利用口网络理论计算电力系统复杂故障的计算机算法

王 乡 陈永琳 东北电力学院电力系（132012）

摘要 本文在以多口网络理论计算电力系统复杂故障的基础上，提出了对各种类型复杂故障口网参数的统一计算方法，以及用复杂故障来模拟计算平行线路跨线故障时的等效网络模型，编制了《电力系统复杂故障计算实用程序》。

关键词 多口网络 故障计算

1 引言

目前，随着电力系统中单相自动重合闸及串联电容等设备的投入，事故后短时两相运行方式的采用，使得电力系统在故障过程中可能同时出现二重，三重甚至四重不对称的复杂故障情况。因此，为了分析故障后电力系统的运行状态，整定和校验继电保护装置，就不能不计及在各种故障组合下，整个电力系统的电压和电流的分布情况及其动态过程。

分析电力系统复杂故障有许多计算方法，主要有多重故障的通用解法，网络分割法，复杂故障的综合阻抗矩阵，分块迭加导纳矩阵法等，这些算法都是在多口网络理论的基础上，通过数学变换，以寻求不同类型复杂故障的统一处理原则，本文恰恰从这一点出发，应用正定矩阵求逆的方法，对不同故障类型的口网参数进行统一处理，可一次计算出所需的网络参数，避免了一般处理方法所造成的大量矩阵运算，使程序的编制得到了简化；同时，提出了平行线路跨线故障的网络模型，根据跨线故障类型，利用不同组合的多重故障进行模拟计算。采用上述算法，为东北电管局调度通讯局编制了《电力系统复杂故障计算实用程序》，并作为《高压电网继电保护整定计算软件包》的程序模块之一，通过了能源部的鉴定，满足继电保护工程方面实际分析工作的需要。

2 利用多口网络理论求解 N 重故障的方法

2.1 基本算法

在电力系统中，不对称故障根据边界条件可归纳为串联型和并联型故障两大类。因此，对于 N 重不对称故障来讲，可以有三种不同的组合，即串—串型故障，并—并型故障，串—并型故障。

所谓多口网络理论计算电力系统复杂故障就是根据不同类型的故障，借助于各种口网参数和故障边界条件求解故障电流、电压及待求的各种变量。对于串—串型故障、并—并型故障及串—并型故障，需分别用口网络的阻抗参数、导纳型参数、混合型参数进行计算。

下面以串—并型故障为例，说明 N 重复杂故障的计算。

如果 N 重故障中，既有串型故障，又有并型故障，将各序网的全部故障口划分为两组：

$$\begin{bmatrix}\dot U_{C(1)}\\ \dot U_{B(1)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z_{CC(1)} & Z_{CB(1)}\\ Z_{BC(1)} & Z_{BB(1)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot I_{C(1)}\\ \dot I_{B(1)}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dot U_{PC}^{(0)}\\ \dot U_{PB}^{(0)}\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\dot U_{C(2)}\\ \dot U_{B(2)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z_{CC(2)} & Z_{CB(2)}\\ Z_{BC(2)} & Z_{BB(2)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot I_{C(2)}\\ \dot I_{B(2)}\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\dot U_{C(0)}\\ \dot U_{B(0)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z_{CC(0)} & Z_{CB(0)}\\ Z_{BC(0)} & Z_{BB(0)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot I_{C(0)}\\ \dot I_{B(0)}\end{bmatrix}$$

其中：下标C表示串型故障，B表示并型故障，$\dot{U}_{C(1)}$，$\dot{I}_{C(1)}$，$\dot{U}_{PC}^{(0)}$均为i元列向量，即N重故障中有i处为串型故障；$\dot{U}_{B(1)}$，$\dot{I}_{B(1)}$，$\dot{U}_{PB}^{(0)}$为j元列向量，即N重故障中有j处为并联型故障，显然，i+j=N。

将上面三式变换为混合型参数方程，如下：

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_{C(1)}\\ \dot{I}_{B(1)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}H_{CC(1)} & H_{CB(1)}\\ H_{BC(1)} & H_{BB(1)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot{I}_{C(1)}\\ \dot{U}_{B(1)}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dot{U}_{HC}\\ \dot{I}_{HB}\end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_{C(2)}\\ \dot{I}_{B(2)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}H_{CC(2)} & H_{CB(2)}\\ H_{BC(2)} & H_{BB(2)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot{I}_{C(2)}\\ \dot{U}_{B(2)}\end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_{C(0)}\\ \dot{I}_{C(0)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}H_{CC(0)} & H_{CB(0)}\\ H_{BC(0)} & H_{BB(0)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot{I}_{C(0)}\\ \dot{U}_{B(0)}\end{bmatrix} \quad (3)$$

式中：

$$H_{CC(S)}=Z_{CC(S)}-Z_{CB(S)}\cdot Z_{BB(S)}^{-1}\cdot Z_{BC(S)}$$

$$H_{CB(S)}=Z_{CB(S)}\cdot Z_{BB(S)}^{-1}$$

$$H_{BC(S)}=-Z_{BB(S)}^{-1}\cdot Z_{BC(S)}$$

$$H_{BB(S)}=Z_{BB(S)}^{-1}$$

S=0，1，2分别代表零序、正序、负序。

$$\dot{U}_{HC}=U_{PC}^{(0)}-Z_{CB(1)}\cdot Z_{BB(1)}^{-1}\cdot U_{PB}^{(0)}$$

$$\dot{I}_{HB}=-Z_{BB(1)}^{-1}\cdot U_{PB}^{(0)}$$

串一并型N重故障口序分量边界条件方程的矩阵形式为：

$$\begin{bmatrix}n_{C(1)} & \\ & n_{B(1)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot{I}_{C(1)}\\ \dot{U}_{B(1)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}n_{C(2)} & \\ & n_{B(2)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot{I}_{C(2)}\\ \dot{U}_{B(2)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{I}_{C(0)}\\ \dot{U}_{B(0)}\end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix}n_{C(1)} & \\ & n_{B(1)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot{U}_{C(1)}\\ \dot{I}_{B(1)}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}n_{C(2)} & \\ & n_{B(2)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot{U}_{C(2)}\\ \dot{I}_{B(2)}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dot{U}_{C(0)}\\ \dot{I}_{C(0)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ 0\end{bmatrix} \quad (5)$$

将式1、2分别用正序算子对角阵，负序算子对角阵左乘其两端，并与3式相加，根据5式，整理可得：

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_{(0)}\\ \dot{U}_{B(0)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-H'_{CC} & -H'_{CB}\\ -H'_{BC} & -H'_{BB}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}n_{C(1)}\dot{U}_{HC}\\ n_{B(1)}\dot{I}_{HB}\end{bmatrix}$$

其中：

$$H'_{CC}=H'_{CC(1)}+H_{CC(2)}+H_{CC(0)}$$

$$H'_{CB}=n_{C(1)}\cdot H_{CB(1)}\cdot n_{B(1)}^{-1}+n_{C(2)}\cdot H_{CB(2)}\cdot n_{B(2)}^{-1}+H_{CB(0)}$$

$$H'_{BC}=n_{B(1)}\cdot H_{B(1)}\cdot n_{C(1)}^{-1}+n_{B(2)}\cdot H_{BC(2)}n_{C(2)}^{-1}+H_{BC(0)}$$

$$H_{BB}=H_{BB(1)}+H_{BB(2)}+H_{BB(0)}$$

这样就求出了串型故障的口电流和并型故障的口电压，将其代入到1、2、3式中，可得串型故障的口电压和并型故障的口电流。然后，将各序网的口电流代入到各序网的节点阻抗方程中，即可求得各序网母线电压，进一步求出各序支路电流及其它待求量。

2.2 各种口网参数的统一算法

利用多口网络理论计算复杂故障，减少了求解复杂故障方程的未知量，但对不同类型的故障需用不同的口网参数计算，缺乏统一的处理原则。本文提出了采用正定矩阵求逆，计算口网参数的方法，可一次形成复杂故障所需的口网参数，简化了计算。

下面简要地介绍一下正定矩阵求逆的过程对于方程 $F=AX\xrightarrow{\text{变换}}X=B\cdot F$

则 $A^{-1}=B$ 其中A为正定对称矩阵

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \cdots\cdots a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} \cdots\cdots a_{2n} \\ \vdots & \vdots \quad \vdots \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} \cdots\cdots a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

（1）将 f_1 与 x_1 换位，得方程 6 式

（2）将 x_1 与 f_1 串位，得方程 7 式

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \cdots \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c:c} 1/a_{11} & -a_{12}/a_{11} \cdots a_{1n}/a_n \\ \cdots\cdots & \cdots\cdots\cdots\cdots \\ a_{21}/a_{11} & a_{22}^{(1)} \cdots\cdots a_{2n}^{(1)} \\ \vdots & \vdots \quad \vdots \\ a_{n1}/a_{11} & a_{n2}^{(1)} \cdots\cdots a_{nn}^{(1)} \end{array}\right] \begin{bmatrix} f_1 \\ \cdots \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \tag{6}$$

其中：

$$\begin{bmatrix} a_{22}^{(1)} \cdots a_{2n}^{(1)} \\ \vdots \\ a_{n2}^{(1)} \cdots a_{nn}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{22} \cdots a_{2n} \\ \vdots \quad \vdots \\ a_{n2} \cdots a_{nn} \end{bmatrix} - \frac{1}{a_{11}} \cdot \begin{bmatrix} a_{21} \\ \vdots \\ a_{n1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{12} \cdots a_{1n} \end{bmatrix}$$

$$a_{ij}^{(0)} = a_{ij} - a_{i1} \cdot a_{1j}/a_{11} \quad (i，j = 2\cdots\cdots n)$$

$$\begin{bmatrix} f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ \cdots \\ x_1 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c:c} a_{22}^{(1)} \cdots a_{2n}^{(1)} & a_{21}^{(1)} \\ \vdots \quad \vdots \quad \vdots & \vdots \\ a_{2n}^{(1)} \cdots a_{nn}^{(1)} & a_{n1}^{(1)} \\ \cdots\cdots\cdots & \cdots\cdots \\ a_{12}^{(1)} \cdots a_{1n}^{(1)} & a_{11}^{(1)} \end{array}\right] \cdot \begin{bmatrix} x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ \cdots \\ f_1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

其中：$a_{ij}^{(1)} = -a_{ij}/a_{11} \quad (j=2\cdots\cdots n)$

$a_{i1}^{(1)} = a_{i1}/a_{11} \quad (i=2\cdots n)$

这样对方程 F＝AX 进行几次上述变换所得的系数矩阵即为矩阵 A 的逆矩阵。

将上述变换过程应用到求解多口网络参数上，即为：在求得故障口阻抗型参数的基础上，对阻抗型参数进行上述变换，就得到了所需故障口网络参数。

a. 对于 N 重串型故障，变换次数为零．系数矩阵为网络的阻抗型（Z）参数。

b. 对于 N 重并型故障，变换次数为 N．系数矩阵为网络的导纳型（Y）参数。

c. 对于 N 重串—并型故障，若 M 重是并型故障，变换次数为 M，系数矩阵为网络的混合型（H）参数。

应用正定矩阵求逆过程处理口网络参数，避免了求解混合型参数所需的大量矩阵运算，对网络参数的处理有了统一原则，简化了程序的编制。

3 同杆互感线跨线故障的网络模型

对于同杆互感线的跨线故障，本文提出了图 1 所示的网络模型。模型中增设了四条支路，五个节点，参数见表 1

在此网络模型的基础上，通过新增节点和线路不同类型的多重故障，来模拟同杆互感线的跨线故障。

举例说明如下：

a. 线路 a_1 的 AB 两相与线路 a_2 的 C 相发生短路，短路点距 i 点的距离百分数为 Δl，根据图 1 所示的网络模型，可用 L_1 线路起点 C 相断线，L_4 线路末端 AB 两相断线，N_3 节点三相

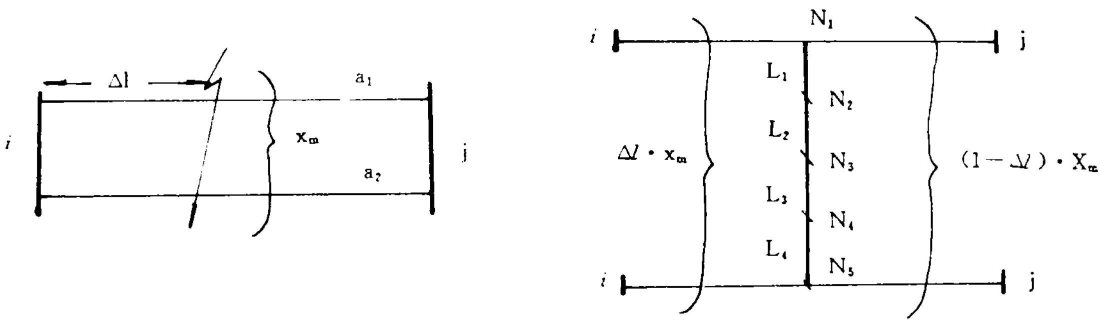

图 1

短路，这样的三重复杂故障来模拟进行计算。

b. 线路 a_1 的 A 相与线路 a_2 的 B 相发生跨线故障，距 i 的距离百分数为 Δl，根据图 1 所示的网络模型，可用 L_1 线路起点 BC 两相断线，L_4 线路末端 AC 两相断线，N_3 节点三相短路，这样的三重复杂故障来模拟进行计算。

表 1

支路号	起点号	终点号	线路阻抗
L_1	N_1	N_2	0−j
L_2	N_2	N_3	0+j
L_3	N_3	N_4	0+j
L_4	N_4	N_5	0−j

4 结论

4.1 本文利用多口网络理论计算电力系统复杂故障，采用正定矩阵求逆过程处理口网络参数，避免了大量的矩阵运算，简化了编程。

4.2 提出了平行线路跨线故障的网络模型，在此模型基础上，利用不同类型的多重故障对平行线路跨线故障进行模拟计算。

4.3 采用上述算法为东北电管局调度局编制了《电力系统复杂故障计算实用程序》，并用 BPA 程序对本程进行了全面校核，计算结果基本一致，并作为《高压电网继电保护整定计算软件包》中的一程序模块，通过了能源部的鉴定，已在东北电网继电保护实际工程分析计算中应用。

参考文献

1 P. M. Anderson. Analysis of Faulted Power System. The Iowa state university Press/Amos, 1973

2 刘万顺. 电力系统故障分析. 水利电力出版社，1986

3 西安交通大学等. 电力系统计算. 1978，10

4 G. W. Stagg A. H. Elabiad. Computer Methods in Power System Analysis Mcgraw－Hill Book Co 1968