

# 非全程同杆四回线故障选线新方法

舒巧俊, 陈松石, 范春菊, 白恒远

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 基于同杆四回线内部故障时反序分量的特点, 提出利用同杆四回线反序正序电流量进行故障区域判断, 再利用正常线路推算所得四回线与另外两条单回线路相交处母线(记为T点)的电压值作为参考量, 设定电压突变量参数来判断故障线路, 并结合故障支路正序电流的特点来对四回线的跨线故障进行故障选线, 得出了适用于非全程同杆四回线的新型故障选线方法。通过大量 ATP 仿真证明该方法的正确性, 该方法从原理上可完全消除过渡电阻、系统运行方式、及系统阻抗参数变化等因素的影响, 解决了非全程同杆四回线故障选线问题。

**关键词:** 非全程; 同杆四回线; 故障选线; 反序分量; 电压突变量

## A new method of fault line selection for incomplete-journey four-jointed parallel line on the same tower

SHU Qiao-jun, CHEN Song-shi, FAN Chun-ju, BAI Heng-yuan

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** According to characteristics of the differential sequence component of four-jointed parallel line (FJPL) inner fault, a method of judging fault section using differential sequence current and positive sequence current of FJPL is proposed. Taking the magnitude of voltage of the buses between FJPL and the other two single lines calculated from normal line as reference value, setting the mutational voltage parameters, the fault line can be judged. Combined with the characteristics of positive sequence current of branch fault line, the fault line selection for the across-the-line fault of FJPL can be realized, and a novel fault line selection method applicable to incomplete-journey FJPL is obtained. The results of ATP simulation verify the correctness of the method, and show that it can eliminate the effects of such factors as faulted resistance, system operating mode and system resistance changing completely, and can solve the fault line selection problem in incomplete-journey FJPL system.

**Key words:** incomplete-journey; four-jointed parallel line; fault line selecting; differential sequence components;  $\Delta U$

中图分类号: TM711; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)19-0130-07

## 0 引言

复杂系统故障时, 准确的故障选线是测距的重要前提。随着电力网络规模逐渐增大, 输电线走廊日趋紧张, 其费用在线路建设投资中占的比例越来越大。为节约走廊用地, 采用同杆四回线, 有很大的实际应用价值, 也是今后发展的趋势。

在德国, 最多为同杆六回, 同杆四回路是常规, 政府规定凡新建线路必须同杆架设两回以上<sup>[1]</sup>, 由于走廊投资占总投资 20%~30%, 多回路具有良好的经济效益。日本最多为八回, 110 kV 以上多数为四回, 500 kV 以上至少为两回<sup>[1]</sup>。我国已出现多条同杆四回路架设的输电线路, 如大连—沈阳同杆四回线, 长 180 km 左右, 塔身上下两条分别为 500 kV 和 220 kV, 建成并投入使用; 北京地区 500 kV 同

塔四回线路投入使用<sup>[2]</sup>, 此外还有上海地区黄渡变电站出口同杆四回线建设完成, 长 20 km, 而这些四回线又与其他类型线路, 如单回线, 双回线等相连接, 从而形成非全程同杆并架四回线的输电系统。

本文选取非全程同杆四回线系统进行研究, 研究了同杆双回线<sup>[3-10]</sup>和同杆四回线<sup>[11-12]</sup>反序电流特点, 得到判断同杆四回线区内、区外故障的方法, 再根据经过不同回路由系统母线端推算所得 T 点电压值与故障线路的关系得出故障选线方法, 又结合四回线故障支路正序电流的特点得出四回线跨线故障选线方法, 从而对整个非全程同杆四回线的每一条线路进行故障选线。

## 1 基于反序量的故障区域判断

文献[13]提出了适用于同杆四回线的分析方法

——12序分量法,为同杆四回线故障分析<sup>[11]</sup>、选线<sup>[12]</sup>和测距等奠定了基础。该方法指出,当同杆四回线内部故障时,各回线中的电流可以分为同序电流和反序电流,同序电流指各回线所共有的电气量,而反序电流是表征各回线电流差异大小的电气量,这里分别用f、g、h三个反序电流量表示I和II,II和III,III和IV之间的反序电流。

同杆四回线是并联运行状态,当线路参数相同时,在非内部故障时,四回线所流过的电流大致相等,表征各回线之间电流差量大小的反序量为零;在内部故障时,故障回路流过的电流和其余各回路所流过电流差异很大,表征电流差量大小的反序量较大。同杆四回线反序量的特点可用来判别非全程同杆四回线内部和外部故障。

非全程同杆四回线系统见图1,其中,T点成为支接点,XT为同杆四回线,YT和ZT为单回线。测出XYZ三端电气量,X端四回线各相电流量记为 $\dot{I}_{ij}$ , $i=I、II、III、IV$ , $j=A、B、C$ ,根据12序分量法,通过M矩阵可以消去同杆四回线相间互感和线间互感,将十二相电流值转化为完全独立的十二序分量,如式(1)所示,其中各参数含义,见文献[13]。

$$\dot{I}_{efgh012} = M^{-1} \dot{I}_{I,II,III,IVABC} \quad (1)$$

由式(1)计算反序正序电流,初步判断故障区域<sup>[13]</sup>,若反序电流出现,则故障在四回线内部;否则故障在四回线外部,即YT或ZT支路故障<sup>[3]</sup>。

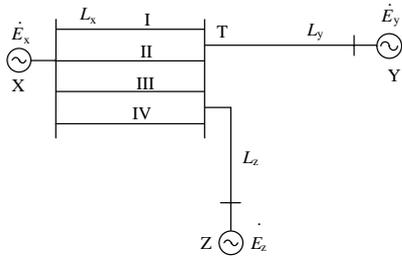


图1 系统结构图

Fig.1 Diagram of system structure

## 2 故障支路判断方法

初步判断故障区域后,需进一步判断是四回线的I、II、III、IV还是YT、ZT中的哪一支路发生了故障,可用电压突变量法进行判断。

### 2.1 电压突变量的定义

因为任何短路均含有正序故障分量,因此以下讨论均在正序分布参数线路进行。分别沿 $X_1T$ 、 $X_{II}T$ 、 $X_{III}T$ 、 $X_{IV}T$ 、YT、ZT由线路始端母线处电气量推求线路支接点T的正序电压,以双下标表示为

$\dot{U}_{i,T}$ , ( $i=I,II,III,IV,y,z$ ),如公式(2)所示。

$$\begin{cases} \dot{U}_{i,T} = \dot{U}_i^1 - (\dot{I}_i^1 - \dot{U}_i^1 \frac{Y_i}{2}) Z_i, i=I,II,III,IV,y,z \\ \Delta U_{i,k} = |\dot{U}_{i,T} - \dot{U}_{k,T}|, i \neq k \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\dot{U}_i^1, \dot{I}_i^1$ 分别表示*i*回路系统母线处的正序电压和经*i*回路流向T点的正序电流; $Z_i, Y_i$ 分别为各回线路的阻抗和导纳; $\Delta U_{i,k}$ 是利用各电压值定义的电压突变量。

当非全程同杆四回线系统正常运行时,由X、Y、Z三端电气量通过 $X_1T, X_{II}T, X_{III}T, X_{IV}T, YT, ZT$ 向T节点计算的正序电压理论上是相等的,而当系统中有支路故障时,就会破坏这种平衡性,因此可利用比较由不同支路推算到T处电压突变量来判定故障支路。

### 2.2 四回线外部故障时的故障支路判别方法

判断出四回线外部故障后,利用电压量突变法判断YT或ZT支路故障。由于四回线内部无故障,可任意选择一回正常线路去推算T点电压作为参考量,选择I回线为例作说明。如果YT、ZT线路没有故障,则由YT、ZT支路参数推求所得T处电压和由I回线推求所得T处电压理论上相等,即 $\dot{U}_{y,T} = \dot{U}_{z,T} = \dot{U}_{I,T}$ ,所以 $\Delta U_{I,y} = |\dot{U}_{I,T} - \dot{U}_{y,T}| = \Delta U_{I,z} = |\dot{U}_{I,T} - \dot{U}_{z,T}| = 0$ 。但是如果YT或ZT线路出现了故障,情况就有所不同了,例如YT支路故障, $\dot{U}_{y,T}$ 和 $\dot{U}_{I,T}$ 存在一定的差值,但是 $\dot{U}_{I,T}$ 与 $\dot{U}_{z,T}$ 的差值理论上为零,借此可作出故障支路的判断。假设Y支路发生A相接地故障,则系统正序图如图2所示。

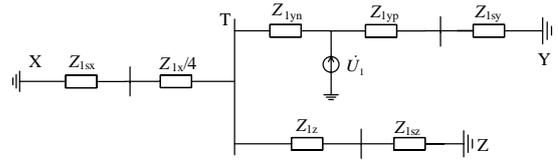


图2 YT支路故障时的正序序网图

Fig.2 Positive-sequence network in YT

通过短路计算可以得到正序网等值电势如式(3)所示:

$$\dot{U}_k = \frac{E_x Z_z (Z_{1yp} + Z_{1sy}) + E_z Z_x (Z_{1yp} + Z_{1sy}) + E_y E}{A} \quad (3)$$

其中, $\dot{E}_x, \dot{E}_y, \dot{E}_z$ 分别为X、Y、Z三端的电源电压,各阻抗如图2所示。在式(3)中, $Z_x = Z_{1sx} + Z_{1mn}, Z_{1mn} = \frac{Z_{1x}}{4}$ 为同杆四回线的并联阻抗,这里假设四回线参数相等,自阻抗和自导纳分

别为  $Z_{1x}, Y_{1x}$ , YT 与 ZT 单回线支路参数相同, 即  $Z_{1y} = Z_{1z} = Z_1$ ,  $Y_{1y} = Y_{1z} = Y_1$ ,  $Z_y = Z_{1sy} + Z_1$ ,  $Z_{1yn} = aZ_1$ ,  $Z_z = Z_{1sz} + Z_1$ ,  $A = (Z_z + Z_x)Z_y + Z_zZ_x$ ,  $E = Z_zZ_x + Z_{1yn}(Z_z + Z_x)$ 。

则短路点处零正负序电流计算<sup>[14]</sup>如式 (4)。

$$\dot{i} = \dot{i}_0 = \dot{i}_1 = \dot{i}_2 = \dot{U}_k / \sum_{j=0}^2 Z_{ffj} \quad (4)$$

其中  $Z_{ffj} (j = 0, 1, 2)$  为零正负各序网的等值阻抗, 从各序网中可计算得到<sup>[14]</sup>。由此求得由 T、Y 母线流向故障点的正序电流, 及 X、Z 母线流向 T 的正序电流, 从而求得相应正序电压, 如式 (5)、式 (6) 所示:

$$\begin{cases} \dot{i}_t^1 = \frac{(Z_{1yp} + Z_{1sy})(Z_x + Z_z)}{A} \dot{i} \\ \dot{i}_y^1 = \frac{E}{(Z_{1yp} + Z_{1sy})(Z_x + Z_z)} \dot{i}_t^1 \\ \dot{i}_x^1 = \frac{Z_z}{Z_x + Z_z} \dot{i}_t^1 \\ \dot{i}_z^1 = \frac{Z_x}{Z_x + Z_z} \dot{i}_t^1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_t^1 = Z_{1yn} \dot{i}_t^1 \\ \dot{U}_y^1 = \dot{i}_y^1 Z_{1yp} = \frac{EZ_{1yp}}{(Z_{1yp} + Z_{1sy})(Z_x + Z_z)} \dot{i}_t^1 \\ \dot{U}_x^1 = \dot{U}_t^1 + \dot{i}_x^1 Z_{1mn} = (\frac{Z_{1mn}Z_z}{Z_x + Z_z} + Z_{1yn}) \dot{i}_t^1 \\ \dot{U}_z^1 = \dot{U}_t^1 + \dot{i}_z^1 Z_{1z} = (Z_{1yn} + \frac{Z_x Z_{1z}}{Z_x + Z_z}) \dot{i}_t^1 \end{cases} \quad (6)$$

最后求出流过 I 回线的正序电流如式 (7)。

$$\dot{i}_I^1 = \frac{Z_{1mn}}{Z_{1I}} \dot{i}_x^1 = \frac{Z_z}{4(Z_x + Z_z)} \dot{i}_t^1 \quad (7)$$

根据公式 (2) 计算 T 处电压, 如方程式 (8)

所示, 其中  $a = \frac{Z_{1yn}}{Z_1}$ ,  $k = \frac{Z_z Z_x}{Z_x + Z_z}$ 。

$$\begin{cases} \dot{U}_{1T} = [\frac{k}{4Z_x} - (\frac{kZ_1}{4Z_x} + aZ_1) \frac{Y_{1x}}{2}] Z_{1x} \dot{i}_t^1 \\ \dot{U}_{y,T} = [\frac{k+aZ_1}{Z_z - aZ_1} - (\frac{k+aZ_1}{Z_z - aZ_1} Z_1 + aZ_1) \frac{Y_1}{2}] Z_1 \dot{i}_t^1 \\ \dot{U}_{z,T} = [\frac{k}{Z_z} - (\frac{kZ_1}{Z_z} + aZ_1) \frac{Y_1}{2}] Z_1 \dot{i}_t^1 \end{cases} \quad (8)$$

电压突变量的表达式如式 (9) 所示, 其中

$$F = \frac{kZ_{1x}}{4Z_x} - (\frac{kZ_{1x}}{4Z_x} + aZ_1) \frac{Y_{1x} Z_{1x}}{2}。$$

$$\begin{cases} \Delta U_{1y} = \left| \left[ F + \frac{k+aZ_1}{Z_z - aZ_1} Z_1 \left( \frac{Y_1 Z_1}{2} - 1 \right) + a \frac{Y_1 Z_1^2}{2} \right] \dot{i}_t^1 \right| \\ \Delta U_{1z} = \left| \left[ F + \frac{k}{Z_z} Z_1 \left( \frac{Y_1 Z_1}{2} - 1 \right) + a \frac{Y_1 Z_1^2}{2} \right] \dot{i}_t^1 \right| \end{cases} \quad (9)$$

P 的表达式如方程式 (10) 所示:

$$P = \frac{\Delta U_{1y}}{\Delta U_{1z}} = \left| \frac{F + G_y}{F + G_z} \right| \quad (10)$$

$$\text{其中: } G_y = \frac{k+aZ_1}{Z_z - aZ_1} Z_1 \left( \frac{Y_1 Z_1}{2} - 1 \right) + a \frac{Y_1 Z_1^2}{2};$$

$$G_z = \frac{k}{Z_z} Z_1 \left( \frac{Y_1 Z_1}{2} - 1 \right) + a \frac{Y_1 Z_1^2}{2}。$$

观察比较  $G_y, G_z$ , 因为  $\left| \frac{k+aZ_1}{Z_z - aZ_1} \right| > \left| \frac{k}{Z_z} \right|$ , 所以

$$\left| \frac{k+aZ_1}{Z_z - aZ_1} Z_1 \left( \frac{Y_1 Z_1}{2} - 1 \right) \right| > \left| \frac{k}{Z_z} Z_1 \left( \frac{Y_1 Z_1}{2} - 1 \right) \right|, \text{ 由阻抗与}$$

导纳的性质可得  $|G_y| > |G_z|$ , 故  $P > 1$ , 故障在 YT 支路。而  $P < 1$  时, ZT 支路故障。由此分析知, 可将正常支路推算所得电压作为基准值与故障支路推算所得作对比, 从而判断出故障支路, 方法虽然复杂, 但思路严谨, 可靠性高。

### 2.3 四回线内部故障时的故障支路判别方法

利用反序电流确定四回线内部故障后, 可利用电压突变量和正序电流来判断故障支路。

对于四回线内部单回线故障时, 选择外部正常线路 (YT 或 ZT) 作参考支路。设  $i, j, k, l$  分别表示四回线中不同线路名, 由电压突变量法得  $\Delta U_{i,y} = \max \{ \Delta U_{i,y}, \Delta U_{j,y}, \Delta U_{k,y}, \Delta U_{l,y} \}$ , 则由电压突变量和正序电流可判定四回线的故障支路。

对于四回线内部跨线故障, 由于包含故障支路的电压突变量较大, 且故障支路正序电流相对正常支路较大, 利用两者结合可判断故障支路。

- 1) 如果  $\Delta U_{i,y}, \Delta U_{j,y} > \Delta U_{k,y} \approx \Delta U_{l,y}$  且  $I_i^1, I_j^1 > I_k^1, I_l^1$ , 则  $i, j$  支路跨线故障;
- 2) 如果  $\Delta U_{i,y}, \Delta U_{j,y}, \Delta U_{k,y} > \Delta U_{l,y}$  且  $I_i^1, I_j^1, I_k^1 > I_l^1$ , 则  $i, j, k$  支路跨线故障;
- 3) 如果  $\Delta U_{i,y}, \Delta U_{j,y}, \Delta U_{k,y}, \Delta U_{l,y}$  均较大且  $I_i^1, I_j^1, I_k^1, I_l^1 > a$  ( $a$  为门槛值), 则  $i, j, k, l$  支路跨线故障。

假设 I, II 回线路某处发生 I<sub>A</sub> II<sub>AG</sub> 跨线故障, 以此说明正序电流法的应用。系统 e 序正序序网图如图 3 所示。

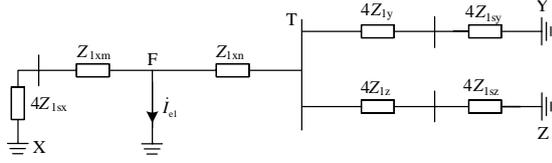


图3 四回线内部 I<sub>A</sub> II<sub>AG</sub> 故障时 e<sub>1</sub> 序网  
Fig.3 e<sub>1</sub>-sequence network in I<sub>A</sub> II<sub>AG</sub>

通过短路计算可以得到 e<sub>1</sub> 序网等值电势如方程式 (11):

$$\dot{U}'_k = \frac{E_x E' + Z_m Z_z E_y + Z_m Z_y E_z}{A'} \quad (11)$$

各阻抗如图 3 所示, 其他参数与前文相同,  $Z_m = 4Z_{1sx} + Z_{1xm}$ ,  $E' = Z_{1xn}(Z_y + Z_z) + 4Z_y Z_z$ ,  $A' = (Z_m + Z_{1xn})(Z_y + Z_z) + 4Z_y Z_z$ 。

则短路点处各序电流计算<sup>[10]</sup>如式 (12):

$$\begin{aligned} \dot{I} = \dot{I}_{d0} = \dot{I}_{e1} = \dot{I}_{e2} = \dot{I}_{f0} = \dot{I}_{f1} = \dot{I}_{f2} = \dot{I}_{h0} = \dot{I}_{h1} = \\ \dot{I}_{h2} = \frac{1}{2} \dot{I}_{g0} = \frac{1}{2} \dot{I}_{g1} = \frac{1}{2} \dot{I}_{g2} = \dot{U}'_k / \sum_{i=e,f} (Z_0 + 2Z_1) \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $Z_{i0}, Z_{i1} (i = e, f)$  分别为 e、f 序的零序和正序等值阻抗, 从相应序网计算得到<sup>[13]</sup>。由此求得故障后四回线的正序电流<sup>[13]</sup>, 如式 (13):

$$\begin{cases} \dot{I}_I^1 = \dot{I}_{e1} + \dot{I}_{f1} = \dot{I} \times \left( \frac{E'}{A'} + \frac{Z_{1xn}}{Z_{1xn} + Z_{1xm}} \right) \\ \dot{I}_{II}^1 = \dot{I}_{e1} - \dot{I}_{f1} + \dot{I}_{g1} = \dot{I} \times \left( \frac{E'}{A'} + \frac{Z_{1xn}}{Z_{1xn} + Z_{1xm}} \right) \\ \dot{I}_{III}^1 = \dot{I}_{e1} - \dot{I}_{g1} + \dot{I}_{h1} = \dot{I} \times \left( \frac{E'}{A'} - \frac{Z_{1xn}}{Z_{1xn} + Z_{1xm}} \right) \\ \dot{I}_{IV}^1 = \dot{I}_{e1} - \dot{I}_{h1} = \dot{I} \times \left( \frac{E'}{A'} - \frac{Z_{1xn}}{Z_{1xn} + Z_{1xm}} \right) \end{cases} \quad (13)$$

由阻抗性质知  $\left| \frac{E'}{A'} + \frac{Z_{1xn}}{Z_{1xn} + Z_{1xm}} \right| > \left| \frac{E'}{A'} - \frac{Z_{1xn}}{Z_{1xn} + Z_{1xm}} \right|$ ,

因此  $I_I^1, I_{II}^1 > I_{III}^1, I_{IV}^1$ , 即 I、II 回线的正序电流大于 III、IV 回线的正序电流。再结合电压突变量法  $\Delta U_{I,y}, \Delta U_{II,y} > \Delta U_{III,y} \approx \Delta U_{IV,y}$  可知 I、II 回线路发生跨线故障。

## 2.4 故障选线流程图

综上所述, 故障选线流程如图 4 所示。

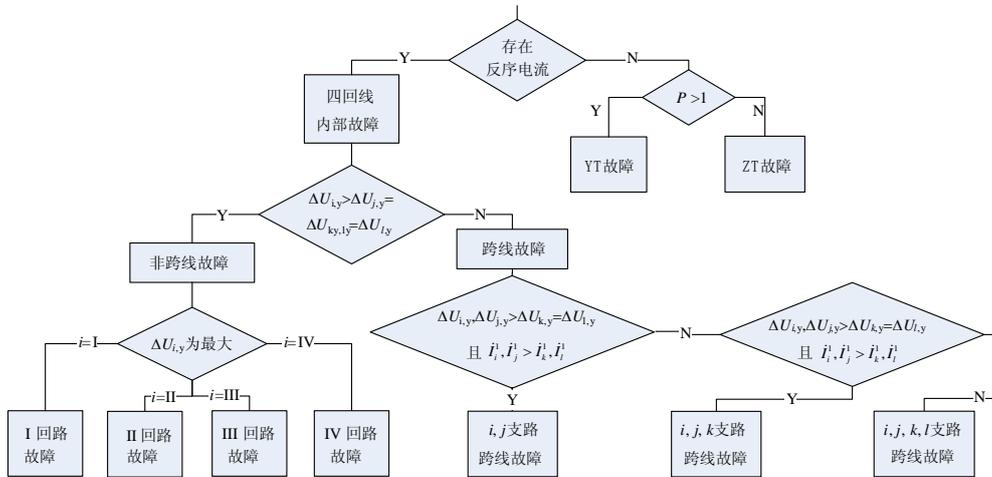


图4 流程图

Fig.4 Flow chart

无论四回线发生何种故障, 本文提出的故障选线方法都有很高的准确度, 通过 ATP 仿真进行验证。

## 3 仿真验证

### 3.1 仿真模型

由于非全程同杆四回线系统是局部同杆且共母线, 所以仿真中选择四回线部分 (即 X 侧) 为较短线路, 本文设其长为 10 km, 330 kV 系统中, XYZ

侧线路长分别为 10 km, 200 km, 150 km, XYZ 侧系统正序阻抗分别为  $1.85 + j54 \Omega$ ,  $j90 \Omega$ ,  $0.64 + j25 \Omega$ , 零序阻抗分别为  $1.85 + j54 \Omega$ ,  $j90 \Omega$ ,  $2.5 + j67 \Omega$ ; Y、Z 侧线路单位长度正序阻抗为  $0.639 + j4.0 \Omega/\text{km}$ , 正序导纳  $0.0476 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ , 零序阻抗  $0.0505 + j0.12 \Omega/\text{km}$ , 零序导纳  $0.011 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ ; 同杆四回线单位长度自阻抗、相间互阻抗、线间互阻抗分别为:  $j0.1375 \Omega/\text{km}$ ,  $0.0252 \Omega/\text{km}$ ,

0.018 8 Ω/km。

### 3.2 故障选线仿真

参数如前述，由反序正序电流判断四回线外部和内部故障后，利用上述选线方法，在各种故障类型下进行选线仿真。当外部故障时，对于Y侧在距离Y端保护90 km和180 km处故障时进行仿真，并考虑不同过渡电阻；对于Z侧在距离Z端保护60 km和120 km故障时进行仿真，考虑不同过渡电阻。由于Z侧与Y侧类似，只列出Z侧单回线故障选线，仿真结果见表1；当内部故障时，在距离X侧保护2.5 km

和9.4 km故障时进行仿真，给出不同过渡电阻时的选线情况，其结果见表2。因篇幅所限，列举部分单线故障及具有代表意义的跨线故障，并选取不同故障分支，结果表明，本文提出的选线方法行之有效，能准确选出故障分支，即使在T点附近发生故障（包括四回线内、外），其选线效果仍然很好；同时过渡电阻对选线效果没有影响，即使过渡电阻较大，还是能准确选线。大量仿真实验可知该选线方法对不同支路不同故障类型普遍适用，并且具有高准确度。

表1 四回线外部故障时选线仿真

Tab.1 Simulation data of four-jointed parallel line external fault

故障类型	实际距离 / km	过渡电阻 / Ω	$I_{f1}$	$I_{g1}$	$I_{h1}$	$\Delta U_{L,y}$	$\Delta U_{L,z}$	$P = \frac{\Delta U_{L,y}}{\Delta U_{L,z}}$	故障选线
Y <sub>AG</sub>	90	10	1.82	0.99	0.56	225.4	0.75	302>1	Y
		100	0.98	1.21	0.71	185.9	0.60	308>1	Y
	180	10	4.42	4.27	1.78	81.6	1.24	66>1	Y
		100	2.47	4.08	1.13	50.6	0.71	71>1	Y
Y <sub>ABG</sub>	90	10	1.26	0.94	1.07	460.6	104.8	4.4>1	Y
		100	1.51	1.12	1.00	386.4	103.7	3.7>1	Y
	180	10	4.03	6.75	1.08	339.7	125.7	2.7>1	Y
		100	5.43	8.22	1.99	285.1	119.4	2.4>1	Y
Y <sub>ABCG</sub>	90	10	0.65	0.94	0.36	489.0	1.34	365>1	Y
		100	0.65	0.94	0.36	489.0	1.34	365>1	Y
	180	10	2.59	5.02	1.59	189.7	0.39	487>1	Y
		100	2.59	5.02	1.59	189.7	0.39	487>1	Y
Z <sub>AG</sub>	60	10	1.91	1.81	0.56	3.43	34.6	0.10<1	Z
		100	1.91	0.98	0.36	31.77	279.8	0.11<1	Z
	120	10	4.49	2.83	1.06	35.50	157.4	0.23<1	Z
		100	2.27	1.26	1.38	37.71	132.2	0.29<1	Z

注：电流单位为  $10^{-14}$  (A)，电压单位为 kV；Y、Z 表示故障线路名；ABC 表示相别；G 表示接地故障。

表2 四回线内部故障时选线仿真

Tab.2 Simulation data of four-jointed parallel line internal fault

故障类型	实际距离 / km	过渡电阻 / Ω	$I_{f1}$	$I_{g1}$	$I_{h1}$	$\Delta U_{L,y}$	$\Delta U_{II,y}$	$\Delta U_{III,y}$	$\Delta U_{IV,y}$	$I_I^1$	$I_{II}^1$	$I_{III}^1$	$I_{IV}^1$	故障选线
I <sub>AG</sub>	2.5	0	1 222	814	407	22.4	2.91	2.91	2.91	----	----	----	----	I
		100	450	300	150	1.52	0.86	0.86	0.86	----	----	----	----	I
	9.4	0	98	65	32	1.06	1.00	1.00	1.00	----	----	----	----	I
		100	36	24	12	1.10	1.04	1.04	1.04	----	----	----	----	I
I <sub>ABG</sub>	2.5	0	2 296	1 531	765	43.0	2.96	2.96	2.96	----	----	----	----	I
		100	1 568	1 045	523	32.4	4.34	4.34	4.34	----	----	----	----	I
	9.4	0	184	123	61	15.3	1.20	1.20	1.20	----	----	----	----	I
		100	125	84	41	13.5	1.13	1.13	1.13	----	----	----	----	I

续表 2

故障类型	实际距离 / km	过渡电阻 / $\Omega$	$I_{fl}$	$I_{gl}$	$I_{hl}$	$\Delta U_{I,y}$	$\Delta U_{II,y}$	$\Delta U_{III,y}$	$\Delta U_{IV,y}$	$I_I^1$	$I_{II}^1$	$I_{III}^1$	$I_{IV}^1$	故障选线
$I_{ABCG}$	2.5	0	3 131	2 087	1 044	59.1	3.66	3.66	3.66	---	---	---	---	I
		100	3 131	2 087	1 044	59.1	3.66	3.66	3.66	---	---	---	---	I
	9.4	0	250	167	83	20.9	1.64	1.64	1.64	---	---	---	---	I
		100	250	167	83	20.9	1.64	1.64	1.64	---	---	---	---	I
$I_{AII BG}$	2.5	0	833	1 531	765	24.2	22.7	4.03	4.03	1 736	1 672	173	173	I, II
		100	889	1 045	522	21.7	19.0	5.19	5.19	1 401	1 159	135	135	I, II
	9.4	0	67	122	61	13.1	13.0	1.14	1.14	982	975	356	356	I, II
		100	71	84	42	12.1	11.9	1.08	1.08	681	664	188	188	I, II
$I_{AII B}$	2.5	0	340	215	1 044	23.6	14.6	33.4	5.27	1 581	908	2 320	216	I, II, III
		100	340	213	1 044	23.5	14.5	33.3	5.16	1 582	907	2 320	216	I, II, III
$III_{BCG}$	9.4	0	27	17	83	16.9	16.2	17.6	1.54	1 267	1 211	1 324	156	I, II, III
		100	27	17	83	17.0	16.3	17.7	1.55	1 267	1 211	1 324	156	I, II, III
$I_{AII ABC}$	2.5	0	739	493	246	7.54	20.7	20.7	20.7	1 512	1 490	1 490	1 490	I, II, III, IV
		100	739	493	246	7.50	20.7	20.7	20.7	1 512	1 490	1 490	1 490	I, II, III, IV
$III_{ABC}$	9.4	0	59	39	20	17.0	18.1	18.1	18.1	1 182	1 260	1 260	1 260	I, II, III, IV
$IV_{ABCG}$		100	59	39	20	17.0	18.1	18.1	18.1	1 182	1 260	1 260	1 260	I, II, III, IV

注：电流单位为 A，电压单位为 kV；I、II、III、IV 表示四回线故障线路名；ABC 表示相别；G 表示接地故障

此外，推导过程中，没有涉及到系统的功角、运行方式等问题，所以，选线精度不受功角、系统运行方式等因素的影响。

#### 4 结论

本文研究了四回线内部故障时反序正序量的特性，提出利用反序分量进行四回线区内，区外故障的区分。在确定四回线外部故障的基础上，以正常线路推算所得 T 点电压值作为参考量设定电压突变量参数来判断故障线路；在确定是四回线内部故障时，利用非故障单回线支路的电压差，结合故障支路正序电流相对非故障支路较大的特点判断四回线内部跨线故障支路，得出了适用于非全程同杆四回线的新型故障选线方法。大量的 ATP 仿真结果表明，本文提出的故障选线方法准确度高，并且不受故障支路、故障类型、系统运行方式、故障点过渡电阻等因素的影响。

#### 参考文献

- [1] 吴烈, 姜祥生. 220 kV 同杆(塔)四回路输电线路研究[J]. 供用电, 2004, 21(1): 12-14.  
WU Lie, JIANG Xiang-sheng. Study on 220 kV quadruple-circuit transmission lines on the same pole[J]. Distribution & Utilization, 2004, 21(1): 12-14.
- [2] 易辉, 纪建民. 交流架空线路新型输电技术[M]. 北京:

中国电力出版社, 2006.

- YI Hui, JI Jian-min. Overhead transmission lines new technology exchange[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [3] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.  
GE Yao-zhong. New types of protective relaying and fault location their theory and techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.
- [4] 田羽, 范春菊, 龚震东. 带同杆双回线的 T 型线路故障分支判定算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 71-76.  
TIAN Yu, FAN Chun-ju, GONG Zhen-dong. Faulted line selecting method of T circuit of parallel transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 71-76.
- [5] 田羽, 范春菊, 龚震东. 同杆双回线反序电流特点及其在 T 形线路测距中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 67-71.  
TIAN Yu, FAN Chun-ju, GONG Zhen-dong. A faulted line selection method of parallel transmission teed line on the basis of differential current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 67-71.
- [6] 索南加乐, 葛耀中. 同杆双回线跨线故障的准确定位方法[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(3): 1-9.  
SUONAN Jia-le, GE Yao-zhong. A new accurate fault locating method of the fault between two lines on the

double circuit line on the same tower[J]. Proceedings of the CSEE, 1992, 12 (3): 1-9.

[7] 李红巍. 一种实用的双回线测距方法[J]. 电力系统自动化, 1995, 19 (9): 30-33.  
LI Hong-wei. A useful algorithm for fault location of parallel transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19 (9): 30-33.

[8] 孙立山, 张晓友, 陈学允. 平行双回线故障测距算法的研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (5): 28-30.  
SUN Li-shan, ZHANG Xiao-you, CHEN Xue-yun. Research on a new fault location method for parallel transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (5): 28-30.

[9] 赵永娴, 曹小拐, 刘万顺. 同杆并架双回线准确参数未知时的故障测距新算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (4): 72-76.  
ZHAO Yong-xian, CAO Xiao-guai, LIU Wan-shun. New fault location algorithm for double transmission lines on a same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (4): 72-76.

[10] 范春菊, 郁惟镛. 基于横差模电流暂态能量的同杆双回线保护方案[J]. 电网技术, 2006, 30 (18): 69-74.  
FAN Chun-ju, YU Wei-yong. Protection scheme for double lines on same tower based on transient energy of modal differential transverse current[J]. Power System Technology, 2006, 30 (18): 69-74.

[11] 邓孟华, 范春菊, 刘玲, 等. 基于12序分量的同杆4回线短路故障计算[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (14): 64-67.  
DENG Meng-hua, FAN Chun-ju, LIU Ling, et al. Calculation of short circuit fault of four jointed parallel

lines on same tower based on twelve sequence components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (14): 64-67.

[12] 邓孟华, 范春菊, 舒巧俊, 等. 同杆4回线故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (15): 57-60.  
DENG Meng-hua, FAN Chun-ju, SHU Qiao-jun, et al. Method for fault line selection of four jointed parallel lines on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (15): 57-60.

[13] 田羽, 范春菊, 龚振东. 同杆4回线12序分量法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (21): 35-39.  
TIAN Yu, FAN Chun-ju, GONG Zhen-dong. A study on twelve-sequence component method of four-parallel lines on same towers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (21): 35-39.

[14] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 三版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.  
HE Yang-zan, WEN Zeng-yin. Power system analysis[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.

收稿日期: 2009-09-25; 修回日期: 2010-01-23

作者简介:

舒巧俊 (1982-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护及综合自动化; E-mail: meritw@163.com

陈松石 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统电站综合自动化;

范春菊 (1967-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为人工智能在继电保护及综合自动化中的应用。

(上接第 113 页 continued from page 113)

[15] Leung M T, Chen A S, Daouk H. Forecasting exchange rates using generalized regression neural networks[J]. Computers & Operation Research, 2000, 27 (4): 1093-1110.

[16] Zhicheng G, Renyu Z. Calculation of DC and AC flashover voltage of polluted insulators[J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1990, 25 (4): 723-729.

[17] Sundararajan R, Sadhureddy N R, Gorur R S. Computer-aided design of porcelain insulators under polluted conditions[J]. IEEE Trans on Dielectr Electrical Insulation, 1995, 2 (1): 21-127.

[18] Topalis F V, Gonos I F, Stathopoulos I A. Dielectric behavior of polluted porcelain insulators[J]. IEE Proc on Gener, Transm, and Distrib, 2001, 148 (4): 269-274.

[19] GB/T4585-2004 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验[S].  
GB/T4585-2004 artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a. c. systems[S].

[20] GB/T 2900.8—1995 电工术语绝缘子[S].  
GB/T 2900.8—1995 electrotechnical terminology—insulator [S].

[21] Gonos I F, Topalis F V, Stathopoulos I A. Genetic algorithm approach to the modeling of polluted insulators[J]. IEE Proc on Gener, Transm, and Distrib, 2002, 149 (3): 373-376.

收稿日期: 2009-10-29; 修回日期: 2009-12-15

作者简介:

帅海燕 (1970-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事智能监测和电力系统自动化研究; E-mail: wdshy@126.com

龚庆武 (1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护, 电力系统自动化和电力系统仿真等研究;

张园园 (1979-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、数字化变电站技术。