

具有相移的不同电压等级电网中 双重故障计算

武汉水利电力学院 王 睿

摘要 本文采用无相移电网中双重故障的计算方法进行经相移变压器联系的不同电压等级电网中双重故障计算,对具有代表意义的Y₀侧和△侧电网各发生简单故障所构成的串一串型双重故障进行分析并导出计算步骤,最后通过一算例进行验证。

关键词 双重故障 双口网络 阻抗矩阵

1 前言

110kV及以上电网属大接地电流系统,本文称Y₀侧电网,35kV及以下(除0.4kV外)属小接地电流系统,称△侧电网,(部分情况除外)。联网运行时,△侧电压一般超前于Y₀侧30°。由于电网规模不断增大,对Y₀侧和△侧电网同时发生故障的计算也很有必要。

能否采用同一电压等级或没有相移的不同电压等级电网中的计算方法,例如双口网络算法,来进行具有相移的不同电压等级电网的双重故障计算呢?我们下面进行分析。

2 理论分析

设系统只有Y₀侧和△侧两个电压等级,且正常运行时△侧电压超前Y₀侧角度为α,(当变压器为Y/△-11接线时,α=30°),第一处故障在Y₀侧,第二处在△侧,故障类型为串一串型,故障均发生在节点处。

2.1. 节点方程分析

设正(负)、零序网节点数分别为n₁和n₀;对于正(负)序,其中1, …, m₁个节点在Y₀侧, m₁ + 1, …, n₁个在△侧。对零序有n₀个节点全部在Y₀侧,则正序节点方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{Y(1)} \\ \dot{U}_{\Delta(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{YY(1)} & Z_{Y\Delta(1)} \\ Z_{\Delta Y(1)} & Z_{\Delta\Delta(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{Y(1)} \\ \dot{I}_{\Delta(1)} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

式中 $\dot{U}_{Y(1)} = [\dot{U}_{1(1)}, \dots, \dot{U}_{m_1(1)}]^T$ —— Y₀侧各节点正序电压。

$\dot{U}_{\Delta(1)} = [\dot{U}_{m_1+1(1)}, \dots, \dot{U}_{n_1(1)}]^T$ —— △侧各节点正序电压。

类似地, $\dot{I}_{Y(1)}$ 、 $\dot{I}_{\Delta(1)}$ 分别为Y₀侧和△侧各节点正序电流列向量。 $Z_{YY(1)}$ 、 $Z_{Y\Delta(1)}$ 、

$Z_{\Delta Y(1)}$ 、 $Z_{\Delta\Delta(1)}$ 为节点阻抗矩阵中以Y₀侧和Δ侧节点分块子矩阵。

负序节点方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{Y(2)} \\ \dot{U}_{\Delta(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{YY(2)} & Z_{Y\Delta(2)} \\ Z_{\Delta Y(2)} & Z_{\Delta\Delta(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{Y(2)} \\ \dot{I}_{\Delta(2)} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

零序节点方程为:

$$\dot{U}_{Y(0)} = Z_{YY(0)} \dot{I}_{Y(0)} \quad (2-3)$$

式中 $\dot{U}_{Y(0)} = [\dot{U}_{1(0)}, \dots, \dot{U}_{n_0(0)}]^T$

$$\dot{I}_{Y(0)} = [\dot{I}_{1(0)}, \dots, \dot{I}_{n_0(0)}]^T$$

$Z_{YY(0)}$ 为 $n_0 \times n_0$ 阶零序节点阻抗矩阵。

由于Y₀侧与Δ侧间有相移,所以节点阻抗矩阵不对称,即 $Z_{Y\Delta(s)} \neq Z_{\Delta Y(s)}^T$ ($s=1,2$),并且考虑电阻 $R=0$ 时,也为复数矩阵,而不计相移时节点方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}'_{Y(1)} \\ \dot{U}'_{\Delta(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{YY(1)} & Z'_{Y\Delta(1)} \\ Z'_{\Delta Y(1)} & Z'_{\Delta\Delta(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}'_{Y(1)} \\ \dot{I}'_{\Delta(1)} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}'_{Y(2)} \\ \dot{U}'_{\Delta(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{YY(2)} & Z'_{Y\Delta(2)} \\ Z'_{\Delta Y(2)} & Z'_{\Delta\Delta(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}'_{Y(2)} \\ \dot{I}'_{\Delta(2)} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

$$\dot{U}'_{Y(0)} = Z'_{YY(0)} \dot{I}'_{Y(0)} \quad (2-6)$$

由于不计相移且考虑 $R=0$ 时,则节点序阻抗矩阵为对称的实数矩阵,有 $Z'_{Y\Delta(s)} = Z'_{\Delta Y(s)}$ ($s=1,2$)。

(1)以Y₀侧电网为参考时,并考虑相移 α ,有:

正序

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Y(1)} &= \dot{U}'_{Y(1)}, & \dot{U}_{\Delta(1)} &= \dot{U}'_{\Delta(1)} e^{j\alpha}, & Z_{YY(1)} &= Z'_{YY(1)}, & Z_{Y\Delta(1)} &= Z'_{Y\Delta(1)} e^{-j\alpha}, \\ \dot{I}_{Y(1)} &= \dot{I}'_{Y(1)}, & \dot{I}_{\Delta(1)} &= \dot{I}'_{\Delta(1)} e^{j\alpha}, & Z_{\Delta Y(1)} &= Z'_{\Delta Y(1)} e^{j\alpha}, & Z_{\Delta\Delta(1)} &= Z'_{\Delta\Delta(1)} \end{aligned} \quad (2-7)$$

负序:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Y(2)} &= \dot{U}'_{Y(2)}, & \dot{U}_{\Delta(2)} &= \dot{U}'_{\Delta(2)} e^{-j\alpha}, & Z_{YY(2)} &= Z'_{YY(2)}, & Z_{Y\Delta(2)} &= Z'_{Y\Delta(2)} e^{j\alpha}, \\ \dot{I}_{Y(2)} &= \dot{I}'_{Y(2)}, & \dot{I}_{\Delta(2)} &= \dot{I}'_{\Delta(2)} e^{-j\alpha}, & Z_{\Delta Y(2)} &= Z'_{\Delta Y(2)} e^{-j\alpha}, & Z_{\Delta\Delta(2)} &= Z'_{\Delta\Delta(2)} \end{aligned} \quad (2-8)$$

零序:

$$\dot{U}_{Y(0)} = \dot{U}'_{Y(0)}, \quad \dot{I}_{Y(0)} = \dot{I}'_{Y(0)}, \quad Z_{YY(0)} = Z'_{YY(0)} \quad (2-9)$$

将(2-7)代入(2-1)中,经整理有:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{Y(1)} \\ \dot{U}_{\Delta(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{YY(1)} & Z'_{Y\Delta(1)} \\ Z'_{\Delta Y(1)} & Z'_{\Delta\Delta(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{Y(1)} \\ \dot{I}_{\Delta(1)} \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

式中 $\dot{U}'_{\Delta(1)} = \dot{U}_{\Delta(1)} e^{-j\alpha}$, $\dot{I}'_{\Delta(1)} = \dot{I}_{\Delta(1)} e^{-j\alpha}$

同理,将(2-8)代入(2-2)中有:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{Y(2)} \\ \dot{U}'_{\Delta(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{YY(2)} & Z'_{Y\Delta(2)} \\ Z'_{\Delta Y(2)} & Z'_{\Delta\Delta(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{Y(2)} \\ \dot{I}'_{\Delta(2)} \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

式中 $\dot{U}'_{\Delta(2)} = \dot{U}_{\Delta(2)} e^{j\alpha}$, $\dot{I}'_{\Delta(2)} = \dot{I}_{\Delta(2)} e^{j\alpha}$

当正序与负序参数相同时有 $Z'_{YY(2)} = Z'_{YY(1)}$, $Z'_{\Delta\Delta(2)} = Z'_{\Delta\Delta(1)}$, $Z'_{Y\Delta(2)} = Z'_{Y\Delta(1)}$, $Z'_{\Delta Y(2)} = Z'_{\Delta Y(1)}$

$$\dot{U}_{Y(0)} = Z'_{YY(0)} \dot{I}_{Y(0)} \quad (2-12)$$

(2) 当以 Δ 侧为参考时, 类似分析。本文以 Y_0 侧为参考。

2.2 口阻抗方程

由于第一、二处故障分别发生在 Y_0 侧和 Δ 侧电网中, 根据(2-10)~(2-12)分析, 有:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}'_{1(1)} \\ \dot{U}'_{2(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{11(1)} & Z'_{12(1)} \\ Z'_{21(1)} & Z'_{22(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}'_{1(1)} \\ \dot{I}'_{2(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}'_{P1(1)} \\ \dot{U}'_{P2(1)} \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

式中 $\dot{U}'_{2(1)} = \dot{U}_{2(1)} e^{-j\alpha}$, $\dot{I}'_{2(1)} = \dot{I}_{2(1)} e^{-j\alpha}$, $\dot{U}'_{P2(1)} = \dot{U}_{P2(1)} e^{-j\alpha}$

$\dot{U}'_{2(1)}$ 为不计相移时第二口正序电压, $\dot{U}_{2(1)}$ 为考虑相移时第二口正序电压, $Z'_{11(1)}$ 、 $Z'_{12(1)}$ 、 $Z'_{21(1)}$ 、 $Z'_{22(1)}$ 为不计相移时所求出的口阻抗参数。

$$\begin{bmatrix} \dot{U}'_{1(2)} \\ \dot{U}'_{2(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{11(2)} & Z'_{12(2)} \\ Z'_{21(2)} & Z'_{22(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}'_{1(2)} \\ \dot{I}'_{2(2)} \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

式中 $\dot{U}'_{2(2)} = \dot{U}_{2(2)} e^{j\alpha}$, $\dot{I}'_{2(2)} = \dot{I}_{2(2)} e^{j\alpha}$

$$\dot{U}_{1(0)} = Z'_{11(0)} \dot{I}_{1(0)} \quad (2-15)$$

2.3 边界条件方程

因为故障为串一串型, 则边界方程为(并注意第二口零序分量不存在)

$$\begin{bmatrix} n_{1(1)} & \\ & n_{2(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}'_{1(1)} \\ \dot{U}'_{2(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{1(2)} & \\ & n_{2(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}'_{1(2)} \\ \dot{U}'_{2(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(0)} \\ \dot{U}_{2(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

$$\begin{bmatrix} n_{1(1)} & \\ & n_{2(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}'_{1(1)} \\ \dot{I}'_{2(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{1(2)} & \\ & n_{2(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}'_{1(2)} \\ \dot{I}'_{2(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(0)} \\ \dot{I}_{2(0)} \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

将(2-13)、(2-14)中 $\dot{U}_{2(1)} = \dot{U}'_{2(1)} e^{j\alpha}$, $\dot{I}_{2(1)} = \dot{I}'_{2(1)} e^{j\alpha}$ 和 $\dot{U}_{2(2)} = \dot{U}'_{2(2)} e^{-j\alpha}$, $\dot{I}_{2(2)} = \dot{I}'_{2(2)} e^{-j\alpha}$ 代入以上两式中有:

$$\begin{bmatrix} n_{1(1)} & \\ & n'_{2(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}'_{1(1)} \\ \dot{U}'_{2(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{1(2)} & \\ & n'_{2(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}'_{1(2)} \\ \dot{U}'_{2(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(0)} \\ \dot{U}_{2(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

$$\begin{bmatrix} n_{1(1)} & \\ & n'_{2(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}'_{1(1)} \\ \dot{I}'_{2(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{1(2)} & \\ & n'_{2(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}'_{1(2)} \\ \dot{I}'_{2(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(0)} \\ \dot{I}_{2(0)} \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

式中 $n'_{2(1)} = n_{2(1)} e^{j\alpha}$

$$\dot{n}'_{2(2)} = n_{2(2)} e^{-j\theta}$$

3 计算步骤

以串一串型故障为例，设第一故障点在Y₀侧，第二故障点在△侧。

3.1 根据故障类型，分别形成不计相移的各序口阻抗矩阵。

3.2 对考虑相移时求出的 $\dot{U}'_{P2(1)}$ 进行修正得 $\dot{U}'_{P2(1)} = \dot{U}'_{P2(1)} e^{-j\theta}$ 。

3.3 对第二口的算子符号进行修正， $n'_{2(1)} = n_{2(1)} e^{j\theta}$ ， $n'_{2(2)} = n_{2(2)} e^{-j\theta}$ 。

3.4 用边界方程（2—18），（2—19）和口阻抗方程（2—13）~（2—15）计算出正序口电流 $\dot{I}'_{1(1)}$ 、 $\dot{I}'_{2(1)}$ 。（因为第二口的零序分量不存在）。

3.5 由式（2—17）求出 $\dot{I}'_{1(2)}$ 、 $\dot{I}'_{2(2)}$ 、 $\dot{I}'_{1(0)}$ 后，求出各节点不计相移的序注入电流（故障分量+正常分量），并注意正常注入电流中△侧的电流应修正，（ $\dot{I}'_{i(0)} = \dot{I}'_{i(0)} e^{-j\theta}$ ，i为△侧任意一节点）。

3.6 求出不计相移时各节点序电压后，对△侧各节点的正、负序电压进行相位修正得各节点实际序电压。（ $\dot{U}_{i(1)} = \dot{U}'_{i(1)} e^{j\theta}$ ， $\dot{U}_{i(2)} = \dot{U}'_{i(2)} e^{-j\theta}$ ，i为△侧任意节点）。

3.7 求出各支路序电流后，可求出各节点的全电压，各支路的全电流。

4 算例

本文通过一算例对上述计算步骤加以验证。

某系统如图4—1所示。其标么值参数如下：

发电机L： $Z_{(1)} = Z_{(2)} = j0.12$

$$Z_{(0)} = j0.1, \dot{E}_L = 1.1 \angle 30^\circ$$

等值电源R： $Z_{(1)} = Z_{(2)} = Z_{(0)} = j0.15$

$$E_R = 1.0 \angle 0^\circ$$

变压器C—B： $Z_{(1)} = Z_{(2)} = Z_{(0)} = j0.1$ ，Y/△—11

线路A—B： $Z_{(1)} = Z_{(2)} = j0.5$ ， $Z_{(0)} = j1.0$

C母线处a、b两相断线，A母线处a相接地。

〔解〕将电压源化为电流源，则故障前各节点注入电流为：

$$\begin{bmatrix} 6.6667 \angle -90^\circ & 0 & 9.1667 \angle -60^\circ & 0 \\ A & B & C & T_2 \end{bmatrix}^T$$

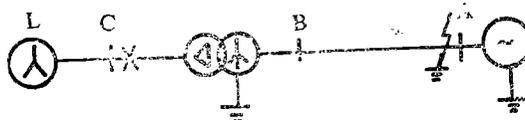


图4—1 算例的系统接线图

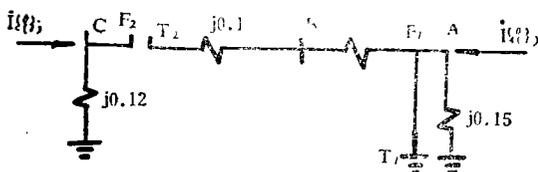


图4—2 正序网及参数

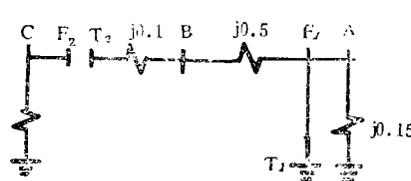


图4—3 负序网及参数

由于C点注入电流在△侧，则此电流相位修正后，不计相移各节点注入电流为：
 $[6.6667 \angle -90^\circ, 0, 9.1667 \angle -90^\circ, 0]^T$ 。

不计相移各序网如图4-2、4-3、4-4所示。

不计相移的正(负)序节点阻抗矩阵为：

$$\begin{matrix} (F_1) A \\ B \\ (F_2) C \\ T_2 \end{matrix} \begin{pmatrix} j0.15 & j0.15 & 0 & j0.15 \\ j0.15 & j0.65 & 0 & j0.65 \\ 0 & 0 & j0.12 & 0 \\ j0.15 & j0.65 & 0 & j0.75 \end{pmatrix}$$

$$\text{零序节点阻抗矩阵为 } (F_1) \begin{matrix} A \\ B \end{matrix} \begin{bmatrix} j0.132 & j0.012 \\ j0.012 & j0.092 \end{bmatrix}$$

由正序节点阻抗矩阵和故障前各节点注入电流可计算出故障前各节点电压为：

$$[\dot{U}_{1(0)}, \dot{U}_{2(0)}, \dot{U}_{3(0)}, \dot{U}'_{2(0)}]^T = [1.0 \angle 0^\circ, 1.0 \angle 0^\circ, 1.1 \angle 0^\circ, 1.0 \angle 0^\circ]^T$$

则不计相移时，故障口的开路电压为：

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(1)} \\ \dot{U}'_{2(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0 \angle 0^\circ \\ -0.1 \angle 0^\circ \end{bmatrix}$$

不计相移时各序口阻抗方程分别为：

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(1)} \\ \dot{U}'_{2(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j0.15 & -j0.15 \\ -j0.15 & j0.87 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(1)} \\ \dot{I}'_{2(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(0)} \\ \dot{U}'_{2(0)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(2)} \\ \dot{U}'_{2(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j0.15 & -j0.15 \\ -j0.15 & j0.87 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(2)} \\ \dot{I}'_{2(2)} \end{bmatrix}$$

$$\dot{U}_{1(0)} = j0.132 \dot{I}_{1(0)}$$

由于第一故障处特殊相是a相，第二处为C相则：

$$n_{1(1)} = n_{1(2)} = 1$$

$$n_{2(1)} = a, n_{2(2)} = a^2, \text{ 则 } n'_{2(1)} = n_{2(1)} e^{j30^\circ} = e^{j150^\circ}$$

$$n'_{2(2)} = n_{2(2)} e^{-j30^\circ} = e^{-j150^\circ}$$

由口阻抗方程及边界方程(2-18)、(2-19)可求出不计相移时第一、二口正序电流。

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{1(1)} \\ \dot{I}'_{2(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.5765 \angle 89.6^\circ \\ 0.4366 \angle 115.8^\circ \end{bmatrix}$$

$$\text{进而可算出 } \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(2)} \\ \dot{I}'_{2(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.5765 \angle 89.6^\circ \\ 0.4366 \angle 55.8^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(0)} \end{bmatrix}$$

由各序口电流得出不计相移时，各节点注入电流为：

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{A(1)} \\ \dot{I}_{B(1)} \\ \dot{I}_{C(1)} \\ \dot{I}'_{2(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.5765 \angle 89.6^\circ + 6.6667 \angle -90^\circ \\ 0 \\ 0.4366 \angle 115.8^\circ + 9.1667 \angle -90^\circ \\ -0.4366 \angle 115.8^\circ \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \dot{I}_{A(2)} \\ \dot{I}_{B(2)} \\ \dot{I}_{C(2)} \\ \dot{I}'_{2(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.5765 \angle 89.6^\circ \\ 0 \\ 0.4366 \angle 55.8^\circ \\ -0.4366 \angle 55.8^\circ \end{pmatrix},$$

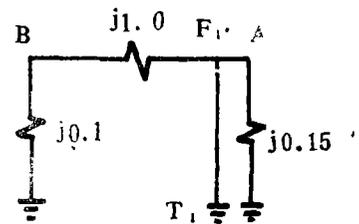


图4-4 零序网及参数

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{A(0)} \\ \dot{I}_{B(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.5765 \angle 89.6^\circ \\ 0 \end{bmatrix}$$

由节点方程计算出节点 A、C、T₂ 处各序电压（不计相移）

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{A(1)} \\ \dot{U}_{C(1)} \\ \dot{U}_{T_2(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.6726 \angle 0^\circ \\ 1.0529 \angle 0^\circ \\ 0.9198 \angle 9.1^\circ \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \dot{U}_{A(2)} \\ \dot{U}_{C(2)} \\ \dot{U}_{T_2(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3323 \angle 180^\circ \\ 0.0524 \angle 145.8^\circ \\ 0.215 \angle -122.5^\circ \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \dot{U}_{A(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.34 \angle 0^\circ \end{bmatrix}$$

考虑相移时各节点实际序电压为：

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{A(1)} \\ \dot{U}_{C(1)} \\ \dot{U}_{T_2(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.6726 \angle 0^\circ \\ 1.0529 \angle 30^\circ \\ 0.9198 \angle 39.1^\circ \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \dot{U}_{A(2)} \\ \dot{U}_{C(2)} \\ \dot{U}_{T_2(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3323 \angle 180^\circ \\ 0.0524 \angle 115.8^\circ \\ 0.215 \angle -152.5^\circ \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \dot{U}_{A(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.34 \angle 0^\circ \end{bmatrix}$$

各节点实际全电压

| 节点 电压 相 | A (F1) | C (F2) | T ₂ |
|----------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| U _a | 0 | 1.058 \angle 32.8° | 0.7105 \angle 42.58° |
| U _b | 1.0088 \angle -120.4° | 1.0965 \angle -91.5° | 1.0745 \angle -72.3° |
| U _c | 1.0088 \angle 120.4° | 1.0057 \angle 148° | 1.0054 \angle 147.8° |

从表中可看出：在 A 母线处 a 相接地 $\dot{U}_a = 0$ ，在 C 母线处 a、b 相断线 $\dot{U}_c = 0$ （计算误差），证明计算方法是正确的。

5 结论

5.1 具有相移的电网中双重故障可用不计相移时双重故障的计算方法进行计算。只需计算前将有关参数进行相位修正。计算后再对各节点序电压再进行相位修正以符合电网的实际接线。

5.2 用计算机编程易于实现，且有计算速度快，占用内存少等优点。

5.3 对其他类型的双重故障，可类似分析。

参 考 文 献

- [1] 华北电力学院主编。电力系统故障分析。水利电力出版社。1984年6月。
- [2] [美] G·L·库希克著，廖培金等译。电力系统计算机辅助分析。西安交通大学出版社。1989年1月。