经过渡电阻短路接地故障的计算方法研究

许 侃[1,2]，范春菊[1]，许锦喜[3]

（1.上海交通大学电子信息与电气工程学院，上海 200240； 2.上海市电力公司，上海 200122；
3.泰州供电公司，江苏 泰州 225300）

摘要：对经过渡电阻短路接地故障的计算方法进行了研究，用对称分量法分析了单回线经过渡电阻接地故障，以及用六序分量法分析参数完全对称的同杆双回线经过渡电阻接地故障。针对不对称参数同杆双回线经过渡电阻接地故障进行分析：用对称分量法将线路阻抗矩阵分解为正序、负序、零序，得出两回线的正序量、负序量之间没有耦合，只有零序量之间存在耦合的结论；借鉴六序分量法中把电流分解为同向量和反向量的思路，将存在耦合的零序分解为零序同向量和零序反向量。再分别对新解耦方法各序的系统阻抗进行修正。用新的解耦方法进行故障分析，给出了新序网中过渡电阻的修正系数，并与PSCAD仿真结果进行对比，从而验证了新解耦方法的正确性。

关键词：过渡电阻；故障分析；解耦；零序互感

Study on calculation methods of ground fault through transition resistance

XU Kan[1,2], FAN Chun-ju[1], XU Jin-xi[3]

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 3. Taizhou Power Supply Company, Taizhou 225300, China)

Abstract: The calculation methods of ground fault through transition resistance are studied. Firstly, single-line ground fault through transition resistance is analyzed by symmetrical component method. The six-sequence component theory is used to analyze two parallel lines on the same tower when the parameters are exactly the same. Secondly, a method is presented to analyze two parallel lines of asymmetry parameter on the same tower. According to symmetrical component method, impedance matrix of the lines is decoupled to positive sequence, negative sequence and zero sequence. It comes to a conclusion that positive sequence and negative sequence have already been decoupled, but zero sequence is still coupling. Then, the coupling zero sequence is decoupled to the same directional zero component and the circumfluence zero component based on six sequence component theory in which the zero sequence is divided into the same directional component and the circumfluence component. And system impedance is modified. Finally, the new decoupling method is applied to do fault analysis and figure up the correction coefficient of transition resistance. The PSCAD results prove that the new decoupling method is correct.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177066 and No. 51377104).

Key words: transition resistance; fault analysis; decouple; zero-sequence mutual inductance

中图分类号： TM76 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2014)07-0044-08

0 引言

高压输电线路中短路一般都不是金属性的，而是在短路点存在过渡电阻。过渡电阻给故障分析、保护整定带来很大的困难，在国内外一直没有得到很好的解决。因此，对过渡电阻进行研究具有较高的学术价值和工程价值。对于单回线发生短路故障的计算方法主要有对称分量法[1]。同杆双回线由于存在零序互感，使得故障分析有一定难度[2-5]。对于参数完全对称的同杆双回线发生短路故障的计算方法主要有六序分量法[6]，并且在故障分析、故障定位以及故障选相等方面得到了广泛的应用[7-11]。文献[12-13]运用六序分量法，提出了测距精度不受故障点过渡电阻、回线故障类型影响的同杆双回线测距方法。文献[14]针对电力系统中平行线路的跨线故障，提出一种融合对称分量法与相分量法的大规模电力系统跨线故障计算方法。但实际中，由于同杆双回线的两回线架设时间不同，使用导线型号不

基金项目：国家自然科学基金（51177066，51377104）

同，以及换位等因素的影响，使得两回线的参数不对称，对于这种情况发生经过渡电阻短路故障的计算方法则较少，且存在故障计算方法不统一、序网连接复杂、物理概念不明确等缺陷[15]。

本文通过借鉴对称分量法和六序分量法对过渡电阻的处理方法，给出了两回线参数不完全对称的同杆双回线经过渡电阻短路接地故障的分析方法，使其具有明确物理意义。

1　单回线经过渡电阻短路接地分析[1]

以 A 相发生经过渡电阻 R_g 接地故障为例。

运用对称分量法，可求得短路点的短路电流为

$$I_A = I_0 + I_1 + I_2 = \frac{3E_1}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3R_g} \tag{1}$$

其中：I_A 为短路点 A 相短路电流；I_0、I_1、I_2 分别为短路点的零序电流、正序电流和负序电流；E_1 为正序的等效电压，即故障发生前短路点的电压；Z_0、Z_1、Z_2 分别为零序阻抗、正序阻抗和负序阻抗。

2　参数对称的同杆双回线经过渡电阻短路接地故障分析[2]

同杆双回线的特点在于：不但相间存在互感，而且线间也有互感[2]。六序分量法先消去线间互感，将电流分为同向量(T)和反向量(F)；再用对称分量法消去相间互感，将同向量和反向量分别分解为零序分量、正序分量和负序分量。

以Ⅰ回线发生 A 相经过渡电阻接地故障为例。

运用六序分量法，可得到短路点的短路电流为

$$I_{\mathrm{I}A} = I_{T0} + I_{T1} + I_{T2} + I_{F0} + I_{F1} + I_{F2} = \frac{6E_{T1}}{Z_{T0} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{F0} + Z_{F1} + Z_{F2} + 6R_g} \tag{2}$$

其中，$I_{\mathrm{I}A}$ 为短路点Ⅰ回线 A 相的短路电流；I_{T0}、I_{T1}、I_{T2} 分别为同向量零序电流、同向量正序电流和同向量负序电流；I_{F0}、I_{F1}、I_{F2} 分别为反向量零序电流、反向量正序电流和反向量负序电流；E_{T1} 为同向量正序的等效电压，即故障发生前短路点的电压；Z_{T0}、Z_{T1}、Z_{T2}、Z_{F0}、Z_{F1}、Z_{F2} 分别为六序分量的序阻抗。

3　参数不对称的同杆双回线经过渡电阻短路接地故障分析

3.1　参数不对称的同杆双回线的解耦方法

实际情况中，由于两回线架设时间可能不同，因而使用的导线型号可能不同，再计及导线换位的影响，会出现同杆双回线中两回线参数不同的情况，此时六序分量法不适用，必须寻找新的序分量分解方法。

本文以图 1 所示 220 kV 同杆双回线系统结构图为例进行说明。

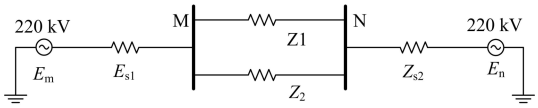


图 1　系统结构图

Fig. 1 System structure chart

其中Ⅰ回线与Ⅱ回线的参数不对称，同杆双回线 MN 部分的线路参数如图 2 所示。其中，每回线内部参数对称，但两回线的参数不相等。设Ⅰ回线的自感为 z_{l1}，相间互感为 z_{m1}；Ⅱ回线的自感为 z_{l2}，相间互感为 z_{m2}；两回线之间的互感为 z_p。

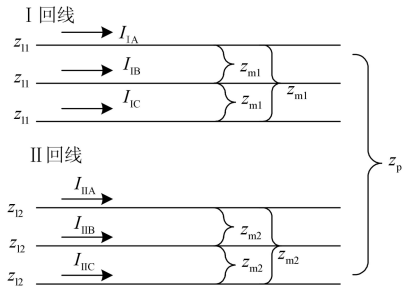


图 2 耦合线路图

Fig. 2 Coupling lines

由图 2 可得同杆双回线的电压电流关系为

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{\mathrm{I}A} \\ \Delta U_{\mathrm{I}B} \\ \Delta U_{\mathrm{I}C} \\ \Delta U_{\mathrm{II}A} \\ \Delta U_{\mathrm{II}B} \\ \Delta U_{\mathrm{II}C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{l1} & z_{m1} & z_{m1} & z_p & z_p & z_p \\ z_{m1} & z_{l1} & z_{m1} & z_p & z_p & z_p \\ z_{m1} & z_{m1} & z_{l1} & z_p & z_p & z_p \\ z_p & z_p & z_p & z_{l2} & z_{m2} & z_{m2} \\ z_p & z_p & z_p & z_{m2} & z_{l2} & z_{m2} \\ z_p & z_p & z_p & z_{m2} & z_{m2} & z_{l2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\mathrm{I}A} \\ I_{\mathrm{I}B} \\ I_{\mathrm{I}C} \\ I_{\mathrm{II}A} \\ I_{\mathrm{II}B} \\ I_{\mathrm{II}C} \end{bmatrix} \tag{3}$$

（Ⅰ回线参数；两回线的线间互感；两回线的线间互感；Ⅱ回线参数）

其中，$\Delta U_{\mathrm{I}A}$、$\Delta U_{\mathrm{I}B}$、$\Delta U_{\mathrm{I}C}$、$\Delta U_{\mathrm{II}A}$、$\Delta U_{\mathrm{II}B}$、$\Delta U_{\mathrm{II}C}$ 分别为线路上的电压降。

记阻抗矩阵为 $\boldsymbol{Z}$，六序分量法是对 $\boldsymbol{Z}$ 阵先进行线间解耦，再进行相间解耦。由于两回线参数不对称，无法像六序分量法那样先对 $\boldsymbol{Z}$ 阵进行线间解耦，因此，本文先对 $\boldsymbol{Z}$ 阵进行相间解耦，将其分解成正序、负序、零序。

按照对称分量法[1]，记相间解耦矩阵为

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & & & \\ 1 & a^2 & a & & & \\ 1 & a & a^2 & & & \\ & & & 1 & 1 & 1 \\ & & & 1 & a^2 & a \\ & & & 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

其中，$a=e^{j120°}$

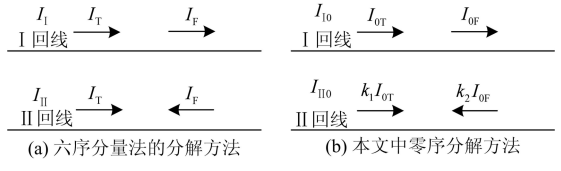
使用 $\boldsymbol{Q}$ 阵对式(3)解耦，可得

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{\mathrm{I}0} \\ \Delta U_{\mathrm{I}1} \\ \Delta U_{\mathrm{I}2} \\ \Delta U_{\mathrm{II}0} \\ \Delta U_{\mathrm{II}1} \\ \Delta U_{\mathrm{II}2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{\mathrm{I}0} & & & 3z_{\mathrm{p}} & & \\ & z_{\mathrm{I}1} & & & & \\ & & z_{\mathrm{I}2} & & & \\ 3z_{\mathrm{p}} & & & z_{\mathrm{II}0} & & \\ & & & & z_{\mathrm{II}1} & \\ & & & & & z_{\mathrm{II}2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\mathrm{I}0} \\ I_{\mathrm{I}1} \\ I_{\mathrm{I}2} \\ I_{\mathrm{II}0} \\ I_{\mathrm{II}1} \\ I_{\mathrm{II}2} \end{bmatrix} \tag{5}$$

其中：$\Delta U_{\mathrm{I}0}$，$\Delta U_{\mathrm{I}1}$，$\Delta U_{\mathrm{I}2}$ 为Ⅰ回线线路上的的零序电压降、正序电压降、负序电压降；$I_{\mathrm{I}0}$，$I_{\mathrm{I}1}$，$I_{\mathrm{I}2}$ 为Ⅰ回线线路上的零序电流、正序电流、负序电流；$\Delta U_{\mathrm{II}0}$，$\Delta U_{\mathrm{II}1}$，$\Delta U_{\mathrm{II}2}$ 为Ⅱ回线线路上的的零序电压降、正序电压降、负序电压降；$I_{\mathrm{II}0}$，$I_{\mathrm{II}1}$，$I_{\mathrm{II}2}$ 为Ⅱ回线线路上的零序电流、正序电流、负序电流；$z_{\mathrm{I}0}$，$z_{\mathrm{I}1}$，$z_{\mathrm{I}2}$ 为Ⅰ回线的零序阻抗、正序阻抗、负序阻抗，且 $z_{\mathrm{I}0}=z_{\mathrm{I}1}+2z_{\mathrm{m}1}$，$z_{\mathrm{I}1}=z_{\mathrm{I}2}=z_{\mathrm{I}1}-z_{\mathrm{m}1}$；$z_{\mathrm{II}0}$，$z_{\mathrm{II}1}$，$z_{\mathrm{II}2}$ 为Ⅱ回线的零序阻抗、正序阻抗、负序阻抗，且 $z_{\mathrm{II}0}=z_{\mathrm{I}2}+2z_{\mathrm{m}2}$，$z_{\mathrm{II}1}=z_{\mathrm{II}2}=z_{\mathrm{I}2}-z_{\mathrm{m}2}$。

由式(5)可以看出 Q 变换后的两回线的正序、负序是没有耦合的，只有两回线的零序存在耦合。因此，只要将线间的零序互感解耦即可。

借鉴六序分量法中将电流分解为同向量 I_{T} 和反向量 I_{F} 来消除线间耦合的思路，可以将式(5)中有线间耦合零序电流分解为零序同向量 $I_{0\mathrm{T}}$ 和零序反向量 $I_{0\mathrm{F}}$，又由于两回线的线路参数不对称，可以考虑对零序同向量和零序反向量的系数进行修正，如图 3 所示。



(a) 六序分量法的分解方法　(b) 本文中零序分解方法

图 3 分解方法对比

Fig. 3 Comparison of decomposition methods

其中，修正系数 k_1、k_2 可通过求解式(5)中阻抗矩阵的特征向量得到，可求得六个特征向量分别为

$$\boldsymbol{p}_1=\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ k_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{p}_2=\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{p}_3=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{p}_4=\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -k_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{p}_5=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{p}_6=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

将其构成线间解耦矩阵为

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix} 1 & & & 1 & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ k_1 & & & -k_2 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

其中：

$$k_1=\frac{z_{\mathrm{II}0}-z_{\mathrm{I}0}+\sqrt{(z_{\mathrm{II}0}-z_{\mathrm{I}0})^2+36z_{\mathrm{P}}{}^2}}{6z_{\mathrm{p}}}$$

$$k_2=-\frac{z_{\mathrm{II}0}-z_{\mathrm{I}0}-\sqrt{(z_{\mathrm{II}0}-z_{\mathrm{I}0})^2+36z_{\mathrm{P}}{}^2}}{6z_{\mathrm{p}}}$$

若两回线参数完全对称，即 $z_{\mathrm{I}1}=z_{\mathrm{I}2}$，$z_{\mathrm{m}1}=z_{\mathrm{m}2}$，则有 $k_1=k_2=1$，即 $I_{0\mathrm{T}}$、$I_{0\mathrm{F}}$ 与六序分量中的同序零序和反序零序意义相同。事实上，k_1，k_2 反映了两条线路参数的不对称度，线路参数的不对称度越大，k_1，k_2 偏离 1 的程度越大。

记总的解耦矩阵为

$$\boldsymbol{M}=\boldsymbol{QP}=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & & \\ 1 & a^2 & a & 1 & & \\ 1 & a & a^2 & 1 & & \\ k_1 & & & -k_2 & 1 & 1 \\ k_1 & & & -k_2 & a^2 & a \\ k_1 & & & -k_2 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

则有

$$\begin{cases} [\Delta U'_{012}]=\boldsymbol{M}^{-1}[\Delta U_{\mathrm{ABC}}] \\ [I'_{012}]=\boldsymbol{M}^{-1}[I_{\mathrm{ABC}}] \\ [\Delta U'_{012}]=\boldsymbol{M}^{-1}[Z]\boldsymbol{M}[I'_{012}] \end{cases} \tag{7}$$

将式(7)写成矩阵形式，有

$$\begin{bmatrix}\Delta U_{0\mathrm{T}}\\ \Delta U_{\mathrm{I}1}\\ \Delta U_{\mathrm{I}2}\\ \Delta U_{0\mathrm{F}}\\ \Delta U_{\mathrm{II}1}\\ \Delta U_{\mathrm{II}2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}z_{0\mathrm{T}} & & & & & \\ & z_{\mathrm{I}1} & & & & \\ & & z_{\mathrm{I}2} & & & \\ & & & z_{0\mathrm{F}} & & \\ & & & & z_{\mathrm{II}1} & \\ & & & & & z_{\mathrm{II}2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I_{0\mathrm{T}}\\ I_{\mathrm{I}1}\\ I_{\mathrm{I}2}\\ I_{0\mathrm{F}}\\ I_{\mathrm{II}1}\\ I_{\mathrm{II}2}\end{bmatrix}\tag{8}$$

其中：$\Delta U_{0\mathrm{T}}$，$I_{0\mathrm{T}}$ 为解耦后零序电压、零序电流的同向量分量；$\Delta U_{0\mathrm{F}}$，$I_{0\mathrm{F}}$ 为解耦后零序电压、零序电流的反向量分量；$z_{0\mathrm{T}}$ 为零序同向量分量对应的阻抗，且

$$z_{0\mathrm{T}}=[z_{\mathrm{I}0}+z_{\mathrm{II}0}+\sqrt{(z_{\mathrm{I}0}-z_{\mathrm{II}0})^2+36z_{\mathrm{P}}^{\,2}}]/2$$

$z_{0\mathrm{F}}$ 为零序反向量分量对应的阻抗，且

$$z_{0\mathrm{F}}=[z_{\mathrm{I}0}+z_{\mathrm{II}0}-\sqrt{(z_{\mathrm{I}0}-z_{\mathrm{II}0})^2+36z_{\mathrm{P}}^{\,2}}]/2$$

通过式(8)可以看出，阻抗矩阵已是对角阵，即完成了同杆双回线的解耦。

从解耦过程可以看出，新的解耦方法与六序分量法的区别在于：1)六序分量法适用于参数完全对称的同杆双回线的解耦分析，新的解耦方法适用于参数不对称的同杆双回线的解耦分析；2)六序分量法先将电流分解成同向量和反向量，再将同向量和反向量分别分解为正序、负序、零序，而新解耦方法先将电流分解为正序、负序、零序，再将零序分解为零序同向量和零序反向量，而正序、负序不变。

在下文中简称完全解耦后的六个序分量分别为0T序（解耦后的零序同向量分量）、0F序（解耦后的零序反向量分量）、Ⅰ1序（I回线正序）、Ⅰ2序（I回线负序）、Ⅱ1序（II回线正序）、Ⅱ2序（II回线负序）。

3.2 新分解方法的序网图

当图1所示同杆双回线MN上发生各种不同类型的故障时，各序序网图如下说明。

3.2.1 正负序序网图

由式(5)可知，同杆双回线内部新定义的正序负序与原来对称分量法中的正序负序相同，因此在同杆双回线内部，新定义的正序负序序网图与原来对称分量法中的正序负序序网图相同。

但是上述解耦过程仅仅是对同杆双回线MN内部进行的，MN以外的系统阻抗还需要进行修正，其修正系数可以通过对比原来对称分量法的正负序网图与新定义的正负序网图之间的电流电压关系确定。

下面以I1序、Ⅱ1序为例，完成基于新解耦方法的系统阻抗的修正。

由图4(a)可知

$$z_{\mathrm{sM1}}=\frac{E_{\mathrm{M}}-U_{\mathrm{M1}}}{I_1}=\frac{E_{\mathrm{M}}-U_{\mathrm{M1}}}{I_{\mathrm{I}1}+I_{\mathrm{II}1}}$$

由图4(b)、图4(c)可知

$$z_{\mathrm{sM\,I1}}=\frac{E_{\mathrm{M}}-U_{\mathrm{M1}}}{I_{\mathrm{I}1}},\quad z_{\mathrm{sM\,II1}}=\frac{E_{\mathrm{M}}-U_{\mathrm{M1}}}{I_{\mathrm{II}1}}$$

所以，$z_{\mathrm{sM\,I1}}=\dfrac{I_{\mathrm{I}1}+I_{\mathrm{II}1}}{I_{\mathrm{I}1}}z_{\mathrm{sM1}}$，$z_{\mathrm{sM\,II1}}=\dfrac{I_{\mathrm{I}1}+I_{\mathrm{II}1}}{I_{\mathrm{II}1}}z_{\mathrm{sM1}}$

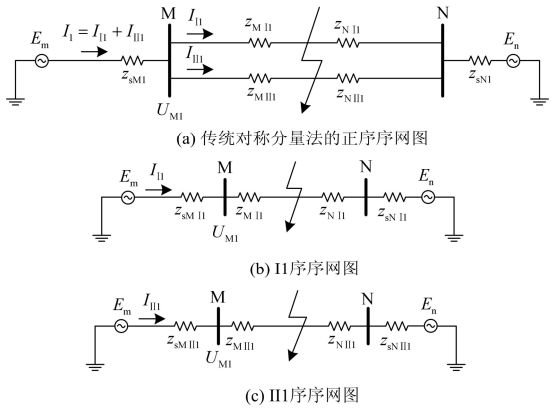


图 4 传统对称分量法与新分解方法对比

Fig. 4 Comparison between the symmetrical component method and the new method

同理可得Ⅰ2序、Ⅱ2序的系统阻抗。

因此，当图1所示系统的同杆双回线MN内部发生短路时，各序故障序网图如图5。

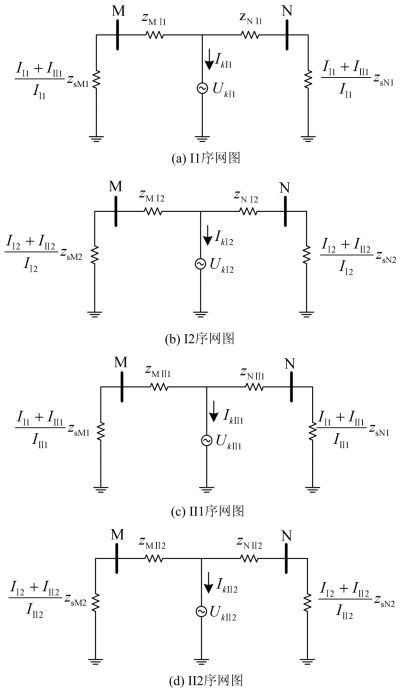


图 5 正负序序网图

Fig. 5 Positive and negative sequence network

3.2.2 0T 序、0F 序序网图

类似地，上述对零序的解耦过程也仅仅是对同杆双回线 MN 内部进行的，MN 以外的系统阻抗也需要进行修正，其修正系数可以通过对比传统零序和 0T 序、0F 序的电流电压关系确定。

由图 6 可知，系统阻抗的 0T 序电流是 $(1+k_1)I_{0\mathrm{T}}$。由于双回线的母线电压保持不变，系统阻抗电流应变为原来的 $\dfrac{1}{1+k_1}$ 倍才能与 0T 序双回线部分的电流相等，所以，根据欧姆定律，系统阻抗应变为原来的 $(1+k_1)$ 倍。同理， 0F 序的系统阻抗应变为原来的 $(1-k_2)$ 倍。

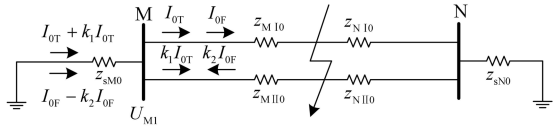


图 6 零序电流分解图

Fig. 6 Decomposition diagram of zero-sequence current

因此，可得相应的 0T 序、0F 序故障序网图如图 7。

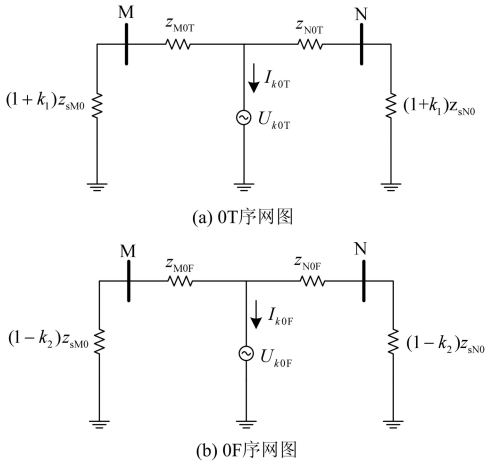


图 7 零序序网图

Fig. 7 Zero sequence networks

3.3 不对称参数同杆双回线经过渡电阻短路故障分析

当不对称参数同杆双回线经过渡电阻接地时，可通过故障边界条件和各序分量的电压电流的关系求解，从而得到各序分量电流，再代入式(7)，利用 $\boldsymbol{M}$ 阵，即可求出每回线上的短路电流。

由改进六序分量法的定义可知，Ⅰ1 序、Ⅱ1 序为有源网络，其等效电源电压为故障发生前短路点的相电压；0T 序、0F 序、Ⅰ2 序、Ⅱ2 序为无源网络，其等效电源电压为零。因此，故障处的各序电压与电流有如式(9)关系。

$$\begin{bmatrix}U_{0\mathrm{T}}\\U_{\mathrm{I1}}\\U_{\mathrm{I2}}\\U_{0\mathrm{F}}\\U_{\mathrm{II1}}\\U_{\mathrm{II2}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\E_{\mathrm{I}}\\0\\0\\E_{\mathrm{II}}\\0\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}Z_{0\mathrm{T}}&&&&&\\&Z_{\mathrm{I1}}&&&&\\&&Z_{\mathrm{I2}}&&&\\&&&Z_{0\mathrm{F}}&&\\&&&&Z_{\mathrm{II1}}&\\&&&&&Z_{\mathrm{II2}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I_{0\mathrm{T}}\\I_{\mathrm{I1}}\\I_{\mathrm{I2}}\\I_{0\mathrm{F}}\\I_{\mathrm{II1}}\\I_{\mathrm{II2}}\end{bmatrix}\tag{9}$$

其中：$U_{0\mathrm{T}}$、U_{I1}、U_{I2}、$U_{0\mathrm{F}}$、U_{II1}、U_{II2} 为故障处的各序电压；E_{I}、E_{II} 分别为故障发生前短路点的电压即Ⅰ回线和Ⅱ回线的相电压；$Z_{0\mathrm{T}}$、Z_{I1}、Z_{I2}、$Z_{0\mathrm{F}}$、Z_{II1}、Z_{II2} 为新分解方法的六个序阻抗，即图 5、图 7 中从故障点看进去的等效阻抗。

下面以Ⅰ回线 A 相经过渡电阻接地短路为例，进行说明。

Ⅰ回线 A 相经过渡电阻接地短路的边界条件为

$$\begin{cases}U_{\mathrm{I\,A}}=R_{\mathrm{g}}I_{\mathrm{I\,A}}\\I_{\mathrm{I\,B}}=0\\I_{\mathrm{I\,C}}=0\\I_{\mathrm{II\,A}}=0\\I_{\mathrm{II\,B}}=0\\I_{\mathrm{II\,C}}=0\end{cases}\tag{10}$$

联立式(7)、式(9)、式(10)，解得

$$\begin{cases}I_{\mathrm{I1}}=I_{\mathrm{I2}}=\dfrac{E_{\mathrm{I}}}{Z_{\mathrm{I1}}+Z_{\mathrm{I2}}+\dfrac{k_2}{k_1+k_2}Z_{0\mathrm{T}}+\dfrac{k_1}{k_1+k_2}Z_{0\mathrm{F}}+3R_{\mathrm{g}}}\\I_{0\mathrm{T}}=\dfrac{k_2}{k_1+k_2}I_{\mathrm{I1}}\\I_{0\mathrm{F}}=\dfrac{k_1}{k_1+k_2}I_{\mathrm{I1}}\\I_{\mathrm{II1}}=I_{\mathrm{II2}}=0\end{cases}\tag{11}$$

最后将 I_{I1}、I_{I2}、$I_{0\mathrm{T}}$、$I_{0\mathrm{F}}$、I_{III}、I_{II2} 的值代回式(7)，即可求得短路点的短路电流为

$$I_{\mathrm{I\,A}}=\frac{3E_{\mathrm{I}}}{Z_{\mathrm{I1}}+Z_{\mathrm{I2}}+\dfrac{k_2}{k_1+k_2}Z_{0\mathrm{T}}+\dfrac{k_1}{k_1+k_2}Z_{0\mathrm{F}}+3R_{\mathrm{g}}}\tag{12}$$

另外，还可以根据各序电压电流之间的关系画出故障复合序网图。

由式(11)中 $I_{\mathrm{II1}}=I_{\mathrm{II2}}=0$，可知Ⅱ1 序、Ⅱ2 序中电流为零，因此复合序网中没有Ⅱ1 序、Ⅱ2 序。

将式(10)中的电压方程 $U_{\mathrm{I\,A}}=R_{\mathrm{g}}I_{\mathrm{I\,A}}$ 用新定义的六个序分量表示，有

$$(U_{\mathrm{I1}}-R_{\mathrm{g}}I_{\mathrm{I1}})+(U_{\mathrm{I2}}-R_{\mathrm{g}}I_{\mathrm{I2}})+(U_{0\mathrm{T}}-R_{\mathrm{g}}I_{0\mathrm{T}})+(U_{0\mathrm{F}}-R_{\mathrm{g}}I_{0\mathrm{F}})=0\tag{13}$$

所以，故障复合序网图中Ⅰ1 序、Ⅰ2 序、0T

序、0F 序串联，且各序网中均含有过渡电阻 R_g。

将式(9)代入式(13)，可得

$$[E_{\mathrm{I}}-(Z_{\mathrm{I1}}+R_g)I_{\mathrm{I1}}]+[-(Z_{\mathrm{I2}}+R_g)I_{\mathrm{I2}}]+[-(Z_{0\mathrm{T}}+R_g)I_{0\mathrm{T}}]+[-(Z_{0\mathrm{F}}+R_g)I_{0\mathrm{F}}]=0 \tag{14}$$

由式(11)可知，0T 序的电流是Ⅰ1 序、Ⅰ2 序的 $\frac{k_2}{k_1+k_2}$ 倍，而Ⅰ1 序、Ⅰ2 序与 0T 序的电压是串联关系，所以，根据欧姆定律，为了保持 0T 序的电压不变，0T 序的序阻抗和对应的过渡电阻应变为原来的 $\frac{k_2}{k_1+k_2}$ 倍。同理可知，0F 序的序阻抗和过渡电阻应变为原来的 $\frac{k_1}{k_1+k_2}$ 倍。

相应的序网图如图 8。

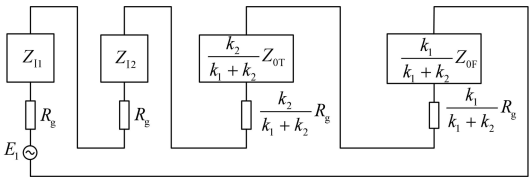


图 8Ⅰ A 故障复合序网图

Fig. 8 Ⅰ A fault sequence diagrams

同理，可求得其他故障的短路电流和故障复合序网图。

4 故障分析的仿真验证

为了验证本文所述解耦方法的正确性，进行 PSCAD 仿真验算。

4.1 仿真模型及参数

系统仿真图如图 1 所示，其中，E_m=E_n=220 kV，线路两端系统正序阻抗均为 j50 Ω，零序阻抗均为 j80 Ω。Ⅰ回线的自感为 z_{l1}=(23.9961+j132.9503) Ω，相间互感为 z_{m1}=(17.1296+j49.1879) Ω，Ⅱ回线的自感为 z_{l2}=(25.3966+j132.2432) Ω，相间互感为 z_{m2}=(18.4574+j48.4963) Ω，线间互感为 z_p=(17.7895+j52.0102)Ω。

4.2 故障分析

假设线路 MN 的中点短路，由于故障种类众多，下面给出几种典型故障的短路电流的仿真结果与计算结果。

由表 1~表 3 可知，利用本文所提出的方法的计算结果与 PSCAD 仿真结果的误差大部分在 1%以下，少数误差大于 1%，理论值与仿真值相当接近，从而验证了本文所提出的方法的正确性。

表 1 电气量的精度比较(R_g=0 Ω，即金属性短路)

Table 1 Comparison of the precision of electric parameters (R_g=0 Ω)

故障类型		PSCAD 仿真值/kA	改进六序分量法计算值/kA	误差/%
ⅠAG	ⅠA	2.021 229	1.999 592	1.070 5
ⅠBCG	ⅠB	2.614 983	2.583 041	1.221 5
	ⅠC	2.473 731	2.449 892	0.963 7
ⅠBⅡCG	ⅠB	2.650 454	2.616 954	1.263 9
	ⅡC	2.514 610	2.488 558	1.036 0
ⅠAⅡABG	ⅠA	1.618 442	1.594 151	1.500 9
	ⅡA	1.554 845	1.557 513	0.171 6
	ⅡB	2.603 572	2.572 927	1.177 0
ⅠABⅡACG	ⅠA	1.720 289	1.728 685	0.488 1
	ⅠB	2.887 563	2.853 492	1.179 9
	ⅡA	1.703 634	1.665 094	2.262 2
	ⅡC	2.926 639	2.904 110	0.769 7
ⅠABⅡABCG	ⅠA	1.801 959	1.801 561	0.002 2
	ⅠB	1.776 339	1.753 827	1.267 3
	ⅡA	1.739 489	1.715 545	1.376 5
	ⅡB	1.728 892	1.730 865	0.114 1
	ⅡC	2.951 088	2.919 641	1.065 6
ⅠABCⅡABC	Ⅰ回线	1.800 574	1.789 888	0.593 4
	Ⅱ回线	1.800 792	1.790 091 3	0.594 2

表 2 电气量的精度比较(R_g=10 Ω)

Table 2 Comparison of the precision of electric parameters (R_g=10 Ω)

故障类型		PSCAD 仿真值/kA	改进六序分量法计算值/kA	误差/%
ⅠAG	ⅠA	1.969 596	1.947 216	1.136 2
ⅠBCG	ⅠB	2.748 334	2.718 242	1.094 9
	ⅠC	2.299 772	2.269 606	1.311 6
ⅠBⅡCG	ⅠB	2.783 308	2.752 695	1.099 8
	ⅡC	2.338 489	2.308 645	1.276 1
ⅠAⅡABG	ⅠA	1.687 991	1.667 027	1.241 9
	ⅡA	1.622 673	1.623 173	0.030 8
	ⅡB	2.434 584	2.401 881	1.343 2
ⅠABⅡACG	ⅠA	1.710 771	1.719 388	0.503 6
	ⅠB	2.874 229	2.840 227	1.182 9
	ⅡA	1.695 102	1.656 023	2.305 4
	ⅡC	2.955 405	2.932 760	0.766 2
ⅠABⅡABCG	ⅠA	1.810 883	1.811 825	0.052 0
	ⅠB	1.760 466	1.737 327	1.314 3
	ⅡA	1.749 209	1.725 593	1.350 0
	ⅡB	1.711 635	1.712 864	0.071 8
	ⅡC	2.963 990	2.932 499	1.062 4
ⅠABCⅡABCG	Ⅰ回线	1.800 574	1.789 888	0.593 4
	Ⅱ回线	1.800 791	1.790 091	0.594 2

表 3 电气量的精度比较(R_g=50 Ω)

Table 3 Comparison of the precision of electric parameters (R_g=50 Ω)

故障类型		PSCAD 仿真值/kA	改进六序分量法计算值/kA	误差/%
ⅠAG	ⅠA	1.533 833	1.503 725	1.962 9
ⅠBCG	ⅠB	2.808 303	2.772 814	1.263 7
	ⅠC	2.072 349	2.048 012	1.174 3
ⅠBⅡCG	ⅠB	2.847 320	2.813 424	1.190 4
	ⅡC	2.113 028	2.087 949	1.186 8
ⅠAⅡABG	ⅠA	1.671 523	1.652 707	1.125 6
	ⅡA	1.588 986	1.576 262	0.800 7
	ⅡB	2.342 541	2.322 605	0.851 0
ⅠABⅡACG	ⅠA	1.673 582	1.682 877	0.555 3
	ⅠB	2.897 603	2.863 673	1.170 9
	ⅡA	1.657 728	1.618 959	2.338 6
	ⅡC	2.994 384	2.969 841	0.819 6
ⅠABⅡABCG	ⅠA	1.801 956	1.804 585	0.145 8
	ⅠB	1.739 548	1.714 527	1.438 3
	ⅡA	1.739 542	1.715 185	1.400 2
	ⅡB	1.692 251	1.693 584	0.078 7
	ⅡC	3.015 517	2.984 746	1.020 4
ⅠABCⅡABCG	Ⅰ回线	1.800 574	1.789 888	0.593 4
	Ⅱ回线	1.800 791	1.790 091	0.594 2

5 结论

本文重点针对参数不对称的同杆双回线经过渡电阻接地故障进行分析，先用对称分量法对同杆双回线进行相间解耦，得到正序负序已完全解耦，只有零序存在耦合的结论；接着再借鉴六序分量法中，把电流分为同向量和反向量的思路，对零序互感进行进一步解耦，分为零序同向量(0T)和零序反向量(0F)，从而实现了同杆双回线的线路参数的完全解耦；然后，再利用电流之间的关系，对双回线以外的系统进行阻抗修正；最后，运用新的解耦方法求出带过渡电阻接地故障的各序电流，再进行反变换，即可求出经过渡电阻接地的故障电流。

另外，本文提出的方法为不同电压等级部分耦合线路的经过渡电阻短路故障的分析提供了理论基础。不同电压等级部分耦合线路，由于线路的自感互感的差异明显，可以借鉴本文的方法对零序互感进行分解，非耦合部分的线路根据电流比进行阻抗修正。

参考文献

[1] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析（上册）[M]. 3 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
HE Yang-zan, WEN Zeng-yin. Power system analysis (part one)[M]. Third Edition. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.

[2] 刘家军, 闫泊, 姚李孝, 等. 平行双回线中串补电容对零序电抗型距离保护的影响[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 264-270, 255.
LIU Jia-jun, YAN Bo, YAO Li-xiao, et al. Influence of series compensation capacitor on zero-sequence reactance-type distance protection in parallel double-circuit lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 264-270, 255.

[3] 孟远景, 鄢安河, 李瑞生, 等. 同杆双回线的六相序阻抗距离保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 12-17.
MENG Yuan-jing, YAN An-he, LI Rui-sheng, et al. The study on six phase sequence distance relay protection scheme for double-circuit lines on the same pole[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 12-17.

[4] 李斌, 李学斌, 丁茂生, 等. 特高压同杆双回线的环流不平衡及其影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 202-208, 223.
LI Bin, LI Xue-bin, DING Mao-sheng, et al. Circulating unbalanced current and its influence of double-circuit UHV transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 202-208, 223.

[5] 宋国兵, 刘志良, 康小宁, 等. 一种同杆并架双回线接地距离保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 102-106, 114.
SONG Guo-bing, LIU Zhi-liang, KANG Xiao-ning, et al. A scheme for ground distance protection of parallel transmission lines[J]. Power System protection and Control, 2010, 38(12): 102-106, 114.

[6] 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.

[7] 索南加乐, 葛耀中. 利用六序分量复合序网法分析同杆双回线故障的新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1991, 3(1): 92-106.
SUONAN Jia-le, GE Yao-zhong. The new method of fault analysis for double circuit lines based six-sequence complex networks[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,

1991, 3(1): 92-106.

[8] 索南加乐, 葛耀中, 陶惠良. 同杆双回线的六序选相原理[J]. 中国电机工程学报, 1991, 11(6): 1-9.
SUONAN Jia-le, GE Yao-zhong, TAO Hui-liang. Principle of six-sequence phase selection for double-circuit lines on the same tower[J]. Proceedings of the CSEE, 1991, 11(6): 1-9.

[9] 索南加乐, 葛耀中. 同杆双回线跨线故障的准确故障定位方法[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.

[10] 索南加乐, 葛耀中, 陶惠良. 用六序分量补偿过渡电阻的双回线准确故障定位方法[J]. 西安交通大学学报, 1992, 26(6): 107-120.
SUONAN Jia-le, GE Yao-zhong, TAO Hui-liang. A new accurate fault locator of the double circuit line using six-sequence components at one terminal[J]. Journal of Xi'an Jiaotong Univerity, 1992, 26(6): 107-120.

[11] 刘玲, 范春菊. 基于六序分量法的跨电压等级的同塔四回线的故障计算[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 6-11.
LIU Ling, FAN Chun-ju. Fault calculation for joint four transmission lines of different voltage grades on the same tower based on six-sequence-component method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 6-11.

[12] 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): 58-60, 82.
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): 58-60, 82.

[13] 范春菊, 蔡华嵘, 郁惟镛. 基于六序分量法的同杆双回线精确故障测距[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(8): 1279-1282.
FAN Chun-ju, CAI Hua-rong, YU Wei-yong. Accurate fault location for parallel transmission line based on six-sequence fault components[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(8): 1279-1282.

[14] 刘为雄, 蔡泽祥, 邱建. 融合对称分量法与相分量法的大规模电力系统跨线故障计算[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 140-145.
LIU Wei-xiong, CAI Ze-xiang, QIU Jian. Inter-line fault calculation using integrated symmetry-component and phase-component method for large scale power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5): 140-145.

[15] 曾耿晖. 同塔线路故障分析及其对继电保护影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
ZENG Geng-hui. Fault analysis and its influence on relay protection of transmission lines on same tower[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

收稿日期：2013-06-28；　修回日期：2013-08-13

作者简介：

许　侃(1989-)，女，硕士研究生，研究方向为电力系统继电保护及综合自动化；E-mail：xukan_2013@163.com

范春菊(1967-)，女，博士，副教授，长期从事人工智能在继电保护及综合自动化中应用的研究及教学工作；

许锦喜（1963-），男，工程师，长期从事电力部门相关工作。