线路断线条件下的一种故障计算新方法

姜彤, 郭志忠, 陈学允

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 提出一种可以快速计算线路非全相运行状态下的多重复杂故障计算方法。以元件的相分量方程为依据,通过边界条件的分析,导出线路故障后的支路方程,代入节点网络方程中就可以直接计算各种故障。适用于对称分量法和相分量法,无需增加节点和支路破口,方法规范,非常适合计算机程序实现,给出了相关的实例。

关键词: 断线故障; 故障计算; 对称分量; 相分量

中图分类号: TM744 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2003)02-0014-04

1 引言

电力系统运行中常常出现断线故障或者等同于断线故障的非全相运行的情况,这种情况下的计算是继电保护非常关心的问题。传统的方法通常是使用序网分析,虽然可以解决,但是需要增加节点并且在多重断相情况下程序编制困难,如果使用高阻抗串联模拟故障,又难以精确地分析;许多通用的计算程序都没有很好地解决这一问题。本文提出一种计算方法,该方法无需使用高阻抗模拟,可以方便地解决一条线路上的各种断线故障计算,而且方法规范,适合计算机程序实现。

2 线路元件的相分量方程

对于一条三相线路而言,通常的模型是使用π型等值电路。

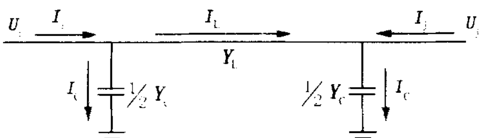


图1 线路相分量模型

Fig.1 Model of line in phase component coordinates

该元件的相分量导纳方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} U_i \\ U_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -Y_L,\ Y_{ii} = Y_{jj} = Y_L + Y_C/2 \quad (2)$$

如果忽略对地电容,则更有

$$Y_{ii} = Y_{jj} = -Y_{ij} = -Y_{ji} = Y_L$$

设线路的序阻抗为 z_1, z_2, z_0,则有

$$Y_L = TY_{012}T^{-1} = T\begin{bmatrix} Y_0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_1 & 0 \\ 0 & 0 & Y_2 \end{bmatrix}T^{-1} = T\begin{bmatrix} 1/z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/z_2 \end{bmatrix}T^{-1} \quad (3)$$

3 元件首端断线故障的相分量等效方程

用 C_1 表示一线路元件,两端节点为 i、j,将式(1)按三相展开写成下面的形式:

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} Y_{ii}^{AA(C_1)} & Y_{ii}^{AB(C_1)} & Y_{ii}^{AC(C_1)} & Y_{ij}^{AA(C_1)} & Y_{ij}^{AB(C_1)} & Y_{ij}^{AC(C_1)} \\ Y_{ii}^{BA(C_1)} & Y_{ii}^{BB(C_1)} & Y_{ii}^{BC(C_1)} & Y_{ij}^{BA(C_1)} & Y_{ij}^{BB(C_1)} & Y_{ij}^{BC(C_1)} \\ Y_{ii}^{CA(C_1)} & Y_{ii}^{CB(C_1)} & Y_{ii}^{CC(C_1)} & Y_{ij}^{CA(C_1)} & Y_{ij}^{CB(C_1)} & Y_{ij}^{CC(C_1)} \\ \hline Y_{ji}^{AA(C_1)} & Y_{ji}^{AB(C_1)} & Y_{ji}^{AC(C_1)} & Y_{jj}^{AA(C_1)} & Y_{jj}^{AB(C_1)} & Y_{jj}^{AC(C_1)} \\ Y_{ji}^{BA(C_1)} & Y_{ji}^{BB(C_1)} & Y_{ji}^{BC(C_1)} & Y_{jj}^{BA(C_1)} & Y_{jj}^{BB(C_1)} & Y_{jj}^{BC(C_1)} \\ Y_{ji}^{CA(C_1)} & Y_{ji}^{CB(C_1)} & Y_{ji}^{CC(C_1)} & Y_{jj}^{CA(C_1)} & Y_{jj}^{CB(C_1)} & Y_{jj}^{CC(C_1)} \end{array}\right]\left[\begin{array}{c} U_{iA} \\ U_{iB} \\ U_{iC} \\ \hline U_{jA} \\ U_{jB} \\ U_{jC} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} I_{iA}^{(C_1)} \\ I_{iB}^{(C_1)} \\ I_{iC}^{(C_1)} \\ \hline I_{jA}^{(C_1)} \\ I_{jB}^{(C_1)} \\ I_{jC}^{(C_1)} \end{array}\right] \quad (4)$$

设元件在节点 i 处发生 A 相断线故障,断点电压为 U_f,则式(4)将改写成

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} Y_{ii}^{AA(C_1)} & Y_{ii}^{AB(C_1)} & Y_{ii}^{AC(C_1)} & Y_{ij}^{AA(C_1)} & Y_{ij}^{AB(C_1)} & Y_{ij}^{AC(C_1)} \\ Y_{ii}^{BA(C_1)} & Y_{ii}^{BB(C_1)} & Y_{ii}^{BC(C_1)} & Y_{ij}^{BA(C_1)} & Y_{ij}^{BB(C_1)} & Y_{ij}^{BC(C_1)} \\ Y_{ii}^{CA(C_1)} & Y_{ii}^{CB(C_1)} & Y_{ii}^{CC(C_1)} & Y_{ij}^{CA(C_1)} & Y_{ij}^{CB(C_1)} & Y_{ij}^{CC(C_1)} \\ \hline Y_{ji}^{AA(C_1)} & Y_{ji}^{AB(C_1)} & Y_{ji}^{AC(C_1)} & Y_{jj}^{AA(C_1)} & Y_{jj}^{AB(C_1)} & Y_{jj}^{AC(C_1)} \\ Y_{ji}^{BA(C_1)} & Y_{ji}^{BB(C_1)} & Y_{ji}^{BC(C_1)} & Y_{jj}^{BA(C_1)} & Y_{jj}^{BB(C_1)} & Y_{jj}^{BC(C_1)} \\ Y_{ji}^{CA(C_1)} & Y_{ji}^{CB(C_1)} & Y_{ji}^{CC(C_1)} & Y_{jj}^{CA(C_1)} & Y_{jj}^{CB(C_1)} & Y_{jj}^{CC(C_1)} \end{array}\right]\left[\begin{array}{c} U_f \\ U_{iB} \\ U_{iC} \\ \hline U_{jA} \\ U_{jB} \\ U_{jC} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} I_f^{(C_1)} \\ I_{iB}^{(C_1)} \\ I_{iC}^{(C_1)} \\ \hline I_{jA}^{(C_1)} \\ I_{jB}^{(C_1)} \\ I_{jC}^{(C_1)} \end{array}\right] \quad (5)$$

由于 $I_f^{(C_1)} = 0$,因此可以利用高斯消去法在式(5)中消去 U_f 得到降阶后的方程:

$$\left[\begin{array}{cc|ccc} (Y_{ii}^{BB(C_1)})' & (Y_{ii}^{BC(C_1)})' & (Y_{ij}^{BA(C_1)})' & (Y_{ij}^{BB(C_1)})' & (Y_{ij}^{BC(C_1)}) \\ (Y_{ii}^{CB(C_1)})' & (Y_{ii}^{CC(C_1)})' & (Y_{ij}^{CA(C_1)})' & (Y_{ij}^{CB(C_1)})' & (Y_{ij}^{CC(C_1)}) \\ \hline (Y_{ji}^{AB(C_1)})' & (Y_{ji}^{AC(C_1)})' & (Y_{jj}^{AA(C_1)})' & (Y_{jj}^{AB(C_1)})' & (Y_{jj}^{AC(C_1)}) \\ (Y_{ji}^{BB(C_1)})' & (Y_{ji}^{BC(C_1)})' & (Y_{jj}^{BA(C_1)})' & (Y_{jj}^{BB(C_1)})' & (Y_{jj}^{BC(C_1)}) \\ (Y_{ji}^{CB(C_1)})' & (Y_{ji}^{CC(C_1)})' & (Y_{jj}^{CA(C_1)})' & (Y_{jj}^{CB(C_1)})' & (Y_{jj}^{CC(C_1)}) \end{array}\right]' = \left[\begin{array}{c} U_{iB} \\ U_{iC} \\ \hline U_{jA} \\ U_{jB} \\ U_{jC} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} I_{iB}^{(C_1)} \\ I_{iC}^{(C_1)} \\ \hline I_{jB}^{(C_1)} \\ I_{jC}^{(C_1)} \end{array}\right]$$

(6)

其中:

$$(Y_{ii}^{BB(C_1)})' = Y_{ii}^{BB(C_1)} - Y_{ii}^{BA(C_1)}(Y_{ii}^{AA(C_1)})^{-1}Y_{ii}^{AB(C_1)} \tag{7}$$

其他元素可以类推。

将 U_{iA} 引入方程组,用零表示相关导纳值,则有

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & (Y_{ii}^{BB(C_1)})' & (Y_{ii}^{BC(C_1)})' & (Y_{ij}^{BA(C_1)})' & (Y_{ij}^{BB(C_1)})' & (Y_{ij}^{BC(C_1)})' \\ 0 & (Y_{ii}^{CB(C_1)})' & (Y_{ii}^{CC(C_1)})' & (Y_{ij}^{CA(C_1)})' & (Y_{ij}^{CB(C_1)})' & (Y_{ij}^{CC(C_1)})' \\ \hline 0 & (Y_{ji}^{AB(C_1)})' & (Y_{ji}^{AC(C_1)})' & (Y_{jj}^{AA(C_1)})' & (Y_{jj}^{AB(C_1)})' & (Y_{jj}^{AC(C_1)})' \\ 0 & (Y_{ji}^{BB(C_1)})' & (Y_{ji}^{BC(C_1)})' & (Y_{jj}^{BA(C_1)})' & (Y_{jj}^{BB(C_1)})' & (Y_{jj}^{BC(C_1)})' \\ 0 & (Y_{ji}^{CB(C_1)})' & (Y_{ji}^{CC(C_1)})' & (Y_{jj}^{CA(C_1)})' & (Y_{jj}^{CB(C_1)})' & (Y_{jj}^{CC(C_1)})' \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} U_{iA} \\ U_{iB} \\ U_{iC} \\ \hline U_{jA} \\ U_{jB} \\ U_{jC} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} I_{iA}^{(C_1)} \\ I_{iB}^{(C_1)} \\ I_{iC}^{(C_1)} \\ \hline I_{jA}^{(C_1)} \\ I_{jB}^{(C_1)} \\ I_{jC}^{(C_1)} \end{array}\right] \tag{8}$$

上面的方程就是该元件 A 相断线后的相分量等效方程,或者可以写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} Y'_{ii} & Y'_{ij} \\ Y'_{ji} & Y'_{jj} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} U_i \\ U_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} \tag{9}$$

4　计算元件首端断线故障的参数修改法

根据文献[2],对于相分量法描述的一个 n 节点电力网络方程,可以写成如下的形式:

$$YU = I$$

即

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \cdots & & \cdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_1 \\ \cdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ \cdots \\ I_n \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中 $Y_{ij}(i \neq j)$ 是节点互导纳矩阵,Y_{ii} 是节点自导纳矩阵,U_i 是节点电压向量,I_i 是节点注入电流源向量,且有:

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} Y_{AA}^{ij} & Y_{AB}^{ij} & Y_{AC}^{ij} \\ Y_{BA}^{ij} & Y_{BB}^{ij} & Y_{BC}^{ij} \\ Y_{CA}^{ij} & Y_{CB}^{ij} & Y_{CC}^{ij} \end{bmatrix},\ U_i = \begin{bmatrix} U_A^i \\ U_B^i \\ U_C^i \end{bmatrix},\ I_i = \begin{bmatrix} I_A^i \\ I_B^i \\ I_C^i \end{bmatrix} \tag{11}$$

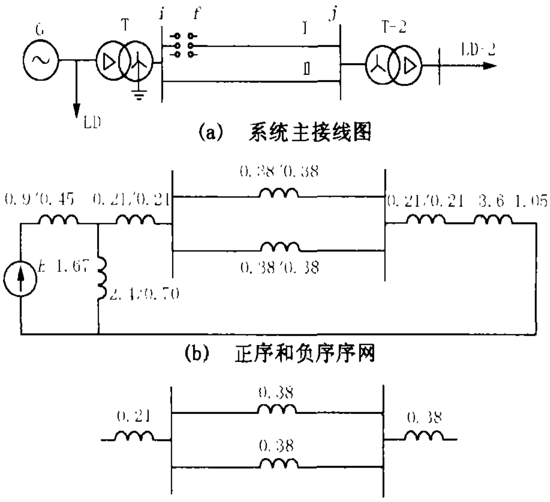
利用式(9)描述的元件导纳矩阵取代原来的元件导纳矩阵形成新的节点导纳网络方程,就可以计算出故障后的节点电压。

如果故障前形如式(10)的节点导纳网络方程已经写出,则可以用故障前后元件导纳值的变化量修改网络方程的导纳系数。比较式(1)和式(9),使用(C_1)来表示元件的导纳,得到修正矩阵:

$$\begin{cases} \Delta Y_{ii} = (Y_{ii}^{C_1})' - Y_{ii}^{C_1} \\ \Delta Y_{ij} = (Y_{ij}^{C_1})' - Y_{ij}^{C_1} \\ \Delta Y_{ji} = (Y_{ji}^{C_1})' - Y_{ji}^{C_1} \\ \Delta Y_{jj} = (Y_{jj}^{C_1})' - Y_{jj}^{C_1} \end{cases} \tag{12}$$

显然式(10)的网络方程相关矩阵只需加上对应的修正矩阵,就等同于断线故障处理。式(10)的所有矩阵和向量经过对称分量坐标变换,就得到了用式(12)表示的序分量网络方程。所以以上方法实际上既可以应用于相分量法,也可以适用于对称分量法。下面给出一个对称分量法求解的例子。

取文献[1]中161页的例题7-5作对比,系统模型和对应的序网列出如下:



(a)　系统主接线图

(b)　正序和负序序网

(c)　零序序网

图2　例题系统参数及序网

Fig. 1　Parameters and sequence network of example system

对于线路 I 其相分量参数为

$$Y_L = TY_{012}T^{-1} = T\begin{bmatrix} 1/z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/z_2 \end{bmatrix}T^{-1} = \begin{bmatrix} j2.6316 & 0 & 0 \\ 0 & j2.6316 & 0 \\ 0 & 0 & j2.6316 \end{bmatrix}$$

由于忽略对地电容,则相分量方程为

$$\begin{bmatrix} Y_L & -Y_L \\ -Y_L & Y_L \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix}$$

展开为

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} j2.6316 & 0 & 0 & -j2.6316 & 0 & 0 \\ 0 & j2.6316 & 0 & 0 & -j2.6316 & 0 \\ 0 & 0 & j2.6316 & 0 & 0 & -j2.6316 \\ \hline -j2.6316 & 0 & 0 & j2.6316 & 0 & 0 \\ 0 & -j2.6316 & 0 & 0 & j2.6316 & 0 \\ 0 & 0 & -j2.6316 & 0 & 0 & j2.6316 \end{array}\right]\left[\begin{array}{c} U_{iA} \\ U_{iB} \\ U_{iC} \\ \hline U_{jA} \\ U_{jB} \\ U_{jC} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} I_{iA}^{(C_1)} \\ I_{iB}^{(C_1)} \\ I_{iC}^{(C_1)} \\ \hline I_{jA}^{(C_1)} \\ I_{jB}^{(C_1)} \\ I_{jC}^{(C_1)} \end{array}\right] \tag{13}$$

对于 A 相断线,写出式(5)的形式

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} j2.6316 & 0 & 0 & -j2.6316 & 0 & 0 \\ 0 & j2.6316 & 0 & 0 & -j2.6316 & 0 \\ 0 & 0 & j2.6316 & 0 & 0 & -j2.6316 \\ \hline -j2.6316 & 0 & 0 & j2.6316 & 0 & 0 \\ 0 & -j2.6316 & 0 & 0 & j2.6316 & 0 \\ 0 & 0 & -j2.6316 & 0 & 0 & j2.6316 \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} V_f \\ V_{iB} \\ V_{iC} \\ \hline V_{jA} \\ V_{jB} \\ V_{jC} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} I_f^{(C_1)} \\ I_{iB}^{(C_1)} \\ I_{iC}^{(C_1)} \\ \hline I_{jA}^{(C_1)} \\ I_{jB}^{(C_1)} \\ I_{jC}^{(C_1)} \end{array}\right] \tag{14}$$

消去 U_f 加入 U_{iA} 得到形如式(8)的方程为:

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j2.6316 & 0 & 0 & -j2.6316 & 0 \\ 0 & 0 & j2.6316 & 0 & 0 & -j2.6316 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -j2.6316 & 0 & 0 & j2.6316 & 0 \\ 0 & 0 & -j2.6316 & 0 & 0 & j2.6316 \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} V_{iA} \\ V_{iB} \\ V_{iC} \\ \hline V_{jA} \\ V_{jB} \\ V_{jC} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} 0 \\ I_{iB}^{(C_1)} \\ I_{iC}^{(C_1)} \\ \hline I_{jA}^{(C_1)} \\ I_{jB}^{(C_1)} \\ I_{jC}^{(C_1)} \end{array}\right]$$

所以

$$\Delta Y_{ii} = \Delta Y_{jj} = \begin{bmatrix} -j2.6316 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta Y_{ij} = \Delta Y_{ji} = \begin{bmatrix} j2.6316 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

变换到对称分量为:

$$\Delta Y_{ii}^{012} = \Delta Y_{jj}^{012} = T^{-1} \Delta Y_{ii} T = \begin{bmatrix} -j0.8772 & -j0.8772 & -j0.8772 \\ -j0.8772 & -j0.8772 & -j0.8772 \\ -j0.8772 & -j0.8772 & -j0.8772 \end{bmatrix}$$

$$\Delta Y_{ij}^{012} = \Delta Y_{ji}^{012} = T^{-1} \Delta Y_{ii} T = \begin{bmatrix} j0.8772 & j0.8772 & j0.8772 \\ j0.8772 & j0.8772 & j0.8772 \\ j0.8772 & j0.8772 & j0.8772 \end{bmatrix}$$

故障前的网络节点导纳方程为

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} j10.025 & 0 & 0 & -j5.2632 & 0 & 0 \\ 0 & j6.4198 & 0 & 0 & -j5.2632 & 0 \\ 0 & 0 & j7.3296 & 0 & 0 & -j5.2632 \\ \hline -j5.2632 & 0 & 0 & j5.2632 & 0 & 0 \\ 0 & -j5.2632 & 0 & 0 & j5.5256 & 0 \\ 0 & 0 & -j5.2632 & 0 & 0 & j6.0568 \end{array}\right] = $$

$$\left[\begin{array}{c} U_{i0} \\ U_{i1} \\ U_{i2} \\ \hline U_{j0} \\ U_{j1} \\ U_{j2} \end{array}\right] = \begin{bmatrix} 0 \\ j1.4046 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

修正后得到:

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} j9.1478 & -j0.8772 & -j0.8772 & -j4.386 & j0.8772 & j0.8772 \\ -j0.8772 & j5.5426 & -j0.8772 & j0.8772 & -j4.386 & j0.8772 \\ -j0.8772 & -j0.8772 & j6.4524 & j0.8772 & j0.8772 & -j4.386 \\ \hline -j4.386 & j0.8772 & j0.8772 & j4.386 & -j0.8772 & -j0.8772 \\ j0.8772 & -j4.386 & j0.8772 & -j0.8772 & j4.6484 & -j0.8772 \\ j0.8772 & j0.8772 & -j4.386 & -j0.8772 & -j0.8772 & j5.1796 \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} U_{i0} \\ U_{i1} \\ U_{i2} \\ \hline U_{j0} \\ U_{j1} \\ U_{j2} \end{array}\right] = \begin{bmatrix} 0 \\ j1.4046 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

解得

$$\left[\begin{array}{c} U_{i0} \\ U_{i1} \\ U_{i2} \\ \hline U_{j0} \\ U_{j1} \\ U_{j2} \end{array}\right] = \begin{bmatrix} -0.000 \\ 1.0013 \\ 0.0038 \\ -0.0151 \\ 0.9394 \\ -0.0098 \end{bmatrix} \quad 或者 \quad \left[\begin{array}{c} U_{iA} \\ U_{iB} \\ U_{iC} \\ \hline U_{jA} \\ U_{jB} \\ U_{jC} \end{array}\right] = T \left[\begin{array}{c} U_{i0} \\ U_{i1} \\ U_{i2} \\ \hline U_{j0} \\ U_{j1} \\ U_{j2} \end{array}\right] = \begin{bmatrix} 1.0051 \\ -0.5026 - j0.8639 \\ -0.5026 + j0.8639 \\ 0.9145 \\ -0.4799 - j0.8220 \\ -0.4799 + j0.8220 \end{bmatrix}$$

由式(14)求得 $U_f = U_{iA} = 0.9145$,断口电压为 $\Delta U_A = U_{iA} - U_f = 0.0906$;有名值为 $\Delta U_a = \Delta U_A \times 115/\sqrt{3} = 6.02\ \text{kV}$。

根据式(13)得到非故障相的电流有名值为:

$$I_b = j2.6316(U_{iB} - U_{jB}) * 0.6\ \text{kA} = 0.0661584 - j0.03584 = 0.0752 e^{-j28.44°}$$

$$I_c = j2.6316(U_{ic} - U_{jc}) * 0.6\ \text{kA} = -0.0661584 - j0.03584 = 0.0752 e^{-j28.44°}$$

显然上述结果与教科书中的结果是一致的。

5 多重故障的处理

从上面的分析可以看到,故障处理是在式(4)元件方程中进行的。如果线路两端都发生断线故障,可以一并处理。处理的方法也并不复杂。以左端发生A相断线同时右端发生B相断线为例,则式(4)中可以用断线相电压 U_{ifA} 和 U_{jfB} 替换 U_{jA} 和 U_{jB},根据断线的边界条件 $I_{ifA}^{(C_1)} = 0$ 和 $I_{jfB}^{(C_1)} = 0$ 消去 U_{ifA} 和 U_{jfB},再将 U_{iA} 和 U_{jB} 补入方程,用零导纳表示相关参数,就可以得到故障后的元件相分量方程。求出修正参数矩阵代入网络方程就可以求出正确的解。如果同时发生节点上与断线相无关的短路,就可以直接使用文献[4]提出的短路计算方法求解。

另外,如果断线相发生短路故障,也可以方便地求解。下面通过例子给出计算方法。

仍然使用上面的例题,设线路左端出口处发生A相单相接地故障,该处断路器无时限跳闸后,另一端没有动作。写出此时网络方程的修正参数矩阵。

根据断线条件,可以看作是A相断线后,断线点发生单相接地。根据式(5),边界条件变成 $U_{ifA} = 0$,所以式(5)可以直接写成:

$$\left[\begin{array}{cc|ccc} Y_{ii}^{BB(C_1)} & Y_{ii}^{BC(C_1)} & Y_{ij}^{BA(C_1)} & Y_{ij}^{BB(C_1)} & Y_{ij}^{BC(C_1)} \\ Y_{ii}^{CB(C_1)} & Y_{ii}^{CC(C_1)} & Y_{ij}^{CA(C_1)} & Y_{ij}^{CB(C_1)} & Y_{ij}^{CC(C_1)} \\ \hline Y_{ji}^{AB(C_1)} & Y_{ji}^{AC(C_1)} & Y_{jj}^{AA(C_1)} & Y_{jj}^{AB(C_1)} & Y_{jj}^{AC(C_1)} \\ Y_{ji}^{BB(C_1)} & Y_{ji}^{BC(C_1)} & Y_{jj}^{BA(C_1)} & Y_{jj}^{BB(C_1)} & Y_{jj}^{BC(C_1)} \\ Y_{ji}^{CB(C_1)} & Y_{ji}^{CC(C_1)} & Y_{jj}^{CA(C_1)} & Y_{jj}^{CB(C_1)} & Y_{jj}^{CC(C_1)} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} U_{iB} \\ U_{iC} \\ \hline U_{jA} \\ U_{jB} \\ U_{jC} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} I_{iB}^{(C_1)} \\ I_{iC}^{(C_1)} \\ \hline I_{jA}^{(C_1)} \\ I_{jB}^{(C_1)} \\ I_{jC}^{(C_1)} \end{array}\right]$$

引入 U_{iA} 就可以直接写出线路的相分量方程:

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{ii}^{BB(C_1)} & Y_{ii}^{BC(C_1)} & Y_{ij}^{BA(C_1)} & Y_{ij}^{BB(C_1)} & Y_{ij}^{BC(C_1)} \\ 0 & Y_{ii}^{CB(C_1)} & Y_{ii}^{CC(C_1)} & Y_{ij}^{CA(C_1)} & Y_{ij}^{CB(C_1)} & Y_{ij}^{CC(C_1)} \\ \hline 0 & Y_{ji}^{AB(C_1)} & Y_{ji}^{AC(C_1)} & Y_{jj}^{AA(C_1)} & Y_{jj}^{AB(C_1)} & Y_{jj}^{AC(C_1)} \\ 0 & Y_{ji}^{BB(C_1)} & Y_{ji}^{BC(C_1)} & Y_{jj}^{BA(C_1)} & Y_{jj}^{BB(C_1)} & Y_{jj}^{BC(C_1)} \\ 0 & Y_{ji}^{CB(C_1)} & Y_{ji}^{CC(C_1)} & Y_{jj}^{CA(C_1)} & Y_{jj}^{CB(C_1)} & Y_{jj}^{CC(C_1)} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} U_{iA} \\ U_{iB} \\ U_{iC} \\ \hline U_{jA} \\ U_{jB} \\ U_{jC} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} I_{iA}^{(C_1)} \\ I_{iB}^{(C_1)} \\ I_{iC}^{(C_1)} \\ \hline I_{jA}^{(C_1)} \\ I_{jB}^{(C_1)} \\ I_{jC}^{(C_1)} \end{array}\right]$$

对比原矩阵就可以写出补偿矩阵:

$$\Delta Y_{ii} = \begin{bmatrix} -j2.6316 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta Y_{ij} = \Delta Y_{ji} = \begin{bmatrix} j2.6316 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta Y_{jj} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

变换到对称分量坐标下修改网络方程得到:

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} j9.1478 & -j0.8772 & -j0.8772 & -j4.386 & j0.8772 & j0.8772 \\ -j0.8772 & j5.5426 & -j0.8772 & j0.8772 & -j4.386 & -j0.8772 \\ -j0.8772 & -j0.8772 & j6.4524 & j0.8772 & j0.8772 & -j4.386 \\ \hline -j4.386 & j0.8772 & j0.8772 & j5.2632 & 0 & 0 \\ j0.8772 & -j4.386 & j0.8772 & 0 & j5.5256 & 0 \\ j0.8772 & j0.8772 & -j4.386 & 0 & 0 & j6.0568 \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} U_{i0} \\ U_{i1} \\ U_{i2} \\ \hline U_{j0} \\ U_{j1} \\ U_{j2} \end{array}\right] = \begin{bmatrix} 0 \\ j1.4046 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

直接解此方程就可以得到最后的解。

6　结论

本文提出了一种通用的线路非全相运行条件下的故障计算方法,可以直接计算一条线路两端同时发生的断线和断线加短路故障。方法简单,同时适用于对称分量法和相分量法。使用对称分量法时无需修改序网,也无需作高阻抗模拟操作,直接计算准确的解,非常适合继电保护工作人员分析线路故障使用。

参考文献:

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

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

[3]　姜彤,郭志忠,陈学允,等. 电力系统多态相分量法的故障分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2001,33(4):505 - 507.

[4]　姜彤. 电力系统故障分析及其多态计算方法的研究(博士学位论文)[D]. 哈尔滨工业大学,2002.

收稿日期:　2002-01-21;　　**修回日期**:　2002-03-28

作者简介:

姜　彤(1970 -),男,博士,副教授,从事电力系统计算机应用方面的研究;

郭志忠(1961 -),男,博士,教授,博导,主要研究方向是电力系统分析与控制、光学电流互感器、电力市场等。

A new method of fault calculation on open-conductor condition

JIANG Tong, GUO Zhi-hong, CHEN Xue-yun

(Harbin Institute of Technology, School of Electrical Engineering and Automation, Harbin 150001, China)

Abstract:　Using phase components equation of element and analysis of conditions at the faults, a new method of fault calculation about open conductors condition is presented, which can be used in phase coordinates and symmetrical components coordinates by node admittance network equation and no bus need to be created. The method is canonical and suitable for computer analysis. Special simultaneous faults can be also done by this method and a calculation example is given.

Key words:　open conductors;　faults calculation;　symmetrical components;　phase components

(上接第 13 页)

Abstract:　in this paper, after analyzing decoupling of the star circuit with three pairs of coupling inductance coils, a simple and practical decoupling rule for the equivalent circuit with star decoupling is presented. Furthermore, a rigorously theoretical proof is be given making use of circuit theory and matrix theory. It can be extended to the star circuit with multipairs of coupling inductance coils. The calculation of the star circuit with multijugate coupling inductance coils can be predigested using the decouping rule.

Key words:　multijugate coupling;　star connection;　decoupling rule