10}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}} + Z_{0m} \right) \cdot \frac{Z_{m20}(Z_{m10}+Z_{10})}{Z_{m20}+Z_{m10}+Z_{10}} \quad (3)$$

$$Z = [Z_{CD0} + \frac{Z_{20}Z_{n20}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}} + \frac{Z_{m20}(Z_{m10}+Z_{10})}{Z_{m20}+Z_{m10}+Z_{10}} - Z_{0m}] \cdot (\frac{Z_{20}Z_{n10}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}} + \frac{Z_{20}Z_{n10}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}}) + (\frac{Z_{n20}Z_{n10}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}} + Z_{0m})(Z_{AB0} + \frac{Z_{20}Z_{n10}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}} - Z_{0m})$$

由此可分析  $Z$  的表达式, 因为平行双回线中  $Z_{AB0} > Z_{0m}$ 、 $Z_{CD0} > Z_{0m}$ , 所以  $Z$  恒大于零 (即与系统阻抗角相同)。由式 (3) 可知  $U_{C0} > 0$  成立 (即与  $U_0$  同相位), 令式 (2) 中括号中的乘项

$$Z_{\Delta} = [\frac{Z_{n20}Z_{n10}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}} (Z_{CD0} + \frac{Z_{m20}(Z_{m10}+Z_{10})}{Z_{m20}+Z_{m10}+Z_{10}}) - Z_{0m} (\frac{Z_{n20}Z_{n10}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}} + \frac{Z_{20}Z_{n20}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}})] \quad (4)$$

显然, 当  $Z_{\Delta} < 0$  时, 有  $U_{D0}$  与  $U_{C0}$  反相位; 当  $Z_{\Delta} > 0$  时, 有  $U_{D0}$  与  $U_{C0}$  同相位。以下分析平行双回线两侧系统参数与线路阻抗、线路互感呈现什么关系时会使两侧零序电压反相, 从而可从有电气联系的互感线路、无电气联系的互感线路及其各种特殊情况进行分析。

① 当平行双回线之间不存在互感时, 即  $Z_{0m} = 0$ 。则有

$$Z_{\Delta} = \frac{Z_{n20}Z_{n10}}{Z_{20}+Z_{n20}+Z_{n10}} [Z_{CD0} + \frac{Z_{m20}Z_{m10}}{Z_{m20}+Z_{m10}}] > 0$$

$U_{D0} > 0$ 、 $U_{C0} > 0$ , 两侧零序电压不反相, 表明无互感的线路故障时不会对另一与之平行的线路纵联零序保护构成影响。

② 当平行双回线两端均共端点, 即两侧电气联系较强时, 有  $Z_{10} = 0$ ,  $Z_{20} = 0$ ,  $Z_{0m} \neq 0$ 。式 (4) 变成

$$[\frac{Z_{n20}Z_{n10}}{Z_{n20}+Z_{n10}} (Z_{CD0} + \frac{Z_{m20}Z_{m10}}{Z_{m20}+Z_{m10}}) - Z_{0m} \frac{Z_{n20}Z_{n10}}{Z_{n20}+Z_{n10}}] > 0$$

表明两侧电气联系均较强也存在互感时两侧零序电压不会反相。

③ 当平行双回线 A 侧和 C 侧共端点, 即左侧电气联系较强, 而右侧电气联系较弱时, 有  $Z_{10} = 0$ ,  $Z_{20} = \infty$ ,  $Z_{0m} \neq 0$ , 式 (4) 为  $Z_{\Delta} = -Z_{0m}Z_{n20} < 0$ 。表明断开侧虽然电气联系较强, 但右侧电气联系较弱并存在互感时仍会导致两侧零序电压反相。

④ 当平行双回线 B 侧和 D 侧共端点, 即左侧电气联系较弱, 而右侧电气联系较强时有  $Z_{10} = \infty$ ,  $Z_{20} = 0$ ,  $Z_{0m} \neq 0$ , 式 (4) 为

$$Z_{\Delta} = \frac{Z_{n20}Z_{n10}}{Z_{n20}+Z_{n10}} [Z_{CD0} + Z_{m20} - Z_{0m}] > 0$$

表明断开侧电气联系较弱, 而右侧电气联系较强并存在互感时两侧零序电压不会反相。

⑤ 当平行双回两侧均不共端点时, 即互感线路不存在任何电气联系时有  $Z_{10} = \infty$ ,  $Z_{20} = \infty$ ,  $Z_{0m} \neq 0$ , 式(4)为

$$Z_{\Delta} = -Z_{0m} Z_{n20} < 0$$

表明平行双回线电气上完全没有联系, 在故障线上流过零序电流时由于互感影响将在非故障线路上也产生零序感应电流, 使电网各点出现相应的零序电压, 也会导致两侧零序电压反相。

⑥ 当平行双回线的零序互感  $Z_{0m}$  越大, 非断开侧之间电气联系越弱 ( $Z_{20} \rightarrow \infty$ ), 且  $Z_{n10}$  越小而  $Z_{n20}$  越大时两侧零序电压越容易反相。极限情况是当  $Z_{n10} = 0$ , 假设为无穷大系统, 而  $Z_{20} \neq 0$ ,  $Z_{0m} \neq 0$ , 则式(4)为

$$Z_{\Delta} = -Z_{0m} \cdot \frac{Z_{20} Z_{n20}}{Z_{20} + Z_{n20}} < 0$$

两侧零序电压必然反相。

⑦ 当 AB 线左侧开关不跳时, 也可推导出  $U_{C0}$  和  $U_{D0}$  同相不会使纵联零序保护误动。

通过上述的理论分析得出, 使两侧零序电压反相引起纵联零序保护误动跟电的联系强弱程度和磁的联系强弱程度有着密切联系。电的联系越弱, 磁的联系越强, 误动的可能性就越大。

## 4 仿真计算及结果

### 4.1 仿真模型及参数设置

为了研究弱电磁现象对平行双回线保护的影响, 验证上述理论分析中电磁强弱程度与保护误动之间的关系, 利用电力系统综合分析程序 PSASP 进行大量仿真计算。仿真模型如图 5, 仿真模型的具体参数如下:

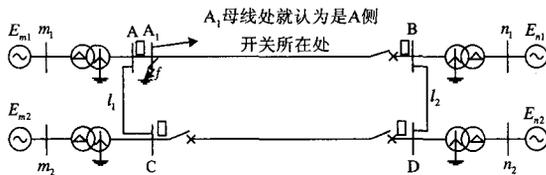


图 5 弱电磁 PSASP 仿真模型

Fig.5 Weak current and strong magnetic PSASP simulation model

各侧同步发电机采用模型 6 和参数组号 9<sup>[13]</sup>。基准容量  $S_B = 100$  MVA, d 轴同步、暂态、次暂态电抗  $X_d = 2.16$ ,  $X'_d = 0.265$ ,  $X''_d = 0.205$ , q 轴同步、暂态、

次暂态电抗  $X_q = 2.16$ ,  $X'_q = 0.53$ ,  $X''_q = 0.205$ ; 发电机转子惯性时间常数  $T_J = 8$  s, 发电机转子 d 轴励磁绕组定子开路时间常数  $T'_{d0} = 8.62$  s, 发电机转子 d 轴阻尼 D 绕组定子开路时间常数  $T'_{d0} = 0.05$  s, 发电机转子 q 轴阻尼 g 绕组定子开路时间常数  $T'_{g0} = 2.2$  s, 发电机转子 q 轴阻尼 Q 绕组定子开路时间常数  $T'_{q0} = 0.07$  s; 发电机饱和系数  $a = 0.9$ ,  $b = 0.00$ ,  $n = 9.0$ ; 发电机阻尼系数为  $D = 0$  s, 定子电阻为  $R_s = 0.000$ , 负序电抗  $X_2 = 0.205$ 。

各侧两绕组变压器高低压侧基准电压为 10.5 kV 和 230 kV, 左侧为 D/Y<sub>n</sub> 接法, 右侧为 Y<sub>n</sub>/D 接法, 归算到高压侧的数据为:

阻抗  $R_T = R_0 = 1.925 \Omega$ ,  $X_T = X_0 = 41.95 \Omega$ ;

导纳  $G_m = 3.698 \times 10^{-6}$  s,  $B_m = 20.76 \times 10^{-6}$  s;

同杆并架双回线路参数设置为:

$Z_1 = (0.0547 + j0.322) \Omega/\text{km}$ ,  $Z_0 = (0.0239 + j0.923) \Omega/\text{km}$

$C_0 = 0.00547 \mu\text{F}/\text{km}$ ,  $C_1 = 0.01185 \mu\text{F}/\text{km}$ ;

双回线路的零序互阻抗和零序互电容为:

$Z_{0m} = (0.0156 + j0.693) \Omega/\text{km}$ ,  $C_{0m} = 0.0026 \mu\text{F}/\text{km}$ ;

双回线路 AB 长 100 km, CD 长 99 km, 其中 AB 分为 AA<sub>1</sub> 和 A<sub>1</sub>B, AA<sub>1</sub> 长 1 km, A<sub>1</sub>B 长 99 km, A<sub>1</sub>B 和 CD 为 99 km 全线有互感线路; 母线 A<sub>1</sub> 表示在距 A 侧 K = 1 km 处增加的新母线名, 在 PSASP 仿真设置中 K = 1 km 处一般表示为线路 I 侧(此处为 A 侧)开关点<sup>[9]</sup>, 因此用母线 A<sub>1</sub> 代替了 A 侧的开关, 图 5 中 A 侧不再标上开关。母线 A 和母线 C 之间线路长度记为  $l_1$ , 母线 B 和母线 D 之间线路长度记为  $l_2$ 。故障点设置在母线 A<sub>1</sub> 处, 故障类型为单相接地短路, 接地阻抗为  $(1 + j15) \Omega$ , 故障起始时间  $T_s$  为 0 s, 结束时间  $T_e$  为 0.1 s。

### 4.2 仿真结果及讨论

我们可以把具有零序互感的线路分为三个基本类型<sup>[11]</sup>: ① 具有共同正序和零序电源的平行线路; ② 具有共同正序但不同零序电源的平行线路; ③ 没有共同正序和零序电源的平行线路。

所谓有共同正序电源是指平行线路在两端都接在同一母线上, 有共同零序电源是指平行线路在两端都具有共同的接地中性点。

若设  $l_1$ 、 $l_2$  长度分别有 0 km、20 km、50 km、100 km 和  $\infty$  km, 据上述定义可把该仿真中的零序互感线路分为:

(1)  $l_1 = 0$  km,  $l_2 = 20, 50, 100, \infty$  km 时: 左侧具有共同正序电源, 但不同零序电源; 右侧具有

不同正序电源和不同零序电源。

(2)  $l_1 = 20、50、100、\infty$  km,  $l_2 = 0$  km 时: 左侧具有不同正序电源和不同零序电源; 右侧具有共同正序电源, 但不同零序电源。

(3)  $l_1 = 0$  km,  $l_2 = 0$  km 时: 左右两侧具有共同正序电源, 但不同零序电源。

(4)  $l_1 = \infty$  km,  $l_2 = 20、50、100、\infty$  km 时: 左右两侧具有不同正序电源和不同零序电源。

(5)  $l_1 = 20、50、100$  km,  $l_2 = \infty$  km 时: 左右两侧具有不同正序电源和不同零序电源。

(6)  $l_1 = 20、50、100$  km 和  $l_2 = 20、50、100$  km 之间的任意组合时: 左右两侧具有不同正序电源和不同零序电源。

本仿真实验把设定的  $l_1、l_2$  五种长度在平行双回线路无互感和有互感的情况下各组成 25 个不同组合, 每种组合代表一种电气联系, 在每种电气联系下模拟单相接地故障。限于篇幅的关系, 文中只列出无互感和有互感情况下  $l_1 = 20$  km、 $l_1 = 50$  km 和  $l_1 = 100$  km 所对应的 15 种电气联系仿真结果, 如表 4、表 5, 两表中电压单位为 kV, 电流单位为 A。

表 4 无互感时 ( $l_1 = 20$  km、 $l_1 = 50$  km 和  $l_1 = 100$  km) 故障线和非故障线两侧的零序量

Tab.4 Two-terminal zero-sequence phasor of fault line and non-fault line which there is no mutual inductance ( $l_1 = 20$  km、 $l_1 = 50$  km、 $l_1 = 100$  km)

电气联系组合 /km	故障线零序量			
	A 侧零序电压 幅值及相位	A 侧零序电流 幅值及相位	B 侧零序电压 幅值及相位	B 侧零序电流 幅值及相位
$l_1 = 20$ $l_2 = 0$	56.291 $\angle 180.57^\circ$	212.2 $\angle 272.41^\circ$	17.871 $\angle 179.79^\circ$	245.7 $\angle 272.41^\circ$
$l_1 = 20$ $l_2 = 20$	56.448 $\angle 180.56^\circ$	208.0 $\angle 272.43^\circ$	17.057 $\angle 179.77^\circ$	251.8 $\angle 272.38^\circ$
$l_1 = 20$ $l_2 = 50$	56.717 $\angle 180.55^\circ$	210.1 $\angle 272.41^\circ$	17.381 $\angle 179.76^\circ$	251.4 $\angle 272.38^\circ$
$l_1 = 20$ $l_2 = 100$	57.161 $\angle 180.53^\circ$	212.8 $\angle 272.39^\circ$	17.737 $\angle 179.74^\circ$	252.0 $\angle 272.36^\circ$
$l_1 = 20$ $l_2 = \infty$	56.291 $\angle 180.57^\circ$	212.2 $\angle 272.41^\circ$	17.87 $\angle 179.79^\circ$	245.7 $\angle 272.41^\circ$
电气联系组合 /km	非故障线零序量			
	C 侧零序电压 幅值及相位	C 侧零序电流 幅值及相位	D 侧零序电压 幅值及相位	D 侧零序电流 幅值及相位
$l_1 = 20$ $l_2 = 0$	49.531 $\angle 180.53^\circ$	210.2 $\angle 92.39^\circ$	15.536 $\angle 179.74^\circ$	213.5 $\angle 272.36^\circ$

$l_1 = 20$ $l_2 = 20$	49.830 $\angle 180.51^\circ$	206.0 $\angle 92.41^\circ$	16.499 $\angle 179.73^\circ$	209.3 $\angle 272.37^\circ$
$l_1 = 20$ $l_2 = 50$	50.030 $\angle 180.50^\circ$	208.1 $\angle 92.39^\circ$	16.348 $\angle 179.71^\circ$	211.4 $\angle 272.36^\circ$
$l_1 = 20$ $l_2 = 100$	50.39 $\angle 180.48^\circ$	210.8 $\angle 92.37^\circ$	16.288 $\angle 179.68^\circ$	214.1 $\angle 272.34^\circ$
$l_1 = 20$ $l_2 = \infty$	49.537 $\angle 180.53^\circ$	210.2 $\angle 92.39^\circ$	15.526 $\angle 179.74^\circ$	213.5 $\angle 272.36^\circ$
电气联系组合 /km	故障线零序量			
	A 侧零序电压 幅值及相位	A 侧零序电流 幅值及相位	B 侧零序电压 幅值及相位	B 侧零序电流 幅值及相位
$l_1 = 50$ $l_2 = 0$	59.134 $\angle 180.66^\circ$	187.7 $\angle 272.46^\circ$	18.756 $\angle 179.87^\circ$	257.9 $\angle 272.50^\circ$
$l_1 = 50$ $l_2 = 20$	59.263 $\angle 180.63^\circ$	179.7 $\angle 272.48^\circ$	17.017 $\angle 179.83^\circ$	269.5 $\angle 272.43^\circ$
$l_1 = 50$ $l_2 = 50$	59.589 $\angle 180.62^\circ$	182.9 $\angle 272.47^\circ$	17.587 $\angle 179.83^\circ$	268.0 $\angle 272.43^\circ$
$l_1 = 50$ $l_2 = 100$	60.093 $\angle 180.61^\circ$	186.2 $\angle 272.44^\circ$	18.163 $\angle 179.82^\circ$	267.6 $\angle 272.42^\circ$
$l_1 = 50$ $l_2 = \infty$	59.134 $\angle 180.66^\circ$	187.7 $\angle 272.46^\circ$	18.756 $\angle 179.87^\circ$	257.9 $\angle 272.50^\circ$
电气联系组合 /km	非故障线零序量			
	C 侧零序电压 幅值及相位	C 侧零序电流 幅值及相位	D 侧零序电压 幅值及相位	D 侧零序电流 幅值及相位
$l_1 = 50$ $l_2 = 0$	44.141 $\angle 180.55^\circ$	187.3 $\angle 92.42^\circ$	13.834 $\angle 179.76^\circ$	190.2 $\angle 272.39^\circ$
$l_1 = 50$ $l_2 = 20$	44.909 $\angle 180.52^\circ$	179.3 $\angle 92.45^\circ$	15.874 $\angle 179.76^\circ$	182.4 $\angle 272.41^\circ$
$l_1 = 50$ $l_2 = 50$	44.987 $\angle 180.51^\circ$	182.4 $\angle 92.43^\circ$	15.456 $\angle 179.73^\circ$	185.4 $\angle 272.40^\circ$
$l_1 = 50$ $l_2 = 100$	45.228 $\angle 180.50^\circ$	185.8 $\angle 92.41^\circ$	15.155 $\angle 179.70^\circ$	188.8 $\angle 272.37^\circ$
$l_1 = 50$ $l_2 = \infty$	44.141 $\angle 180.55^\circ$	187.3 $\angle 92.42^\circ$	13.834 $\angle 179.76^\circ$	190.2 $\angle 272.39^\circ$
电气联系组合 /km	故障线零序量			
	A 侧零序电压 幅值及相位	A 侧零序电流 幅值及相位	B 侧零序电压 幅值及相位	B 侧零序电流 幅值及相位
$l_1 = 100$ $l_2 = 0$	62.699 $\angle 180.75^\circ$	156.7 $\angle 272.52^\circ$	19.866 $\angle 179.96^\circ$	273.1 $\angle 272.59^\circ$
$l_1 = 100$ $l_2 = 20$	62.834 $\angle 180.70^\circ$	146.3 $\angle 272.56^\circ$	17.033 $\angle 179.89^\circ$	291.6 $\angle 272.48^\circ$
$l_1 = 100$ $l_2 = 50$	63.264 $\angle 180.70^\circ$	150.0 $\angle 272.54^\circ$	17.898 $\angle 179.91^\circ$	289.0 $\angle 272.48^\circ$
$l_1 = 100$ $l_2 = 100$	63.864 $\angle 180.68^\circ$	153.8 $\angle 272.51^\circ$	18.741 $\angle 179.90^\circ$	287.5 $\angle 272.48^\circ$

$l_1=100$ $l_2=\infty$	62.698 $\angle 180.75^\circ$	156.7 $\angle 272.52^\circ$	19.866 $\angle 179.96^\circ$	273.1 $\angle 272.59^\circ$
电气联 系组合 /km	非故障线零序量			
	C侧零序电压 幅值及相位	C侧零序电流 幅值及相位	D侧零序电压 幅值及相位	D侧零序电流 幅值及相位
$l_1=100$ $l_2=0$	37.425 $\angle 180.59^\circ$	158.8 $\angle 92.45^\circ$	11.729 $\angle 179.79^\circ$	161.3 $\angle 272.42^\circ$
$l_1=100$ $l_2=20$	39.233 $\angle 180.51^\circ$	148.4 $\angle 92.48^\circ$	15.191 $\angle 179.78^\circ$	151.1 $\angle 272.44^\circ$
$l_1=100$ $l_2=50$	39.069 $\angle 180.50^\circ$	152.1 $\angle 92.46^\circ$	14.435 $\angle 179.73^\circ$	154.8 $\angle 272.43^\circ$
$l_1=100$ $l_2=100$	39.061 $\angle 180.49^\circ$	155.9 $\angle 92.44^\circ$	13.819 $\angle 179.70^\circ$	158.5 $\angle 272.40^\circ$
$l_1=100$ $l_2=\infty$	37.425 $\angle 180.59^\circ$	158.8 $\angle 92.45^\circ$	11.729 $\angle 179.79^\circ$	161.3 $\angle 272.42^\circ$

表 5 有互感时 ( $l_1 = 20$  km、 $l_1 = 50$  km 和  $l_1 = 100$  km) 故障线和非故障线两侧的零序量

Tab.5 Two-terminal zero-sequence phasor of fault line and non-fault line which there is mutual inductance ( $l_1 = 20$  km、 $l_1 = 50$  km、 $l_1 = 100$  km)

电气联 系组合 /km	故障线零序量			
	A侧零序电压 幅值及相位	A侧零序电流 幅值及相位	B侧零序电压 幅值及相位	B侧零序电流 幅值及相位
$l_1=20$ $l_2=0$	249.79 $\angle 179.78^\circ$	11.639 $\angle 270.60^\circ$	0.2889 $\angle 178.15^\circ$	4.053 $\angle 269.78^\circ$
$l_1=20$ $l_2=20$	251.29 $\angle 180.78^\circ$	11.616 $\angle 270.54^\circ$	0.2910 $\angle 176.15^\circ$	4.088 $\angle 271.82^\circ$
$l_1=20$ $l_2=50$	253.57 $\angle 179.77^\circ$	11.701 $\angle 271.62^\circ$	0.2938 $\angle 177.14^\circ$	4.087 $\angle 269.75^\circ$
$l_1=20$ $l_2=100$	257.46 $\angle 179.76^\circ$	11.912 $\angle 269.56^\circ$	0.2989 $\angle 178.12^\circ$	4.123 $\angle 270.75^\circ$
$l_1=20$ $l_2=\infty$	249.79 $\angle 179.78^\circ$	11.675 $\angle 272.60^\circ$	0.2889 $\angle 179.15^\circ$	4.095 $\angle 269.78^\circ$
电气联 系组合 /km	非故障线零序量			
	C侧零序电压 幅值及相位	C侧零序电流 幅值及相位	D侧零序电压 幅值及相位	D侧零序电流 幅值及相位
$l_1=20$ $l_2=0$	249.57 $\angle 179.78^\circ$	4.251 $\angle 89.78^\circ$	0.2889 $\angle 177.15^\circ$	4.012 $\angle 269.78^\circ$
$l_1=20$ $l_2=20$	251.06 $\angle 148.78^\circ$	4.076 $\angle 90.75^\circ$	0.2907 $\angle 178.14^\circ$	4.035 $\angle 271.75^\circ$
$l_1=20$ $l_2=50$	253.34 $\angle 109.77^\circ$	4.012 $\angle 89.75^\circ$	0.2938 $\angle 175.14^\circ$	4.063 $\angle 270.75^\circ$
$l_1=20$ $l_2=100$	257.23 $\angle 61.76^\circ$	4.122 $\angle 89.75^\circ$	0.2988 $\angle 172.22^\circ$	4.135 $\angle 269.75^\circ$

$l_1=20$ $l_2=\infty$	249.57 $\angle 19.78^\circ$	4.087 $\angle 88.78^\circ$	0.2889 $\angle 179.15^\circ$	4.074 $\angle 269.78^\circ$
电气联 系组合 /km	故障线零序量			
	A侧零序电压 幅值及相位	A侧零序电流 幅值及相位	B侧零序电压 幅值及相位	B侧零序电流 幅值及相位
$l_1=50$ $l_2=0$	255.92 $\angle 179.71^\circ$	3.976 $\angle 272.20^\circ$	0.2960 $\angle 176.08^\circ$	4.109 $\angle 269.72^\circ$
$l_1=50$ $l_2=20$	257.45 $\angle 180.71^\circ$	3.971 $\angle 274.18^\circ$	0.2981 $\angle 176.08^\circ$	4.126 $\angle 270.72^\circ$
$l_1=50$ $l_2=50$	259.83 $\angle 179.70^\circ$	3.977 $\angle 275.16^\circ$	0.3011 $\angle 177.07^\circ$	4.127 $\angle 269.69^\circ$
$l_1=50$ $l_2=100$	263.90 $\angle 179.69^\circ$	4.010 $\angle 274.11^\circ$	0.3063 $\angle 179.05^\circ$	4.209 $\angle 271.69^\circ$
$l_1=50$ $l_2=\infty$	255.92 $\angle 179.71^\circ$	3.938 $\angle 273.20^\circ$	0.2960 $\angle 178.08^\circ$	4.117 $\angle 270.72^\circ$
电气联 系组合 /km	非故障线零序量			
	C侧零序电压 幅值及相位	C侧零序电流 幅值及相位	D侧零序电压 幅值及相位	D侧零序电流 幅值及相位
$l_1=50$ $l_2=0$	255.69 $\angle 168.71^\circ$	4.174 $\angle 89.72^\circ$	0.2959 $\angle 177.08^\circ$	4.155 $\angle 269.72^\circ$
$l_1=50$ $l_2=20$	257.22 $\angle 139.71^\circ$	4.175 $\angle 89.68^\circ$	0.2978 $\angle 176.07^\circ$	4.160 $\angle 269.68^\circ$
$l_1=50$ $l_2=50$	259.61 $\angle 120.84^\circ$	4.176 $\angle 89.69^\circ$	0.3010 $\angle 176.19^\circ$	4.171 $\angle 271.69^\circ$
$l_1=50$ $l_2=100$	263.67 $\angle 59.69^\circ$	4.217 $\angle 87.69^\circ$	0.3063 $\angle 175.05^\circ$	4.226 $\angle 269.69^\circ$
$l_1=50$ $l_2=\infty$	255.69 $\angle 8.91^\circ$	4.156 $\angle 88.72^\circ$	0.2959 $\angle 176.18^\circ$	4.178 $\angle 270.72^\circ$
电气联 系组合 /km	故障线零序量			
	A侧零序电压 幅值及相位	A侧零序电流 幅值及相位	B侧零序电压 幅值及相位	B侧零序电流 幅值及相位
$l_1=100$ $l_2=0$	267.05 $\angle 179.58^\circ$	3.236 $\angle 273.05^\circ$	0.3088 $\angle 176.95^\circ$	4.237 $\angle 269.59^\circ$
$l_1=100$ $l_2=20$	268.52 $\angle 178.58^\circ$	3.329 $\angle 272.06^\circ$	0.3109 $\angle 178.96^\circ$	4.341 $\angle 270.63^\circ$
$l_1=100$ $l_2=50$	271.10 $\angle 179.57^\circ$	3.317 $\angle 270.18^\circ$	0.3141 $\angle 179.94^\circ$	4.348 $\angle 271.57^\circ$
$l_1=100$ $l_2=100$	275.51 $\angle 179.56^\circ$	3.356 $\angle 269.12^\circ$	0.3197 $\angle 176.92^\circ$	4.410 $\angle 269.54^\circ$
$l_1=100$ $l_2=\infty$	267.05 $\angle 180.58^\circ$	3.235 $\angle 260.05^\circ$	0.3088 $\angle 177.95^\circ$	4.240 $\angle 269.59^\circ$
电气联 系组合 /km	非故障线零序量			
	C侧零序电压 幅值及相位	C侧零序电流 幅值及相位	D侧零序电压 幅值及相位	D侧零序电流 幅值及相位

$I_1=100$	266.66	4.243	0.3087	4.262
$I_2=0$	$\angle 170.58^\circ$	$\angle 89.59^\circ$	$\angle 176.95^\circ$	$\angle 269.59^\circ$
$I_1=100$	268.13	4.251	0.3104	4.265
$I_2=20$	$\angle 149.88^\circ$	$\angle 89.53^\circ$	$\angle 181.94^\circ$	$\angle 270.53^\circ$
$I_1=100$	270.71	4.362	0.3139	4.326
$I_2=50$	$\angle 97.57^\circ$	$\angle 89.57^\circ$	$\angle 178.94^\circ$	$\angle 269.57^\circ$
$I_1=100$	275.11	4.426	0.3196	4.441
$I_2=100$	$\angle 49.56^\circ$	$\angle 88.54^\circ$	$\angle 182.92^\circ$	$\angle 269.54^\circ$
$I_1=100$	266.66	4.238	0.3087	4.258
$I_2=\infty$	$\angle 17.58^\circ$	$\angle 89.59^\circ$	$\angle 189.95^\circ$	$\angle 271.59^\circ$

表 4、表 5 中所列的无互感和有互感情况下各 15 种电气联系的 PSASP 仿真结果表明:当平行线路间不存在零序互感时,线路两侧电气联系的强弱程度不会是造成保护误动的原因,区内故障和区外故障的零序电气量特征能使保护正确区分,保护正确动作率高。而平行线路间存在零序互感时且强互感时(本仿真所取的互感抗值约为平行线路零序电抗值的 75%),区内故障正确动作率也较高,不受电气联系强弱程度的影响;但区外平行线路两侧零序电压量随电气联系的减弱呈现反相的趋势,符合弱电强磁两侧零序量特征,当两侧零序电流和零序电压均反相时,保护误动的可能性极大,这正与上述理论分析一致。

## 5 结语

随着电网建设的快速发展和线路走廊紧密程度的紧迫,平行双回线路和多回线路将进一步成为电网的重要组成部分,弱电强磁现象对纵联零序保护的影响和其他保护的影响也势必成为继电保护和故障分析研究中的主要问题。所以一方面需要更深入地研究弱电强磁现象对电网运行的影响,故障分析、防误动措施及其在弱电强磁因素影响下的同杆并架双回线保护方案研究显得尤为重要;另一方面综合考虑弱电强磁现象对存在强互感的平行双回、多回线路的整定计算影响,如何保证整定计算值满足该类线路发生弱电强磁现象时保护能正确动作将是下一步研究工作的重点。

## 参考文献

- [1] 贺家李,宋从矩.电力系统继电保护原理(增订版)[M].北京:中国电力出版社,2004.  
HE Jia-li,SONG Cong-ju.The Protective Principle of Relay in Electric Power System(Revised and Enlarged Edition) [M].Beijing: China Electric Power Press,2004.
- [2] 国家电力调度通信中心.电力系统继电保护实用技术问答(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2004.  
State Electric Power Dispatching & Communication

- Centre. Questions and Answers for the Practical Technology of Relay Protection in Electric Power System(Second Edition) [M]. Beijing:China Electric Power Press,2004.
- [3] 许正亚.输电线路新型距离保护[M].北京:中国水利水电出版社,2002.  
XU Zheng-ya.The New-style Distance Protection of Transmission Line[M]. Beijing: China Water Power Press,2002.
- [4] 何仰赞,温增银.电力系统分析(第三版,上、下册)[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.  
HE Yang-zan,WEN Zeng-yin.The Analysis of Power System(Third Edition,Above and Below Volume) [M].Wuhan:Huazhong University of Science and Technology Press,2002.
- [5] 许正亚.电力系统故障分析[M].北京:水利电力出版社,1993.  
XU Zheng-ya.The Analysis of Fault in Power System[M].Beijing: Hydraulic and Electric,1993.
- [6] 龚震东,范春菊,郁惟镛,等.一种基于六序网图的同杆双回线故障测距算法[J].电力系统自动化,2007,31(17).  
GONG Zhen-dong, FAN Chun-ju, YU Wei-yong,et al.A New Fault Allocation Algorithm for Parallel Transmission Line Based on Six Sequence Network[J].Automation of Electric Power Systems, 2007,31(17).
- [7] 孟恒信,朱良肄,张涛.双回线跨线故障及保护动作行为分析[J].电力系统自动化,2006,30(18).  
MENG Heng-xin,ZHU Liang-yi,ZHANG Tao.Analysis of Overhead Line Fault and Protection of Double-circuit Transmission Lines[J].Automation of Electric Power System, 2006,30(18).
- [8] 曾耿晖,黄明辉,刘之尧,等.同杆纵联零序保护误动分析及措施[J].电力系统自动化,2006,30(20).  
ZENG Geng-hui,HUANG Ming-hui, LIU Zhi-yao,et al.The Analysis of Malfunction for Pilot Zero-sequence Protection on the Same Pole and its Measure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(20).
- [9] 梁振锋,康小宁,索南加乐.基于故障类型的同杆双回线故障分量提取算法[J].电力系统自动化,2005,29(20).  
LIANG Zhen-feng, KANG Xiao-ning, SUONAN Jia-le.Novel Fault Components Extraction Approach for Double-circuit Transmission Lines on One Pole[J].Automation of Electric Power Systems, 2005,29(20).
- [10] 傅旭,王锡凡.同杆双回线断相计算的解耦相分量法[J].电力系统自动化,2004,28(6).  
FU Xu, WANG Xi-fan. A Decoupling Domain Method to Calculate Open Conductor Faults in the Double Circuit Line on the Same Pole [J].Automation of Electric Power Systems,2004,28(6).
- [11] 傅旭,王锡凡.同杆双回线跨线短路故障计算的等值双端电源相分量法[J].电力系统自动化,2004,28(7).

[7] 陈星莺, 李华昌, 廖迎春, 等. 不完全信息下的供电公司最优竞价策略[J]. 电力需求侧管理, 2006, 8(4): 12-15.  
CHEN Xing-ying, LI Hua-chang, LIAO Ying-chen, et al. Optimal Bidding Strategies for Distribution Companies with Incomplete Information[J]. Power DSM, 2006, 8(4): 12-15.

[8] 王秀丽, 周鹏, 王锡凡. 发/供电公司市场均衡及竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(6): 6-10.  
WANG Xiu-li, ZHOU Peng, WANG Xi-fan. Market Equilibrium and Bidding Strategies of Generation/distribution Companies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(6): 6-10.

[9] 陈星莺, 谢俊. 计及风险的输配电分离电力市场供电公司最优竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 13-17.  
CHEN Xing-ying, XIE Jun. Risk-constrained Optimal Bidding Strategies for Distribution Companies in Transmission and Distribution Separated Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 13-17.

[10] 段登伟, 刘俊勇. 基于不完全信息静态博弈论的购电商竞价策略研究[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(7): 10-14.  
DUAN Deng-wei, LIU Jun-yong. Buyer's Bidding Strategies Based on the Static Game Theory with Incomplete Information[J]. Electric Power Automation

Equipment, 2003, 23(7): 10-14.

[11] 谢俊, 陈星莺. 单一卖方电力市场供电公司最优报价策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 68-73.  
XIE Jun, CHEN Xing-ying. Optimal Bidding Strategies for Distribution Companies in Single-seller Electricity Markets[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 68-73.

[12] 尚金成, 张兆峰, 韩刚. 区域供电电力市场交易机理与交易模型的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 6-14.  
SHANG Jin-cheng, ZHANG Zhao-feng, HAN Gang. Study on Transaction Mechanism and Model of Regional Layered Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 6-14.

收稿日期: 2008-01-25; 修回日期: 2008-05-17

作者简介:

谭忠富(1964-), 男, 教授, 博士后, 博士生导师, 电力经济研究所所长, 主要从事电力经济、风险管理理论的研究; E-mail: tanzhongfu@sina.com

王锦斌(1979-), 男, 博士研究生, 主要从事电力经济的研究;

尚金成(1966-), 男, 博士, 主要从事电力系统(电网)优化调度、电力市场竞价交易理论及风险管理、发电厂电度管理与竞价上网辅助决策研究。

(上接第7页 continued from page 7)

FU Xu, WANG Xi-fan. An Equivalent Two Source Phase Domain of Interline Fault Analysis for the Double Circuit Line on the Same Pole[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7).

[12] 郭润生, 何彩虹, 邴建杰. 相邻线路零序互感对线路零序保护零序纵联方向保护的影响[J]. 继电器, 2004, 32(9).  
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).

[13] 中国电力科学研究院. 电力系统分析综合程序—基础数据库, 用户手册[M]. 北京: 中国电力科学研究院, 2001.  
Electric Power Research Institute, China. Power System Analysis Software Package-Common Database, User's Manual[M]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2001.

[14] 中国电力科学研究院. 电力系统分析综合程序—短路计算, 用户手册[M]. 北京: 中国电力科学研究院, 2001.  
Electric Power Research Institute, China. Power System Analysis Software Package-Short Circuit Calculation, User's Manual[M]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2001.

收稿日期: 2008-01-14; 修回日期: 2008-04-23

作者简介:

陈少华(1954-), 女, 教授, 长期从事电力系统继电保护与自动装置的教学与研究工作;

梁志雄(1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统安全运行与控制、继电保护与整定计算; E-mail: gduitzx1982@126.com

孙何洪(1972-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统安全运行与控制。