基于短路故障残压变换法的暂态稳定计算

白雪峰[1]，徐 英[1]，姜 彤[2]

(1. 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；
2. 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 102206)

摘要： 基于短路故障残压变换法，提出了电力系统不对称暂态稳定计算方法。该方法结合了相分量法模型适应性和对称分量法计算效率高的优点，通过矩阵变换形成暂态稳定计算的机网接口和正序等效导纳矩阵，避免了复杂的复合序网形成过程。该方法既能应用于相分量坐标，也能应用于对称分量坐标，能够实现对多重故障和参数不对称元件的处理。仿真结果表明该方法简洁有效。

关键词： 暂态稳定；故障残压变换；对称分量；相分量

中图分类号： TM712；TM744

0 引言

对称分量坐标下的分析方法是电力系统分析与计算中最常用的方法[1]。对称分量坐标下的相序分离是建立在网络元件参数对称基础上的，网络元件参数的不对称使得相应的序网模型不再具有序分量独立性，不对称元件在对称分量空间不能解耦，因此处理故障的序网变换就失去了意义[2]。相分量法是对实际系统的准确描述，没有前提和假设，因此可以准确地处理各种不对称情况，模拟故障和操作都非常简单，计算准确。但如果完全采用相分量法[3-7]，则计算速度上会造成额外的负担。

通常采用的对称分量法是参数对称网络解算的最佳方法，但不能从实质上解决参数不对称问题；采用相分量法可以解算参数不对称网络，但计算量非常大。考虑到电力系统大多数元件都是对称的这一实际情况，对对称分量法进行改造，将其与相分量法相结合，使其能够适应含有不对称元件的网络，这样将具有重大意义。文献[8]以矩阵的形式对故障模型和算法进行总结，论述了对任意复杂多重故障的故障电流计算采用统一的数学描述和规范的求解方法，并指出利用相分量法和对称分量法相结合是解决不对称故障计算的有效途径。文献[9-10]将对称分量法与相分量法相结合进行电力系统故障分析，基于相分量法短路故障处理模型，采用对称分量法进行网络解算，保留了传统相分量法的所有优点，可以处理对称分量法无法处理的各种不对称情况，在网络参数完全对称的情况下，通过等效变换技术实现了与对称分量法完全相同的计算效率，为相分量法的实用化创造了条件。

暂态稳定计算中采用的导纳矩阵是考虑了负序和零序影响的正序导纳矩阵[11]。文献[12]根据暂态稳定计算的这一特点，提出了一种利用高斯消去法形成暂态稳定计算用等效正序导纳矩阵的计算方法，可以考虑参数不对称情况下的暂态稳定计算。但故障处理采用阻抗模拟的方法，由此带来了一定的计算误差。

本文采用短路故障残压变换法进行故障处理，通过矩阵变换，将相分量法和对称分量法相结合的方法应用于暂态稳定计算中。该方法既能应用于相分量坐标，也能应用于对称分量坐标，能够实现对多重故障和参数不对称元件的处理。

1 短路故障残压变换法

电力网络中大部分元件都是对称的，采用对称分量法可以最大限度地减少计算量，因此，本文采用对称分量模型描述对称元件[11]，采用相分量模型描述不对称元件[7]。

为简便起见，首先针对三相对称网络进行分析，设电力网络的节点数为 n，相分量坐标下网络的导纳方程如下(所有元素均采用标幺值和复向量)：

$$\boldsymbol{Y}^{(\mathrm{abc})}\boldsymbol{V}^{(\mathrm{abc})} = \boldsymbol{I}^{(\mathrm{abc})} \tag{1}$$

即

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

收稿日期：2008-09-12；修回日期：2008-10-15。
国家自然科学基金资助项目(50307003)；哈尔滨工业大学科研创新基金资助项目(HIT. NSRIF. 2008. 54)。

式中：

$$\boldsymbol{Y}_{ij}=\begin{bmatrix} y_{ij}^{(aa)} & y_{ij}^{(ab)} & y_{ij}^{(ac)} \\ y_{ij}^{(ba)} & y_{ij}^{(bb)} & y_{ij}^{(bc)} \\ y_{ij}^{(ca)} & y_{ij}^{(cb)} & y_{ij}^{(cc)} \end{bmatrix};\boldsymbol{V}_j=\begin{bmatrix} V_j^{(a)} \\ V_j^{(b)} \\ V_j^{(c)} \end{bmatrix};\boldsymbol{I}_j=\begin{bmatrix} I_j^{(a)} \\ I_j^{(b)} \\ I_j^{(c)} \end{bmatrix};$$

$i,j=1,2,\cdots,n$。

设节点 j 发生 A 相单相接地故障，故障可以被看做是在该节点产生一个注入电流 $\boldsymbol{I}_{sc}$，使得故障点 A 相对地电压为 0。式(1)可写成：

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{Y}_{11} & \boldsymbol{Y}_{12} & \cdots & \boldsymbol{Y}_{1j} & \cdots & \boldsymbol{Y}_{1n} \\ \boldsymbol{Y}_{21} & \boldsymbol{Y}_{22} & \cdots & \boldsymbol{Y}_{2j} & \cdots & \boldsymbol{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{Y}_{j1} & \boldsymbol{Y}_{j2} & \cdots & \boldsymbol{Y}_{jj} & \cdots & \boldsymbol{Y}_{jn} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{Y}_{n1} & \boldsymbol{Y}_{n2} & \cdots & \boldsymbol{Y}_{nj} & \cdots & \boldsymbol{Y}_{nn} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \boldsymbol{V}_1 \\ \boldsymbol{V}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{V}_j \\ \vdots \\ \boldsymbol{V}_n \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_1 \\ \boldsymbol{I}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{I}_j \\ \vdots \\ \boldsymbol{I}_n \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} \\ \vdots \\ \boldsymbol{I}_{sc} \\ \vdots \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{I}_{sc}=[I_f^{(a)},0,0]^T$；$\boldsymbol{V}_j=[0,V_j^{(b)},V_j^{(c)}]^T$。

由式(3)可以整理得：

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{Y}_{11} & \boldsymbol{Y}_{12} & \cdots & \boldsymbol{Y}_{1j}' & \cdots & \boldsymbol{Y}_{1n} \\ \boldsymbol{Y}_{21} & \boldsymbol{Y}_{22} & \cdots & \boldsymbol{Y}_{2j}' & \cdots & \boldsymbol{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{Y}_{j1} & \boldsymbol{Y}_{j2} & \cdots & \boldsymbol{Y}_{jj}' & \cdots & \boldsymbol{Y}_{jn} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{Y}_{n1} & \boldsymbol{Y}_{n2} & \cdots & \boldsymbol{Y}_{nj}' & \cdots & \boldsymbol{Y}_{nn} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \boldsymbol{V}_1 \\ \boldsymbol{V}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{V}_j' \\ \vdots \\ \boldsymbol{V}_n \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_1 \\ \boldsymbol{I}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{I}_j \\ \vdots \\ \boldsymbol{I}_n \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：

$$\boldsymbol{V}_j'=[I_f^{(a)},V_j^{(b)},V_j^{(c)}]^T$$

$$\boldsymbol{Y}_{ij}'=\begin{bmatrix} 0 & y_{ij}^{(ab)} & y_{ij}^{(ac)} \\ 0 & y_{ij}^{(bb)} & y_{ij}^{(bc)} \\ 0 & y_{ij}^{(cb)} & y_{ij}^{(cc)} \end{bmatrix} \qquad i\neq j$$

$$\boldsymbol{Y}_{jj}'=\begin{bmatrix} -1 & y_{jj}^{(ab)} & y_{jj}^{(ac)} \\ 0 & y_{jj}^{(bb)} & y_{jj}^{(bc)} \\ 0 & y_{jj}^{(cb)} & y_{jj}^{(cc)} \end{bmatrix}$$

将式(4)与式(2)相比较可知：

$$\begin{cases} \boldsymbol{Y}_{ij}'=\boldsymbol{Y}_{ij}\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}=\boldsymbol{Y}_{ij}\boldsymbol{T}_1 & i\neq j \\ \boldsymbol{Y}_{jj}'=\boldsymbol{Y}_{jj}\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}=\boldsymbol{Y}_{jj}\boldsymbol{T}_1+\boldsymbol{T}_2 \end{cases} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{T}_1$，$\boldsymbol{T}_2$ 定义为故障转换矩阵。

表 1 给出了以 A 相为特殊相时不同故障类型下的转换矩阵和等效电压向量。

表 1 A 相为特殊相时各故障下的转换矩阵和等效电压向量

Table 1 Conversion matrices and equivalent fault bus voltage phasors for fault at bus *j* with referring phase A

故障类型	$\boldsymbol{T}_1$	$\boldsymbol{T}_2$	$\boldsymbol{V}_j'$
单相接地短路	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} I_f^{(a)} \\ V_j^{(b)} \\ V_j^{(c)} \end{bmatrix}$
两相接地短路	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} V_j^{(a)} \\ I_f^{(b)} \\ I_f^{(c)} \end{bmatrix}$
两相短路	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} V_j^{(a)} \\ V_j^{(b)} \\ I_f^{(b)} \end{bmatrix}$
三相短路	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} V_j^{(a)} \\ I_f^{(a)} \\ I_f^{(b)} \end{bmatrix}$
三相接地短路	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} I_f^{(a)} \\ I_f^{(b)} \\ I_f^{(c)} \end{bmatrix}$

短路故障残压变换法通过相分量法描述故障，在这个过程中不需要复杂的序网变换和序网连接，同时可以很方便地对多重故障进行描述。

在电力系统暂态稳定计算中，发电机的转角主要与正序分量有关。为了将上述故障处理方法应用于暂态稳定计算，必须获得正序等效网络与发电机进行机-网接口。因此必须将式(4)和式(5)由相分量坐标转换到对称分量坐标，以便与发电机接口。

2 暂态稳定求解算法

2.1 网络方程的相序变换

设式(4)中由不对称故障引起的相坐标下导纳矩阵变化量为 $\Delta\boldsymbol{Y}^{(abc)}$，则故障条件下的网络方程为：

$$(\boldsymbol{Y}^{(abc)}+\Delta\boldsymbol{Y}^{(abc)})\boldsymbol{V}^{(abc)}=\boldsymbol{I}^{(abc)} \tag{6}$$

式中：$\Delta\boldsymbol{Y}^{(abc)}$ 根据式(5)通过计算得到，具体为：

$$\Delta\boldsymbol{Y}_{ij}^{(abc)}=-\boldsymbol{Y}_{ij}^{(abc)}+\boldsymbol{Y}_{ij}^{(abc)}\boldsymbol{T}_1 \qquad i\neq j \tag{7}$$

$$\Delta\boldsymbol{Y}_{jj}^{(abc)}=-\boldsymbol{Y}_{jj}^{(abc)}+\boldsymbol{Y}_{jj}^{(abc)}\boldsymbol{T}_1+\boldsymbol{T}_2 \tag{8}$$

将式(6)转换到对称分量坐标下，有

$$(\boldsymbol{Y}^{(012)}+\Delta\boldsymbol{Y}^{(012)})\boldsymbol{V}^{(012)}=\boldsymbol{I}^{(012)} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{V}^{(012)}=\boldsymbol{T}\boldsymbol{V}^{(abc)} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{I}^{(012)}=\boldsymbol{T}\boldsymbol{I}^{(abc)} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{Y}^{(012)}=\boldsymbol{T}\boldsymbol{Y}^{(abc)}\boldsymbol{T}^{-1} \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{T}=\dfrac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}$，$\alpha=e^{j120°}$。

式(7)与式(8)在对称分量坐标下可记为：

$$\Delta \boldsymbol{Y}_{ij}^{(012)} = -\boldsymbol{Y}_{ij}^{(012)} + \boldsymbol{Y}_{ij}^{(012)} \boldsymbol{T}_1^{(012)} \qquad i \neq j \tag{13}$$

$$\Delta \boldsymbol{Y}_{jj}^{(012)} = -\boldsymbol{Y}_{jj}^{(012)} + \boldsymbol{Y}_{jj}^{(012)} \boldsymbol{T}_1^{(012)} + \boldsymbol{T}_2^{(012)} \tag{14}$$

式中：$\boldsymbol{T}_1^{(012)} = \boldsymbol{T}\boldsymbol{T}_1\boldsymbol{T}^{-1}$；$\boldsymbol{T}_2^{(012)} = \boldsymbol{T}\boldsymbol{T}_2\boldsymbol{T}^{-1}$。

显然，故障节点所对应列的导纳矩阵子阵($\boldsymbol{Y}^{(012)} + \Delta\boldsymbol{Y}^{(012)}$)是 3×3 的子阵，这些子阵是非对称的，而且不能通过相序变换实现解耦。对导纳矩阵进行重新编号，将故障节点排在最后。通过矩阵的行列变换后式(9)可以写成：

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{Y}_{\mathrm{SS}} & \boldsymbol{Y}_{\mathrm{SU}} \\ \boldsymbol{Y}_{\mathrm{US}} & \boldsymbol{Y}_{\mathrm{UU}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{V}_{\mathrm{S}} \\ \boldsymbol{V}_{\mathrm{U}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{\mathrm{S}} \\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{U}} \end{bmatrix} \tag{15}$$

式中：$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{SS}}$，$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{US}}$对应于导纳矩阵中对称的部分，其元素与对称分量法下形式相同，即

$$\boldsymbol{Y}_{ij} = \begin{bmatrix} y_{ij}^{(0)} & & \\ & y_{ij}^{(1)} & \\ & & y_{ij}^{(2)} \end{bmatrix} \tag{16}$$

而$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{SU}}$和$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{UU}}$对应于导纳矩阵中不对称的部分，即导纳矩阵中受不对称故障影响的部分，其元素不能与对称部分一样解耦，即

$$\boldsymbol{Y}_{ij} = \begin{bmatrix} y_{ij}^{(00)} & y_{ij}^{(01)} & y_{ij}^{(02)} \\ y_{ij}^{(10)} & y_{ij}^{(11)} & y_{ij}^{(12)} \\ y_{ij}^{(20)} & y_{ij}^{(21)} & y_{ij}^{(22)} \end{bmatrix} \tag{17}$$

式(17)中各元素都是由相坐标转换到对称分量坐标下的元素。对应于网络中的故障节点和不对称元件，显然，它们在对称分量坐标下正、负、零序之间不能解耦。

2.2　等效正序导纳矩阵的形成

如前所述，暂态稳定计算需要通过正序导纳矩阵与发电机和动态负荷相接口，因此需要将式(15)中的负序、零序分量及相关变量消去，将负序分量和零序分量对正序分量的影响归算到等效正序导纳矩阵中，从而得到暂态稳定计算用正序导纳矩阵。

注意到式(9)中节点导纳矩阵具有式(15)～式(17)描述的形式，可以对其进行矩阵行变换和列变换，将相应的各序分量集中在各自的子阵中。变换后的矩阵具有如下形式：

$$\boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Y}_{00} & \boldsymbol{Y}_{02} & \boldsymbol{Y}_{01} \\ \boldsymbol{Y}_{20} & \boldsymbol{Y}_{22} & \boldsymbol{Y}_{21} \\ \boldsymbol{Y}_{10} & \boldsymbol{Y}_{12} & \boldsymbol{Y}_{11} \end{bmatrix} \tag{18}$$

该矩阵中$\boldsymbol{Y}_{ii}$为相应的零序、正序、负序导纳矩阵。$\boldsymbol{Y}_{ij}$为由不对称故障和不对称元件产生的导纳矩阵，仅在各子阵的右下角存在不对称影响元素。

由式(18)可知，如果将$\boldsymbol{Y}_{10}$和$\boldsymbol{Y}_{12}$消去，则零序和负序与正序解耦，零序和负序的作用通过消去过程叠加到正序中。因此，对式(18)进行高斯消去处理，将各子阵的不对称影响元素消去，变换为如下形式：

$$\boldsymbol{Y}' = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Y}_{00}' & \boldsymbol{Y}_{02}' & \boldsymbol{Y}_{01}' \\ 0 & \boldsymbol{Y}_{22}' & \boldsymbol{Y}_{21}' \\ 0 & 0 & \boldsymbol{Y}_{11}' \end{bmatrix} \tag{19}$$

式中：$\boldsymbol{Y}_{11}'$为收缩后的等效正序导纳矩阵；$\boldsymbol{Y}_{00}'$和$\boldsymbol{Y}_{22}'$的下三角均为 0，对角元素为 1。

该等效正序导纳矩阵就是考虑了不对称分量影响的正序导纳矩阵。根据上述推导过程，通过矩阵变换，将负序、零序等不对称分量的影响等效到正序导纳矩阵中。

$\boldsymbol{Y}_{11}'$就是直接用于暂态稳定计算的正序导纳矩阵。本文采用 Taylor 级数法进行暂态稳定计算，在网络方程解算过程中采用发电机定子诺顿电流计算发电机定子端电压，然后求解发电机定子电流[13]。

在通常的暂态稳定计算中，都是通过正序、负序和零序的边界条件形成复合序网，然后根据复合序网来进行解算。本文方法首先根据 ABC 三相的边界条件处理故障，并形成对称分量坐标下的导纳矩阵。然后把导纳矩阵通过高斯消去收缩至发电机节点和故障节点，并通过矩矩阵变换把导纳矩阵转变成式(18)所示的形式。最后通过高斯消去法形成暂态稳定计算用等效正序导纳矩阵。

本文方法通过矩阵变换把因故障或不对称元件所产生的非正序分量对网络的影响等效到正序导纳矩阵中，避开了复合序网这一复杂的故障处理环节，物理意义清晰明白，而且由于在解算过程中使用了对称分量参数，最大限度地减少了计算量。

当采用阻抗模拟故障时，本文暂态稳定求解方法仍然有效，只是此时不对称故障引起的相坐标下导纳矩阵变化量的形成过程有所不同。由于不对称故障是通过在故障点接入阻抗来模拟，因此当发生不对称故障时也可以看做是在故障点接入了一个不对称元件，并由此导致了网络参数的不对称。通过这种方法模拟故障，不对称故障可以被看做是参数不对称的一种特例。

本文方法采用矩阵变化求取正序等效导纳矩阵，将相分量法与对称分量法相结合并应用于暂态稳定计算中，既适用于网络运行不对称，也适用于网络参数的不对称。

当前电力网络解算中，网络元件的参数绝大多数都是以序分量的形式给出的，本文的暂态稳定计算方法也是在对称分量坐标下进行的。虽然故障的分析和不对称元件的描述都是在相分量坐标下进行的，但其最终还是要转换到对称分量坐标下进行计算。

暂态稳定计算的步骤如下：

1)读入初始数据。

2)初始潮流计算及暂态稳定计算准备;如果存在不对称支路,则需要进行三相潮流计算。

3)利用对称分量参数形成故障前的节点导纳矩阵。

4)采用故障残压变换法在相分量下进行故障分析,并转换为对称分量系统下导纳矩阵变化量 $\Delta\boldsymbol{Y}$。

5)将 $\Delta\boldsymbol{Y}$ 叠加到故障前的导纳矩阵中,形成故障后导纳矩阵。其参数均为转换到对称分量系统的参数和变量。

6)对节点导纳矩阵进行行变换和列变换,将各序参数集中在一起。

7)对变换后的节点导纳矩阵进行高斯消去处理,将其收缩成等效正序导纳矩阵。该等效正序导纳矩阵就是考虑了不对称部分影响的正序导纳矩阵。

8)结合快速高阶 Taylor 级数法进行暂态稳定计算。

3　算例分析

本文采用 IEEE New England 10 机 39 节点系统作为标准算例,系统接线图如图 1 所示。

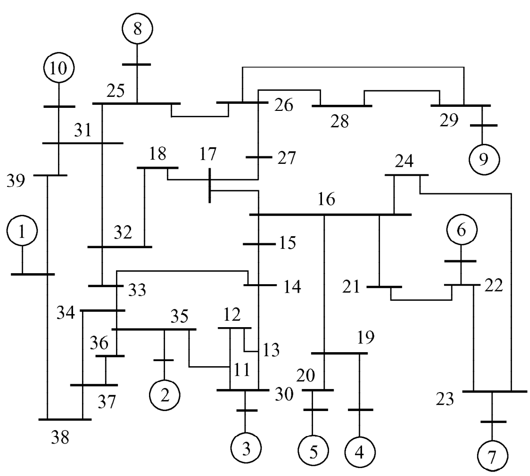

图 1　测试系统(节点重新编号)
Fig. 1　Test system (buses reordered)

计算选取线路 15-16 首端零时刻发生故障,0.2 s后切除故障线路,故障类型分别选取为单相接地故障和两相短路故障。表 2、表 3 分别给出了 2 种故障下本文方法和传统复合序网方法的计算结果。

表 2 给出了单相接地故障发生后 1.5 s 和 2.0 s 时的发电机功角,从表中数据可以看出,本文方法与传统复合序网方法计算所得的数据完全相同,这是因为两者都是通过公式严格推导所得。表 3 给出了两相短路情况下的计算结果,结果仍然令人满意。

表 2　单相接地故障发电机功角计算结果
Table 2　Comparison of the generator angles under single phase ground fault

(°)

发电机节点号	t=1.5 s		t=2.0 s	
	复合序网	本文方法	复合序网	本文方法
1	−0.019 52	−0.019 52	3.812 17	3.812 17
2	19.839 51	19.839 51	8.956 31	8.956 31
3	25.195 56	25.195 56	16.021 37	16.021 37
4	0.151 71	0.151 71	−1.887 92	−1.887 92
5	−2.779 08	−2.779 08	−11.237 38	−11.237 38
6	−6.562 26	−6.562 26	−16.655 68	−16.655 68

表 3　两相短路故障发电机功角计算结果
Table 3　Comparison of the generator angles under phase to phase fault

(°)

发电机节点号	t=1.5 s		t=2.0 s	
	复合序网	本文方法	复合序网	本文方法
1	−238.96178	−238.961 78	−409.689 55	−409.689 55
2	507.307 38	507.307 38	1 033.775 62	1 033.775 62
3	515.004 79	515.004 79	1 040.133 02	1 040.133 02
4	399.545 87	399.545 87	639.428 51	639.428 51
5	387.498 28	387.498 28	666.743 84	666.743 84
6	401.462 88	401.462 88	635.832 02	635.832 02

4　结语

本文提出一种统一考虑参数不对称和运行不对称的暂态稳定计算方法,该方法采用短路故障残压变换法处理短路故障,能够将相分量法的模型适应性和对称分量法的解算快速性结合在一起,充分发挥两者的优势。通过故障分量的相序变换和导纳矩阵的消去操作形成暂态稳定计算正序导纳矩阵,避免了复杂的复合序网形成过程,物理意义简单明了,同时可以方便地处理多重故障和网络原件参数不对称的情况。计算结果表明本文方法简洁有效。

参 考 文 献

[1] 王锡凡,万方良,杜正春.现代电力系统分析.北京:科学出版社,2003.

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

[3] LAUGHTON M A. Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase coordinates: Part Ⅰ system representation in phase frame of reference. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1968, 115(8): 1163-1172.

[4] LAUGHTON M A. Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase coordinates: Part Ⅱ fault analysis. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution,

1969, 116(5): 857-865.

[5] 王安宁,陈青,周占平.改进的相分量法求解电力系统复杂故障新方法.电力系统自动化,2008,32(18):39-43.
WANG Anning, CHEN Qing, ZHOU Zhanping. An improved phase components method for arbitary complicated power system fault analysis. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(18): 39-43.

[6] 傅旭,王锡凡.同杆双回线断线相故障计算的解耦相分量法.电力系统自动化,2004,28(6):41-44.
FU Xu, WANG Xifan. A decouple phase domain method to calculate open conductor faults in the double circuit line on the same pole. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(6): 41-44.

[7] BERMAN A, XU Wilsun. Analysis of faulted power systems by phase coordinates. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(2): 587-595.

[8] 张伯明,陈寿孙,严正.高等电力网络分析.北京:清华大学出版社,2007.

[9] 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.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. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 50-53.

[10] 姜彤,白雪峰,郭志忠,等.利用矩阵变换求解电力系统短路故障的残压变换法.中国电机工程学报,2005,25(23):61-65.
JIANG Tong, BAI Xuefeng, GUO Zhizhong, et al. A residual voltage transformation method for short-circuit current calculation with matrix transformation. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 61-65.

[11] 倪以信,陈寿孙,张宝霖.动态电力系统的理论和分析.北京:清华大学出版社,2002.

[12] 白雪峰,余志文,郭志忠.不对称暂态稳定计算新方法.电力系统自动化,2002,26(22):27-30.
BAI Xuefeng, YU Zhiwen, GUO Zhizhong. A new method of transient stability computation with asymmetrical parameters. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 27-30.

[13] 白雪峰,郭志忠.Taylor 级数法暂态稳定计算中阶数的动态控制.电力系统自动化,1999,23(22):5-7.
BAI Xuefeng, GUO Zhizhong. The dynamic control of order selection in fast transient stability simulation by higher order Taylor series expansions. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(22): 5-7.

白雪峰(1974—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:电力系统稳定分析与控制、电力网络分析、基于时间过程的电力系统优化与电能量管理。E-mail:xfbai@hit.edu.cn

徐 英(1980—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统暂态稳定分析、电力系统电能量计算机管理。

姜 彤(1970—),男,博士,教授,主要研究方向:电力系统故障分析、电力网络分析、电力系统计算机应用。

Transient Stability Calculation Based on Residual Voltage Transformation Method for Short-circuit Faults

BAI Xuefeng[1], *XU Ying*[1], *JIANG Tong*[2]

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Based on residual voltage transformation method for short-circuit calculation, a unified approach has been proposed for transient stability calculations under unbalanced operating conditions of power system. The proposed method combines the advantages of both adaptive modeling in a, b, c phase components and 0, 1, 2 sequence coordinates with high calculation efficiency. The equivalent positive sequence admittance matrix is derived with matrix translation in place of the traditional sequence network connection, which is the interface with generators in stability simulation. The new method is suitable for both a, b, c coordinates and 0, 1, 2 symmetric components coordinates. It can deal with multiple faults and element with unbalance parameter as well. The simulation results show the new method is simple and effective.

This work is Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50307003) and Natural Scientific Research Innovation Foundation in Harbin Institute of Technology (No. HIT.NSRIF.2008.54).

Key words: transient stability; fault residual voltage transformation; symmetrical components; phase components