第 25 卷 第 23 期　　中 国 电 机 工 程 学 报　　Vol.25 No.23 Dec. 2005
2005 年 12 月　　Proceedings of the CSEE
©2005 Chin.Soc.for Elec.Eng.
文章编号：0258-8013 (2005) 23-0061-05　**中图分类号：**TM711　**文献标识码：**A　**学科分类号：**470·40

利用矩阵变换求解电力系统短路故障的残压变换法

姜　彤[1]，白雪峰[2]，郭志忠[2]，吕　颖[3]，

（1. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室，北京市 昌平区 102206;
2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院，黑龙江省 哈尔滨市 150001;
3. 清华大学电机工程与应用电子技术系，北京市 海淀区 100084）

A RESIDUAL VOLTAGE TRANSFORMATION METHOD FOR SHORT-CIRCUIT CURRENT CALCULATION WITH MATRIX TRANSFORMATION

JIANG Tong[1], BAI Xue-feng[2], GUO Zhi-zhong[2], LÜ Ying[3]

(1. Key Laboratory of Power system Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, ChangPing District, Beijing 102206,China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Haerbin 150001, Heilongjiang Province,China;
3. Dept. of Electrical Engineering, TsingHua University, HaiDian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Unbalanced element brings a big problem to fault analysis of symmetrical components method. According with fault analysis of phase components, a residual voltage transformation method for short-circuit current calculation is presented with matrix translation in the place of classical sequence networks connection, which is suitable for both phase coordinates and symmetrical components coordinates. Calculation formulas are proposed with matrices calculation to deal with unsymmetrical faults and parameter matrices for various faults are listed. Analysis of simultaneous faults with unbalanced parameter element is done without calculation qualities increased. Simple examples have shown that the method is practical and suitable for programming.

KEY WORDS: Power system; Short-circuit current calculation; Symmetrical components; Phase components

摘要：参数不对称元件的出现为对称分量法处理不对称故障的序网联接处理方法设置了障碍。该文针对之以相分量法故障处理方法为依据，建立了相分量坐标下适用于各种短路故障公式化的残压变换法，并以矩阵变换的方式完成不对称短路故障的处理：通过公式变换将该方法应用于对称分量坐标。使用矩阵运算代替对称分量法的传统序网故障变换，以实现不对称短路故障计算，并给出常见故障对应的参数矩阵。对于多重短路故障和含不对称元件的网络都能够直接处理，而计算量却不会明显增大。文中用实例证明了该方法简单实用，而且便于程序实现。

关键词：电力系统；短路电流计算；对称分量；相分量

1　引言

对称分量坐标下的网络计算是当前故障分析方法[1]的主流。随着网络中不对称元件的增多，由于网络参数在序分量空间不能解耦，使得处理故障的序网变换方法失去了意义[2]。目前主要采用的阻抗模拟法使用大小阻抗来模拟断线和短路等故障[3]，但其会带来数值处理上的问题。如果完全采用相分量法[4-8]，则计算速度上会造成额外的负担。文献[9]提出了一种公式化的方法，可规范和简便地处理各种故障，但由于方程变换中使用了包含短路电流变量的混合向量来代替电压向量，其对称分量坐标下的意义发生了改变，故对其他应用分析会造成麻烦。

本文将研究另一种可用于对称分量法的短路故障计算方法，仍然使用矩阵变换的技术，通过相分量坐标下的分析导出通用的计算公式，在不更改电压向量的前提下用一个简单的公式涵盖所有短路故障情况，以寻求构造规范化故障的计算方法。

2　基于相分量坐标的残压变换法短路故障处理研究

2.1　节点单相接地故障处理

电力网络通常采用节点导纳网络方程来描述[3]，

基金项目：国家自然科学基金项目(50307003)。
Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50307003).

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn

因此下面将主要基于这种形式进行讨论。对于支路故障，通常的处理方法是在支路上建立一个节点，使其转化成节点故障考虑，因此本文将不专门研究支路故障处理，而将支路故障问题在其他的文章中介绍。为了导出残压变换法，这里仅讨论相分量坐标下短路故障处理技术。

设一网络使用相分量坐标的节点网络方程为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{Y}_{11} & \boldsymbol{Y}_{12} & \cdots & \boldsymbol{Y}_{1n} \\ \boldsymbol{Y}_{21} & \boldsymbol{Y}_{22} & \cdots & \boldsymbol{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \boldsymbol{Y}_{n1} & \boldsymbol{Y}_{n2} & \cdots & \boldsymbol{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_1 \\ \boldsymbol{U}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_1 \\ \boldsymbol{J}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{J}_n \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中 $\boldsymbol{Y}_j, \boldsymbol{U}_i, \boldsymbol{J}_i$ 分别是相分量的导纳、电压和注入电流源参数，$i=1,\cdots,n$；$j=1,\ldots,n$。

$$\boldsymbol{Y}_{ij} = \begin{bmatrix} Y_{ij}^{\mathrm{AA}} & Y_{ij}^{\mathrm{AB}} & Y_{ij}^{\mathrm{AC}} \\ Y_{ij}^{\mathrm{BA}} & Y_{ij}^{\mathrm{BB}} & Y_{ij}^{\mathrm{BC}} \\ Y_{ij}^{\mathrm{CA}} & Y_{ij}^{\mathrm{CB}} & Y_{ij}^{\mathrm{CC}} \end{bmatrix}, \boldsymbol{U}_i = \begin{bmatrix} \dot{U}_{i\mathrm{A}} \\ \dot{U}_{i\mathrm{B}} \\ \dot{U}_{i\mathrm{C}} \end{bmatrix}, \boldsymbol{J}_i = \begin{bmatrix} \dot{J}_{i\mathrm{A}} \\ \dot{J}_{i\mathrm{B}} \\ \dot{J}_{i\mathrm{C}} \end{bmatrix}。$$

则式(1)中对应的第 i 节点的方程为

$$\boldsymbol{Y}_{1i}\boldsymbol{U}_1 + \boldsymbol{Y}_{2i}\boldsymbol{U}_2 + \cdots + \boldsymbol{Y}_{ii}\boldsymbol{U}_i + \cdots + \boldsymbol{Y}_{in}\boldsymbol{U}_n = \boldsymbol{J}_i \tag{2}$$

式(2)可以展开为

$$\begin{cases} Y_{i1}^{\mathrm{AA}}\dot{U}_{1\mathrm{A}} + \cdots + Y_{ii}^{\mathrm{AA}}\dot{U}_{i\mathrm{A}} + Y_{ii}^{\mathrm{AB}}\dot{U}_{i\mathrm{B}} + \\ \qquad Y_{ii}^{\mathrm{AC}}\dot{U}_{iC} + \cdots + Y_{in}^{AC}\dot{U}_{n\mathrm{C}} = \dot{J}_{i\mathrm{A}} \\ Y_{i1}^{\mathrm{BA}}\dot{U}_{1\mathrm{A}} + \cdots + Y_{ii}^{\mathrm{BA}}\dot{U}_{i\mathrm{A}} + Y_{ii}^{\mathrm{BB}}\dot{U}_{i\mathrm{B}} + \\ \qquad Y_{ii}^{\mathrm{BC}}\dot{U}_{i\mathrm{C}} + \cdots + Y_{in}^{\mathrm{BC}}\dot{U}_{n\mathrm{C}} = \dot{J}_{i\mathrm{B}} \\ Y_{i1}^{\mathrm{CA}}\dot{U}_{1\mathrm{A}} + \cdots + Y_{ii}^{\mathrm{CA}}\dot{U}_{i\mathrm{A}} + Y_{ii}^{\mathrm{CB}}\dot{U}_{iB} + \\ \qquad Y_{ii}^{\mathrm{CC}}\dot{U}_{i\mathrm{C}} + \cdots + Y_{in}^{\mathrm{CC}}\dot{U}_{n\mathrm{C}} = \dot{J}_{i\mathrm{C}} \end{cases} \tag{3}$$

设节点 i 处存在 A 相单相接地故障，则按照相分量故障计算方法，添加故障注入电流源 $\dot{J}_{FA}$，将 $\dot{U}_{i\mathrm{A}}$ 用 0 替代，对于式(3)则有

$$\begin{cases} Y_{i1}^{\mathrm{AA}}\dot{U}_{1\mathrm{A}} + \cdots + Y_{ii}^{\mathrm{AA}} * 0 + Y_{ii}^{\mathrm{AB}}\dot{U}_{i\mathrm{B}} + \\ \qquad Y_{ii}^{\mathrm{AC}}\dot{U}_{i\mathrm{C}} + \cdots + Y_{in}^{\mathrm{AC}}\dot{U}_{n\mathrm{C}} = \dot{J}_{i\mathrm{A}} + \dot{J}_{FA} \\ Y_{i1}^{\mathrm{BA}}\dot{U}_{1\mathrm{A}} + \cdots + Y_{ii}^{\mathrm{BA}} * 0 + Y_{ii}^{\mathrm{BB}}\dot{U}_{i\mathrm{B}} + \\ \qquad Y_{ii}^{\mathrm{BC}}\dot{U}_{i\mathrm{C}} + \cdots + Y_{in}^{\mathrm{BC}}\dot{U}_{n\mathrm{C}} = \dot{J}_{i\mathrm{B}} \\ Y_{i1}^{\mathrm{CA}}\dot{U}_{1\mathrm{A}} + \cdots + Y_{ii}^{\mathrm{CA}} * 0 + Y_{ii}^{\mathrm{CB}}\dot{U}_{i\mathrm{B}} + \\ \qquad Y_{ii}^{\mathrm{CC}}\dot{U}_{i\mathrm{C}} + \cdots + Y_{in}^{\mathrm{CC}}\dot{U}_{n\mathrm{C}} = \dot{J}_{i\mathrm{C}} \end{cases} \tag{4}$$

实际上式(1)中所有方程的 $\dot{U}_{i\mathrm{A}}$ 都应用 0 替代。此处未一一列出。在这些方程中，仅式(3)中的第 1 个方程发生了实质变化，考虑到 $\dot{U}_{i\mathrm{A}}=0$，并用此替代式(4)中的第 1 个方程，可得到关于节点 i 的方程组为

$$\begin{cases} \dot{U}_{i\mathrm{A}} = 0 \\ Y_{i1}^{\mathrm{BA}}\dot{U}_{1\mathrm{A}} + \cdots + Y_{ii}^{\mathrm{BA}}\dot{U}_{i\mathrm{A}} + Y_{ii}^{\mathrm{BB}}\dot{U}_{i\mathrm{B}} + \\ \qquad Y_{ii}^{\mathrm{BC}}\dot{U}_{i\mathrm{C}} + \cdots + Y_{in}^{\mathrm{BC}}\dot{U}_{n\mathrm{C}} = \dot{J}_{i\mathrm{B}} \\ Y_{i1}^{\mathrm{CA}}\dot{U}_{1\mathrm{A}} + \cdots + Y_{ii}^{\mathrm{CA}}\dot{U}_{i\mathrm{A}} + Y_{ii}^{\mathrm{CB}}\dot{U}_{i\mathrm{B}} + \\ \qquad Y_{ii}^{\mathrm{CC}}\dot{U}_{i\mathrm{C}} + \cdots + Y_{in}^{\mathrm{CC}}\dot{U}_{n\mathrm{C}} = \dot{J}_{i\mathrm{C}} \end{cases} \tag{5}$$

这样的方程变化同样可反映故障的特点，因而可作为不增加故障电流注入元的故障变换的方法，同时对其他节点方程，也不再需要将 $\dot{U}_{i\mathrm{A}}$ 用 0 替代，或者说即使不做任何修改也不会发生错误。文献[7]也曾提到了相似的方法，给出了详细的例子。

2.2 节点两相短路故障处理

仍假定节点 i 处发生 BC 两相短路故障。对式(1)，相分量法中处理两相短路的方法是增加一个电流注入源 $\boldsymbol{J}_S$，将 $\dot{U}_{i\mathrm{C}}$ 用 $\dot{U}_{i\mathrm{B}}$ 替代，则式(3)变为

$$\begin{cases} Y_{i1}^{\mathrm{AA}}\dot{U}_{1\mathrm{A}} + \cdots + Y_{ii}^{\mathrm{AA}}\dot{U}_{i\mathrm{A}} + Y_{ii}^{\mathrm{AB}}\dot{U}_{i\mathrm{B}} + \\ \qquad Y_{ii}^{\mathrm{AC}}\dot{U}_{i\mathrm{B}} + \cdots + Y_{in}^{\mathrm{AC}}\dot{U}_{n\mathrm{C}} = \dot{J}_{i\mathrm{A}} \\ Y_{i1}^{\mathrm{BA}}\dot{U}_{1\mathrm{A}} + \cdots + Y_{ii}^{\mathrm{BA}}\dot{U}_{i\mathrm{A}} + Y_{ii}^{\mathrm{BB}}\dot{U}_{i\mathrm{B}} + \\ \qquad Y_{ii}^{\mathrm{BC}}\dot{U}_{i\mathrm{B}} + \cdots + Y_{in}^{\mathrm{BC}}\dot{U}_{n\mathrm{C}} = \dot{J}_{i\mathrm{B}} + \dot{J}_{\mathrm{S}} \\ Y_{i1}^{\mathrm{CA}}\dot{U}_{1\mathrm{A}} + \cdots + Y_{ii}^{\mathrm{CA}}\dot{U}_{i\mathrm{A}} + Y_{ii}^{\mathrm{CB}}\dot{U}_{i\mathrm{B}} + \\ \qquad Y_{ii}^{\mathrm{CC}}\dot{U}_{i\mathrm{B}} + \cdots + Y_{in}^{\mathrm{CC}}\dot{U}_{n\mathrm{C}} = \dot{J}_{i\mathrm{C}} - \dot{J}_{\mathrm{S}} \end{cases} \tag{6}$$

将式(6)的后 2 个方程相加，再补入方程 $\dot{U}_{iB} = \dot{U}_{iC}$ 即可得到

$$\begin{cases} Y_{i1}^{\mathrm{AA}}\dot{U}_{1\mathrm{A}} + \cdots + Y_{ii}^{\mathrm{AA}}\dot{U}_{i\mathrm{A}} + Y_{ii}^{\mathrm{AB}}\dot{U}_{i\mathrm{B}} + \\ \qquad Y_{ii}^{\mathrm{AC}}\dot{U}_{i\mathrm{C}} + \cdots + Y_{in}^{\mathrm{AC}}\dot{U}_{n\mathrm{C}} = \dot{J}_{i\mathrm{A}} \\ (Y_{i1}^{\mathrm{BA}} + Y_{i1}^{\mathrm{CA}})\dot{U}_{1\mathrm{A}} + \cdots + (Y_{ii}^{\mathrm{BA}} + Y_{ii}^{\mathrm{CA}})\dot{U}_{i\mathrm{A}} + \\ \qquad (Y_{ii}^{\mathrm{BB}} + Y_{ii}^{\mathrm{CC}})\dot{U}_{i\mathrm{B}} + (Y_{ii}^{\mathrm{BC}} + Y_{ii}^{\mathrm{CC}})\dot{U}_{i\mathrm{B}} + \\ \qquad \ldots + (Y_{in}^{\mathrm{BC}} + Y_{in}^{\mathrm{CC}})\dot{U}_{n\mathrm{C}} = \dot{J}_{i\mathrm{B}} + \dot{J}_{i\mathrm{C}} \\ \dot{U}_{i\mathrm{B}} - \dot{U}_{i\mathrm{C}} = 0 \end{cases} \tag{7}$$

式(7)可看作是两相短路故障处理的一种形式。与式(5)的单相接地短路故障处理相似，使用这样的方程也可避开引入电流注入源 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{S}}$ 而直接获得可表示两相短路故障的结果，同时其他节点方程也不必再作修改。

2.3 相分量坐标下的残压变换法

比较上面 2 种典型短路故障的处理方法可以看到，对短路故障可利用相似的方法进行方程变换以反映故障前、后方程的变化。

以式(3)~(5)表述的单相接地故障处理为例，如果用矩阵变换来表示将节点 i 的第 1 个方程清零和增加方程的过程，即定义

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn

$$\boldsymbol{T}_1=\begin{bmatrix}0&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix};\ \boldsymbol{T}_2=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix}。$$

则与第 i 节点对应的式(2)可改写为

$$\boldsymbol{Y}_{i1}'\boldsymbol{U}_1+\boldsymbol{Y}_{i2}'\boldsymbol{U}_2+\cdots+\boldsymbol{Y}_{ii}'\boldsymbol{U}_i+\cdots+\boldsymbol{Y}_{in}'\boldsymbol{U}_n=\boldsymbol{J}_i' \tag{8}$$

式中 若 $j=1,\cdots,n$， $j\neq i$，则

$$\boldsymbol{Y}_{ij}'=\boldsymbol{T}_1\boldsymbol{Y}_{ij} \tag{9}$$

且有

$$\boldsymbol{Y}_{ii}'=\boldsymbol{T}_1\boldsymbol{Y}_{ii}+\boldsymbol{T}_2 \tag{10}$$

$$\boldsymbol{T}_i'=\boldsymbol{T}_1\boldsymbol{J}_i \tag{11}$$

对于其他节点对应的方程，可不做处理，因此这种处理不会影响网络方程的其他部分。

与文献[6]相比，本文中同样使用了矩阵变换，但没有加入故障向量，而是保持电压的原有向量不变，相当于考虑了故障后残压的值。因此称之为残压变换法。与前面的推导相似，仍可定义矩阵

$$\boldsymbol{T}_1=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&1\\0&0&0\end{bmatrix};\quad \boldsymbol{T}_2=\begin{bmatrix}0&0&0\\0&0&0\\0&1&-1\end{bmatrix}$$

使用式(9-11)求解即为两相短路故障计算方法。

2.4 其他短路故障分析

同上面的分析相似，对于 BC 两相短路接地故障，只需要定义

$$\boldsymbol{T}_1=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix};\quad \boldsymbol{T}_2=\begin{bmatrix}0&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}$$

就可利用相同的公式进行计算。

对于其他短路故障，总可以找到不同的参数矩阵使其利用式(9-11)处理故障。附表一列出了常见的不对称短路故障对应的参数矩阵。

当需要计算该节点的总短路电流时，可推导出

$$\boldsymbol{I}_d=\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{Y}_{ij}\boldsymbol{U}_j-\boldsymbol{J}_i \tag{12}$$

3　对称分量法的故障残压变换法

如果将序网化简后写成 012 形式，则有

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{Y}_{11}^{012}&\boldsymbol{Y}_{12}^{012}&\ldots&\boldsymbol{Y}_{1n}^{012}\\\boldsymbol{Y}_{21}^{012}&\boldsymbol{Y}_{22}^{012}&\ldots&\boldsymbol{Y}_{2n}^{012}\\\ldots&\ldots&\ldots&\ldots\\\boldsymbol{Y}_{n1}^{012}&\boldsymbol{Y}_{n2}^{012}&\ldots&\boldsymbol{Y}_{nn}^{012}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}_1^{012}\\\boldsymbol{U}_2^{012}\\\ldots\\\boldsymbol{U}_n^{012}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{J}_1^{012}\\\boldsymbol{J}_2^{012}\\\ldots\\\boldsymbol{J}_n^{012}\end{bmatrix} \tag{13}$$

式(13)与式(2)各变量之间存在如下关系：

$$\begin{cases}\boldsymbol{U}_i^{\text{abc}}=\boldsymbol{T}\boldsymbol{U}_i^{012}\\\boldsymbol{I}_i^{\text{abc}}=\boldsymbol{T}\boldsymbol{I}_i^{012}\\\boldsymbol{Y}_{ij}^{\text{abc}}=\boldsymbol{T}\boldsymbol{Y}_{ij}^{012}\boldsymbol{T}^{-1}\end{cases} \tag{14}$$

式中

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{bmatrix}$$

其中 $a=e^{j120^\circ}$。

因为式(13)与式(2)具有线性变换的关系，因此上面提出的相分量坐标短路故障残压变换法也可通过线性变换应用于对称分量坐标中。

若节点 i 发生短路故障，则方程第 i 行将出现变化，可用式(9)~(11)来描述，在式(13)中则有

$$\boldsymbol{Y}_{ij}'^{012}=\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{Y}_{ij}'\boldsymbol{T}=\boldsymbol{T}^{-1}(\boldsymbol{T}_1\boldsymbol{Y}_{ij})\boldsymbol{T}=\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{T}_1\boldsymbol{T}\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{Y}_{ij}\boldsymbol{T}=$$

$$(\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{T}_1\boldsymbol{T})(\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{Y}_{ij}\boldsymbol{T})=\boldsymbol{T}_1^{012}\boldsymbol{Y}_{ij}^{012}，\quad i\neq j \tag{15}$$

同理，对应的其他方程可写成

$$\boldsymbol{Y}_{ii}'^{012}=\boldsymbol{T}_1^{012}\boldsymbol{Y}_{ii}^{012}+\boldsymbol{T}_2^{012} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{J}_i'^{012}=\boldsymbol{T}_1^{012}\boldsymbol{J}_i^{012} \tag{17}$$

$$\begin{cases}\boldsymbol{I}_d^{012}=\sum\limits_{j=1}^{n}\boldsymbol{Y}_{ij}^{012}\boldsymbol{U}_j^{012}-\boldsymbol{J}_i^{012}\\\boldsymbol{I}_d=\boldsymbol{T}\boldsymbol{I}_d^{012}\end{cases} \tag{18}$$

式中

$$\boldsymbol{T}_1^{012}=\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{T}_1\boldsymbol{T} \tag{19}$$

$$\boldsymbol{T}_2^{012}=\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{T}_2\boldsymbol{T} \tag{20}$$

以上式中，$\boldsymbol{T}$ 由式(14)给出，$\boldsymbol{T}_1$,$\boldsymbol{T}_2$ 则根据故障类型的不同而改变，由表 1 给出。实际上为了计算的方便，也可预先求出对称分量下的变换矩阵列表表示，这样更适合对称分量法使用。

式(13)经过式(15)~（17)的变换后，得到的就是网络的故障处理方程。解此方程求出 $\boldsymbol{U}_{012}$ 后，就可根据式(18)计算出短路电流

4　经阻抗短路的变换方法

设节点 i 发生 A 相经阻抗单相接地，接地阻抗为 Z_d，则令 $Y_d=1/Z_d$。对于形如式(1)的节点导纳方程中节点 i 对应的自导纳参数矩阵，将变成

$$Y_i=\begin{bmatrix}Y_{\text{AA}}+Y_d&Y_{\text{AB}}&Y_{\text{AC}}\\Y_{\text{BA}}&Y_{\text{BB}}&Y_{\text{BC}}\\Y_{\text{CA}}&Y_{\text{CB}}&Y_{\text{CC}}\end{bmatrix}$$

对照前面的变换，若设

$$\boldsymbol{T}_2=\begin{bmatrix}Y_d&0&0\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix};\quad \boldsymbol{T}_1=\boldsymbol{Y}_{\text{ABC}}^{-1}(\boldsymbol{Y}'-\boldsymbol{T}_2)=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}$$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn

同样可以认为这种情况是前面方法的特例，只不过参数发生了变化。显然，经变换也可得到对称分量坐标下的计算参数。

对于 AB 相间经阻抗短路，可得

$$\boldsymbol{T}_2=\begin{bmatrix}Y_d & -Y_d & 0\\ -Y_d & Y_d & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix};\ \boldsymbol{T}_1=\boldsymbol{Y}_{\mathrm{ABC}}^{-1}(\boldsymbol{Y}'-\boldsymbol{T}_2)=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}。$$

对于其他的短路故障，读者可以自行研究，结果是相似的。由此可认为所有节点短路故障都可以使用同样的公式进行计算。表 1 中列出了对应常见故障的参数矩阵。

表 1 常见短路故障类型的残压变换法公式参数列表（相分量坐标下）

Tab.1 List of equation parameters of fault vector transformation on short circuit fault (in phase coordinates)

故障类型	参数矩阵 $\boldsymbol{T}_1$	参数矩阵 $\boldsymbol{T}_2$
A 相接地	$\begin{bmatrix}0&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}1&0&0\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix}$
B 相接地	$\begin{bmatrix}1&0&0\\0&0&0\\0&0&1\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0&0&0\\0&1&0\\0&0&0\end{bmatrix}$
C 相接地	$\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&0\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0&0&0\\0&0&0\\0&0&1\end{bmatrix}$
AB 相接地	$\begin{bmatrix}0&0&0\\0&0&0\\0&0&1\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&0\end{bmatrix}$
AC 相接地	$\begin{bmatrix}0&0&0\\0&1&0\\0&0&0\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}1&0&0\\0&0&0\\0&0&1\end{bmatrix}$
BC 相接地	$\begin{bmatrix}1&0&0\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}$
AB 相短路	$\begin{bmatrix}0&0&0\\1&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}1&-1&0\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix}$
AC 相短路	$\begin{bmatrix}0&0&0\\0&1&0\\1&0&1\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}1&0&-1\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix}$
BC 相短路	$\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&1\\0&0&0\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0&0&0\\0&0&0\\0&1&-1\end{bmatrix}$
ABC 相短路	$\begin{bmatrix}1&1&1\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0&0&0\\1&-1&0\\1&0&-1\end{bmatrix}$
ABC 相短路接地	$\begin{bmatrix}0&0&0\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}$

5 针对不对称元件的处理

在对称分量下处理包含不对称元件的网络，只需要通过坐标变换将不对称元件的相分量坐标参数转换到对称分量坐标下，再修改导纳阵的对应部分后，即可直接应用本文的方法进行故障处理。

由于本方法是从相分量坐标下转换到对称分量坐标下，2 种坐标系下的方程存在着一一对应的关系，其故障处理也相同。因此，无论是否有不对称元件，对本文的故障处理方法不会有影响。与对称网络唯一不同的是，在对称分量坐标下不对称网络方程最终形成的导纳阵子块将不再是对角阵。

6 多重故障的算例

算例中每个节点短路故障处理上仅针对这个节点对应的行，多重故障只需要反复应用这个方法就可以了。下面利用文献[1]中 210 页的例题 8-2 给出一个多重故障的应用例子。

对图 1 的网络，设 h 点和 f 点分别发生 A 相接地和 BC 相短路故障，则以对称分量坐标列写出经过网络等值后的节点导纳方程为

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc}-\mathrm{j}22.2857&0&0&\mathrm{j}2.0408&0&0\\0&-\mathrm{j}17.1429&0&0&\mathrm{j}7.1429&0\\0&0&-\mathrm{j}17.1429&0&0&\mathrm{j}7.1429\\\hline \mathrm{j}2.0408&0&0&-\mathrm{j}3.7075&0&0\\0&\mathrm{j}7.1429&0&0&-\mathrm{j}7.1429&0\\0&0&\mathrm{j}7.1429&0&0&-\mathrm{j}7.1429\end{array}\right]\cdot\begin{bmatrix}\dot{U}_{h0}\\\dot{U}_{h1}\\\dot{U}_{h2}\\\dot{U}_{f0}\\\dot{U}_{f1}\\\dot{U}_{f2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\\mathrm{j}10\\0\\0\\0\\0\end{bmatrix}$$

上式可简记作

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{Y}_{hh}&\boldsymbol{Y}_{hf}\\\boldsymbol{Y}_{fh}&\boldsymbol{Y}_{ff}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}_h\\\boldsymbol{U}_j\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{J}_h\\\boldsymbol{J}_j\end{bmatrix}$$

对于 h 点发生单相接地故障，可查表计算出

$$\boldsymbol{T}_1^S=\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{T}_1\boldsymbol{T}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}2&-1&-1\\-1&2&-1\\-1&-1&2\end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{T}_2^S=\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{T}_1\boldsymbol{T}=-\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1&1&1\\1&1&1\\1&1&1\end{bmatrix}$$

所以

$$\boldsymbol{Y}'_{hh}=\boldsymbol{T}_1^{012}\begin{bmatrix}-\mathrm{j}22.2857&0&0\\0&-\mathrm{j}17.1429&0\\0&0&-\mathrm{j}17.1429\end{bmatrix}+\boldsymbol{T}_2^{012};$$

$$\boldsymbol{Y}'_{hj}=\boldsymbol{T}_1^{012}\begin{bmatrix}\mathrm{j}2.0408&0&0\\0&\mathrm{j}7.1429&0\\0&0&\mathrm{j}7.1429\end{bmatrix};\boldsymbol{J}'_h=\boldsymbol{T}_1^{012}\begin{bmatrix}0\\-\mathrm{j}10\\0\end{bmatrix}$$

对于 f 点发生 BC 相短路故障，可查表计算出

$$\boldsymbol{T}_1^S=\boldsymbol{T}^{-1}\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&1\\0&0&0\end{bmatrix}\boldsymbol{T};\quad \boldsymbol{T}_2^S=\boldsymbol{T}^{-1}\begin{bmatrix}0&0&0\\0&0&0\\0&1&-1\end{bmatrix}\boldsymbol{T};$$

$$\boldsymbol{Y}'_{jj}=\boldsymbol{T}_1^{012}\begin{bmatrix}-\mathrm{j}3.7075&0&0\\0&-\mathrm{j}7.1429&0\\0&0&-\mathrm{j}7.1429\end{bmatrix}+\boldsymbol{T}_2^{012};$$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn

$$\boldsymbol{Y}'_{jk}=\boldsymbol{T}_1^{012}\begin{bmatrix}\mathrm{j}2.0408 & 0 & 0\\ 0 & \mathrm{j}7.1429 & 0\\ 0 & 0 & \mathrm{j}7.1429\end{bmatrix}$$

原方程可变为

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{Y}'_{hh} & \boldsymbol{Y}'_{hj}\\ \boldsymbol{Y}'_{jh} & \boldsymbol{Y}'_{jj}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}_h^{012}\\ \boldsymbol{U}_j^{012}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{J}_h'^{012}\\ 0\end{bmatrix}$$

解之即可求得

$$\begin{bmatrix}\dot U_{hA}\\ \dot U_{hB}\\ \dot U_{hC}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ -0.505+\mathrm{j}0.287\\ 0.505+\mathrm{j}0.287\end{bmatrix};\quad \begin{bmatrix}\dot U_{fA}\\ \dot U_{fB}\\ \dot U_{fC}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\mathrm{j}0.086\\ \mathrm{j}0.201\\ \mathrm{j}0.201\end{bmatrix}$$

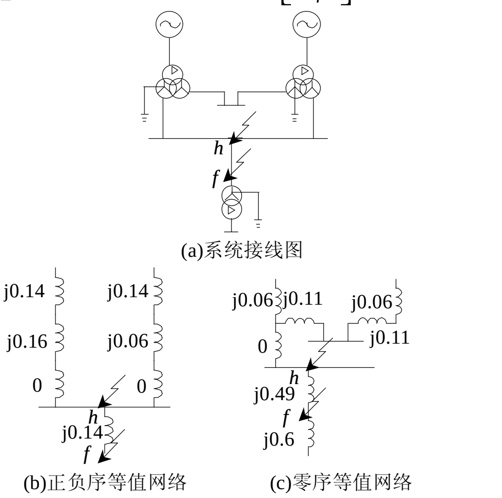

图 1 示例系统

Fig.1 Example System

7 小结

本文提出了求解短路故障的残压变换方法，基于相分量法短路故障处理模型，建立了以矩阵变换描述的短路故障处理公式，推出了对称分量坐标下的对应公式，拓展了应用范围。通过单一的公式计算所有短路故障，在编程上更加简单。对于含有不对称元件的系统，也可以直接计算，无需使用补偿法[11]和阻抗模拟法[12-13]。与文献[9]的方法相比，由于无需加入故障向量，保持了对称分量坐标网络方程的本来特色，故在许多领域有更好的应用前景。本方法重点在于解决节点短路故障，对于断线等支路故障，可应用文献[10]的方法作为补充解决手段。

参考文献

[1] 何仰赞，温增银，汪馥英，等．电力系统分析[M] (第三版)． 武汉：华中理工大学出版社，1996．

[2] 关根泰次．电力系统暂态解析论[M]．蒋建民，等译．北京：机械工业出版社，1989．

[3] 张伯明，陈寿孙．高等电力网络分析[M]．北京：清华大学出版社，1996．

[4] Laughton M A．Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase coordinates，part I: system representation in phase frame of reference[J]．Proc IEE．1968，115(8)：1163-1172．

[5] Laughton M A．Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase coordinates，part II: fault analysis [M]．Proc．IEE．1969，116(5)：857-865．

[6] 姜彤，白雪峰，郭志忠，等．基于对称分量模型的电力系统短路故障计算方法[J]．中国电机工程学报，2003，23(2)：50-53．
Jiang Tong，Bai Xuefeng，Guo Zhizhong *et al*．A new method of power system fault calculation based on symmetrical components [J]．Proceedings of the CSEE，2002，23(2)：50-53．

[7] Alex Berman，Wilsun Xu．Analysis of faulted power systems by phase coordinates[J]．IEEE Transactions on Power Delivery，1998，13(2)：587-595．

[8] 傅旭，王锡凡．三相参数不对称的环状复杂配电网故障计算的新方法[J]．中国电机工程学报，2004，24(11)：64-68．
Fu Xu，Wang Xifan．A new approach for fault calculation in asymmetrical three-phase and weakly meshed distribution network [J]．Proceedings of the CSEE，2004，24(11)： 64-68．

[9] Montagna M，Granelli G P．Comprehensive approach to fault analysis using phase coordinates[J]．Electric Power Systems Research，2002，61(2)：101-108．

[10] 姜彤，张伯明，吕颖．规范化计算电力系统复杂故障的拓扑描述[J]．中国电机工程学报，2005，25(2)：12-16．
Jiang Tong，Zhang Boming，Lu Ying．A topological description method for canonical analysis of complex faults in electric power systems [J]．Proceedings of the CSEE，2005，25(2)：12-16．

[11] 曹国臣，武晓梅，宋家骅，等．一种基于分解协调法的电力系统故障计算方法[J]．中国电机工程学报，1999，19(1)：14-18．
Cao Guochen，Wu Xiaomei，Song Jiahua *et al*．A new method for fault calculation in power system based on the decomposition-coordination method[J]．Proceedings of the CSEE，1999，19(1)：14-18．

[12] 陈青，江世芳．一种求解电力系统复杂故障的新算法[J]．中国电机工程学报，2000，20(9)：41-43，49．
Chen Qing，Jiang Shifang．A new algorithm for complicated fault calculation in electric power system[J]．Proceedings of the CSEE，2000，20(9)：41-43， 49．

[13] 王春，陈允平，谈顺涛．电力系统复杂故障通用算法的研究[J]．中国电机工程学报，1995，15(6)：417-422．
Wang Chun，Chen Yunping，Tan Shuntao *et al*．The study of generalized algorithm for simultaneous faults in power system[J]．Proceedings of the CSEE，1995，15(6)：417-422．

收稿日期：2005-06-22。

作者简介：

姜　彤（1970-），男，博士，副教授，从事电力网络分析和计算机应用方面的研究；

郭志忠（1961-），男，教授，博士生导师，从事光学电流互感器，电力系统分析与控制，以及运行与管理方面的研究；

白雪峰（1973-），男，博士，讲师，从事电力系统分析方面的研究；

吕　颖，男，博士研究生。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn