

984593



高等学校教材

电网继电保护的计算机辅助分析

重 庆 大 学 米麟书
山东工业大学 江世芳 合编

77
05



高 等 学 校 教 材

电网继电保护的计算机辅助分析

重 庆 大 学 米麟书
山 东 工 业 大 学 江世芳 合编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书介绍电网继电保护的计算机辅助分析。重点阐述简单短路、非对称断相故障及复杂故障电流电压周期分量起始值的计算方法；电磁暂态过程电流电压计算的基本方法；距离继电器动作特性、测量阻抗及其工况的计算机辅助分析；高频保护特性及其工况的计算机辅助分析。

本书宜作为高等学校电力系统及其自动化、电力系统继电保护及自动化等电力类专业的选修课教材，亦可供从事继电保护工作的专业人员参考。

高等学校教材

电网继电保护的计算机辅助分析

重 庆 大 学 米麟书 合编
山东工业大学 江世芳

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市地矿局印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 16 印张 223 千字

1995 年 11 月第一版 1995 年 11 月北京第一次印刷

印数 0001—1360 册

ISBN 7-120-02378-0/ TM·637

定价 7.90 元

前 言

本书是根据原能源部制订的电力工程类专业教材出版规划及 1990 年 10 月电力工程类专业教学委员会继电保护教学小组会议上通过的编写大纲而编写的高等学校电力系统及其自动化专业的选修课教材。

全书共四章。第一章重点阐述电力系统短路与非对称断相故障电流电压周期分量起始值的计算方法；第二章重点阐述高压电网电磁暂态过程电流电压计算的基本方法；第三、四章阐述距离保护和高频保护计算机辅助分析的数学模型与基本方法。

本书第一、二章由重庆大学米麟书编写，第三、四章分别由山东工业大学江世芳、于九祥编写。全书由米麟书统稿。

本书承山东工业大学王广延教授主审，对他提出的宝贵意见以及编写本书时参阅引用过的国内外文献的作者，在此一并致谢。

编者水平有限，热忱欢迎读者提出批评和宝贵意见。

编 者

一九九五年一月

7-1011/c1

目 录

前 言

第一章 电力系统故障电流电压周期分量起始值的计算	1
第一节 定结构系统母线简单短路故障计算	1
第二节 定结构系统非对称断相状态的计算	13
第三节 输电线路任意点短路故障的计算	23
第四节 大型电力网络的局部节点等值方程	25
第五节 电力网络中任一线路的双电源等值电路模型	26
第六节 零序互感线路的无互感等值电路及电流电压的计算	31
第七节 变结构电力系统故障的计算	35
第八节 电力系统复杂故障的计算	44
第二章 高压电网电磁暂态过程计算的基本方法	58
第一节 概述	58
第二节 线性无耦合集中参数元件的离散等值电路	58
第三节 线性耦合集中参数元件的离散等值电路	61
第四节 单相线路波过程的计算方法及其离散等值电路	67
第五节 暂态计算的离散等值网络节点导纳矩阵方程	71
第六节 多导线线路波过程的相模变换算法	74
第七节 电磁暂态计算程序(EMTP)简介	85
第三章 距离保护的计算机辅助分析	87
第一节 概述	87
第二节 距离继电器动作特性的计算机辅助分析	88
第三节 距离继电器测量阻抗及动作行为的计算机辅助分析	97
第四节 多相补偿距离继电器的计算机辅助分析	114
第四章 方向高频保护的计算机辅助分析	125
第一节 方向高频保护的基本概念	125
第二节 非全相状态时负序功率方向继电器运行特性的分析	132
第三节 串联补偿电容器对负序功率方向继电器及方向高频保护的影响	148
参考文献	153

第一章 电力系统故障电流电压 周期分量起始值的计算

第一节 定结构系统母线简单短路故障计算

一、各独立序网络的节点方程及求解

系统中同时只有一处发生的故障，叫简单故障。从电力系统暂态分析课程的学习已经知道，应用对称分量法分析计算三相对称电力系统的不对称短路或非对称断相故障时，总是将故障端口处三相不对称的支路阻抗参数等值转换成三个互相独立的正、负、零序三相对称的电流源，从而将难于求解的三相不对称故障的计算，转换成了易于求解的三个互相独立而又对称的三相电路网络的计算。例如对系统 f 处的 (n) 型简单短路故障，可得图 1-1 所示的各独立序网络，其中 z_f 为故障过渡阻抗，通常为电弧电阻，上标 (n) 表示故障类型。

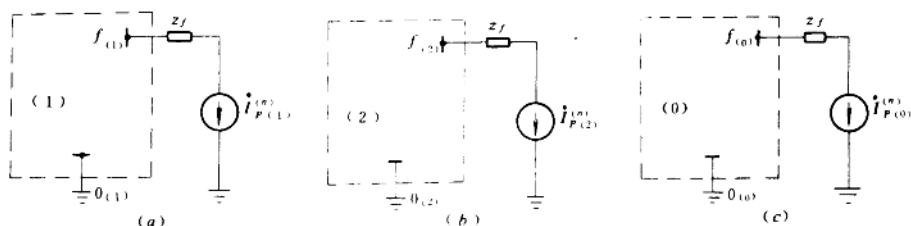


图 1-1 (n) 型简单短路故障的序网络图

(a) 正序; (b) 负序; (c) 零序

工程实用计算中，视各序网络为线性网络。如用下标 (s) 表示序别， $n_{(s)}$ 为各序网络的独立节点数； $I_{(1)}$ 为正序网络中各独立电势源的等值电流源，这是一个已知的稀疏列矩阵； $U_{(s)}^{(n)}$ 为各序网络的节点电压，这是一个待求的未知列向量； $I_{(s)}$ 为故障情况下各序网的节点电流源列矩阵，其中 $I_{f(s)}^{(n)}$ 是待求的故障端口电流。

根据电路理论，可得 (n) 型短路故障时各序网络的节点导纳方程为

$$\begin{bmatrix} Y_{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{(2)} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{(1)}^{(n)} \\ U_{(2)}^{(n)} \\ U_{(0)}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{(1)}^{(n)} - A_{f(1)} I_{f(1)}^{(n)} \\ -A_{f(2)} I_{f(2)}^{(n)} \\ -A_{f(0)} I_{f(0)}^{(n)} \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

上式可简记为

$$Y_{(s)} U_{(s)}^{(n)} = I_{(s)}^{(n)} \quad (s = 1, 2, 0) \quad (1-2)$$

式中

$$I_{(s)}^{(n)} = I_{(s)}^n - A_{f(s)} \dot{I}_{f(s)}^{(n)} = \begin{bmatrix} I_{(1)}^n \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A_{f(1)} \dot{I}_{f(1)}^{(n)} \\ A_{f(2)} \dot{I}_{f(2)}^{(n)} \\ A_{f(0)} \dot{I}_{f(0)}^{(n)} \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

$$Y_{(s)} = A_{(s)} y_{(s)} A_{(s)}^T \quad (1-4)$$

其中 $y_{(s)}$ 为各序网络的支路导纳矩阵。当已知各序网络的支路阻抗矩阵 $z_{(s)}$ 时

$$y_{(s)} = z_{(s)}^{-1} \quad (1-5)$$

$A_{(s)}$ 、 $A_{(s)}^T$ 为描述 (s) 序原网络拓扑结构的节点对支路 (不含故障支路) 的关联矩阵及其转置矩阵; $A_{f(s)}$ 为 (s) 序原网络节点对故障支路的关联矩阵。

$Y_{(s)}$ 为 (s) 序原网络 (不含故障支路) 的节点导纳矩阵, 通常由原网络的拓扑结构与支路阻抗参数计算得到。式 (1-4) 是计算 $Y_{(s)}$ 的通用公式, 适用于含互感及不含互感耦合支路的网络。

对具有互易特性的正、负序网络, 以及无互感耦合支路的零序网络, $Y_{(s)}$ 为对称矩阵, $Y_{(s)}$ 中的对角元 $Y_{ii(s)}$ 与上三角非对角元 $Y_{ij(s)}$ 分别为

$$Y_{ii(s)} = \sum_{k=0}^{n_{(s)}} \frac{1}{z_{ik(s)}} \quad i = 1, 2, \dots, n_{(s)}, i \neq k \quad (1-6)$$

$$Y_{ij(s)} = - \sum \frac{1}{z_{ij(s)}} \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n_{(s)} \\ j = i + 1, i + 2, \dots, n_{(s)}, i \neq j \end{matrix} \quad (1-7)$$

式 (1-6) 等号右端表示 (s) 序网中与 i 节点相联的各支路导纳之和, 其中 $z_{ik(s)}$ 为 k 节点联至 i 节点的支路阻抗; 式 (1-7) 等号右端表示 (s) 序网中节点 i 、 j 间直接相联的支路导纳之和的负值, 其中 $z_{ij(s)}$ 为节点 i 、 j 间直接相联的支路阻抗。

式 (1-6) 表明, 对角元 $Y_{ii(s)}$ 为 (s) 序网 i 节点的自导纳, 一般不为零; 非对角元 $Y_{ij(s)}$ 为 (s) 序网节点 i 、 j 间的互导纳, 当 i 、 j 间无支路直接相联时, $Y_{ij(s)}$ 为零。因此, 实际电力系统的 $Y_{(s)}$ 中有相当多的非对角元为零, 这种性质常称作 $Y_{(s)}$ 的稀疏性。

值得注意的是, 本书引入关联矩阵 $A_{(s)}$ 、 $A_{f(s)}$ 及其转置矩阵 $A_{(s)}^T$ 、 $A_{f(s)}^T$, 主要是为了便于数学描述, 实际编程计算或用计算器手算时, 勿需具体形成和用到它们, 因为根据物理意义可直观算出 $Y_{(s)}$ 。

工程实用计算中, 式 (1-2) 属于线性矩阵方程, 其解算方法较多。若将式 (1-2) 两端前乘 $Y_{(s)}^{-1}$, 可得 s 序网的节点阻抗方程为

$$U_{(s)}^{(n)} = Y_{(s)}^{-1} I_{(s)}^{(n)} \quad (1-8A)$$

$$= Z_{(s)} I_{(s)}^{(n)} \quad (1-8B)$$

$$= \mathbf{Z}_{(s)} (\mathbf{I}_{(s)}^0 - \mathbf{A}_{f(s)} \dot{\mathbf{I}}_{f(s)}^{(n)}) \quad (1-8C)$$

式中

$$\mathbf{Z}_{(s)} = \mathbf{Y}_{(s)}^{-1} \quad (1-9)$$

$\mathbf{Z}_{(s)}$ 称为(s)序网的节点阻抗矩阵。式(1-9)是由 $\mathbf{Y}_{(s)}$ 求逆计算 $\mathbf{Z}_{(s)}$ 的方法。由于网络中各节点间有着电的或磁的联系,所以 $\mathbf{Z}_{(s)}$ 中的非对角元一般均不为零,常称为满阵。关于 $\mathbf{Z}_{(s)}$ 的其他计算方法,请参阅参考文献7。

对于大型电力系统,为了利用 $\mathbf{Y}_{(s)}$ 的稀疏性,以减少对计算机存储量的需要和减少计算量,采用 $\mathbf{Y}_{(s)}$ 三角分解法为基础的一些解算式(1-2)的方法,获得了广泛应用。根据线性代数可知, $\mathbf{Y}_{(s)}$ 可分解为上三角(右三角)因子 $\mathbf{R}_{(s)}$ 与下三角(左三角)因子 $\mathbf{L}_{(s)}$ 的乘积,即

$$\mathbf{Y}_{(s)} = \mathbf{L}_{(s)} \mathbf{R}_{(s)} \quad (1-10)$$

上式代入式(1-9),得

$$\mathbf{Z}_{(s)} = [\mathbf{L}_{(s)} \mathbf{R}_{(s)}]^{-1} = \mathbf{R}_{(s)}^{-1} \mathbf{L}_{(s)}^{-1} \quad (1-11)$$

式中 $\mathbf{L}_{(s)}$ 、 $\mathbf{R}_{(s)}$ 仍保持一定的稀疏性。

式(1-11)代入式(1-8B),可得

$$\mathbf{U}_{(s)}^{(n)} = \mathbf{R}_{(s)}^{-1} [\mathbf{L}_{(s)}^{-1} \mathbf{I}_{(s)}^{(n)}] \quad (1-12)$$

这样,就将解算式(1-2)的问题等效地转换成了易于求解下三角矩阵方程与上三角矩阵方程的问题。前者常称前代消去运算,如式(1-2)等号右端括弧部分所示;后者常称回代求解运算,如式(1-2)等号右端所示。这两种运算不但可利用稀疏技术来求解,而且还可根据故障计算的需要,只计算 $\mathbf{Z}_{(s)}$ 中的一列或几列元素。

根据式(1-8B)、式(1-8C),可得任意节点 h 的各序电压为

$$\dot{\mathbf{U}}_{h(1)}^{(n)} = \sum_{k=1}^{n_{(1)}} \mathbf{Z}_{hk(1)} \dot{\mathbf{I}}_{k(1)}^{(n)} \quad (1-13A)$$

$$= \sum_{k=1}^{n_{(1)}} \mathbf{Z}_{hk(1)} \dot{\mathbf{I}}_{k(1)}^0 - \mathbf{Z}_{hf(1)} \dot{\mathbf{I}}_{f(1)}^{(n)} \quad (1-13B)$$

$$= \dot{\mathbf{U}}_{h(1)}^0 + \dot{\mathbf{U}}_{h(1)}^{f(n)} \quad (1-13C)$$

$$\dot{\mathbf{U}}_{h(2)}^{(n)} = - \mathbf{Z}_{hf(2)} \dot{\mathbf{I}}_{f(2)}^{(n)} \quad (1-14)$$

$$\dot{\mathbf{U}}_{h(0)}^{(n)} = - \mathbf{Z}_{hf(0)} \dot{\mathbf{I}}_{f(0)}^{(n)} \quad (1-15)$$

$$\text{式中} \quad \dot{\mathbf{U}}_{h(1)}^0 = \sum_{k=1}^{n_{(1)}} \mathbf{Z}_{hk(1)} \dot{\mathbf{I}}_{k(1)}^0 \quad (1-16)$$

$$\dot{\mathbf{U}}_{h(1)}^{f(n)} = - \mathbf{Z}_{hf(1)} \dot{\mathbf{I}}_{f(1)}^{(n)} \quad (1-17)$$

$\dot{\mathbf{U}}_{h(1)}^0$ 是故障发生前由正序网各独立电流源 $\dot{\mathbf{I}}_{k(1)}^0$ 所引起的 h 点的开路电压,常称电压的

正常分量。 $\dot{U}_{k(1)}^{(n)}$ 是由 (n) 型短路故障口电流 $\dot{I}_{f(1)}^{(n)}$ 引起的电压, 常称故障分量。无源负序网络与无源零序网络, 只有故障分量, 如式 (1-14)、式 (1-15) 所示。

根据欧姆定律, 可得 (n) 型短路故障时, 任意支路 $r-j$ 的各序电流为

$$\dot{I}_{rj(1)}^{(n)} = \frac{\dot{U}_{r(1)}^{(n)} - \dot{U}_{j(1)}^{(n)}}{z_{rj(1)}} \quad (1-18A)$$

$$= \frac{\dot{U}_{r(1)}^0 - \dot{U}_{j(1)}^0}{z_{rj(1)}} + \frac{\dot{U}_{r(1)}^{f(n)} - \dot{U}_{j(1)}^{f(n)}}{z_{rj(1)}} \quad (1-18B)$$

$$= \frac{\sum_{k=1}^{n(1)} (Z_{rk(1)} - Z_{jk(1)}) \dot{I}_{k(1)}^0}{z_{rj(1)}} + \frac{(Z_{jf(1)} - Z_{rf(1)}) \dot{I}_{f(1)}^{(n)}}{z_{rj(1)}} \quad (1-18C)$$

$$= \dot{I}_{rj(1)}^0 + \dot{I}_{rj(1)}^{f(n)} \quad (1-18D)$$

$$\dot{I}_{rj(2)}^{(n)} = \frac{(Z_{jf(2)} - Z_{rf(2)}) \dot{I}_{f(2)}^{(n)}}{z_{rj(2)}} \quad (1-19)$$

$$\dot{I}_{rj(0)}^{(n)} = \frac{(Z_{jf(0)} - Z_{rf(0)}) \dot{I}_{f(0)}^{(n)}}{z_{rj(0)}} \quad (1-20)$$

式中 $\dot{I}_{rj(1)}^0 = \frac{\dot{U}_{r(1)}^0 - \dot{U}_{j(1)}^0}{z_{rj(1)}} \quad (1-21A)$

$$= \frac{\sum_{k=1}^{n(1)} (Z_{rk(1)} - Z_{jk(1)}) \dot{I}_{k(1)}^0}{z_{rj(1)}} \quad (1-21B)$$

$$\dot{I}_{rj(1)}^{f(n)} = \frac{\dot{U}_{r(1)}^{f(n)} - \dot{U}_{j(1)}^{f(n)}}{z_{rj(1)}} \quad (1-22A)$$

$$= \frac{(Z_{jf(1)} - Z_{rf(1)}) \dot{I}_{f(1)}^{(n)}}{z_{rj(1)}} \quad (1-22B)$$

式 (1-18) ~ 式 (1-22) 的电流算式中, $z_{rj(1)}$ 、 $z_{rj(2)}$ 、 $z_{rj(0)}$ 分别代表 $r-j$ 支路的正、负、零序阻抗值。

$\dot{I}_{rj(1)}^0$ 是故障发生前, 由正序网各独立电源引起的支路电流, 常称正常分量。 $\dot{I}_{rj(1)}^{f(n)}$ 是由 (n) 型短路口电流 $\dot{I}_{f(1)}^{(n)}$ 引起的, 常称故障分量。无源负序网与零序网中, 只有故障分量, 可分别按式 (1-19)、式 (1-20) 算出。

根据叠加原理, 可得 (n) 型故障时, 任意节点 h 的 a 、 b 、 c 三相电压与任意支路 $r-j$ 的三相电流为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{ha}^{(n)} \\ \dot{U}_{hb}^{(n)} \\ \dot{U}_{hc}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{h(1)}^{(n)} \\ \dot{U}_{h(2)}^{(n)} \\ \dot{U}_{h(0)}^{(n)} \end{bmatrix} \quad (1-23)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{rja}^{(n)} \\ \dot{I}_{rjb}^{(n)} \\ \dot{I}_{rjc}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{rj(1)}^{(n)} \\ \dot{I}_{rj(2)}^{(n)} \\ \dot{I}_{rj(0)}^{(n)} \end{bmatrix} \quad (1-24)$$

式中 $a = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = \cos 240^\circ + j \sin 240^\circ = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

从上述分析可知, 用对称分量法进行故障计算的关键, 是计算故障发生前瞬间的各序网节点阻抗(导纳)矩阵(或其中的局部列元素)和由故障引起的故障口各序电流 $\dot{I}_{p(s)}^{(n)}$ 。

二、短路故障口各序等值电路与口电压方程

对于 (n) 型简单短路故障, 根据单口网络理论, 由图 1-1 可得短路端口各序网的等值电路, 如图 1-2 所示。其中虚线框代表故障前瞬间短路端口各序网的等值电路, 它们与 f 处的短路类型 (n) 无关, 仅与故障点 f 的位置及短路前瞬间的电力系统运行状态有关。

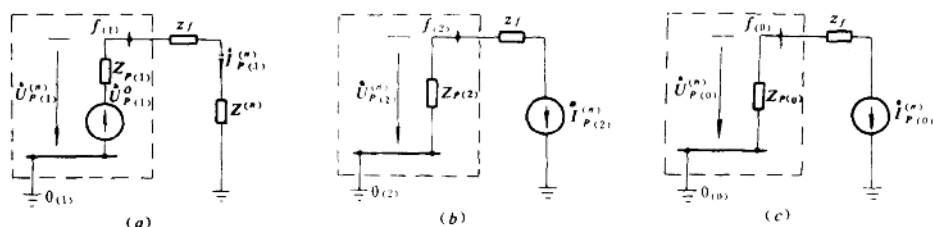


图 1-2 短路故障口各序等值电路

(a) 正序; (b) 负序; (c) 零序

当 (n) 型短路发生时, 等效于各序网的短路端口注入故障电流为 $\dot{I}_{p(s)}^{(n)}$, 由图 1-2, 根据节点阻抗方程, 可得短路端口的各序电压方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{p(1)}^{(n)} \\ \dot{U}_{p(2)}^{(n)} \\ \dot{U}_{p(0)}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{p(1)}^0 - Z_{p(1)} \dot{I}_{p(1)}^{(n)} \\ -Z_{p(2)} \dot{I}_{p(2)}^{(n)} \\ -Z_{p(0)} \dot{I}_{p(0)}^{(n)} \end{bmatrix} \quad (1-25)$$

式中: $\dot{U}_{p(1)}^0$ 为有源正序网短路端口节点 $f_{(1)}$ 、 $0_{(1)}$ 间的开路电压; $Z_{p(s)}$ 是从 (s) 序网短路端口 $f_{(s)}$ 、 $0_{(s)}$ 看到的 (s) 序网内部的等值口阻抗, 即 (s) 序网在 $f_{(s)}$ 、 $0_{(s)}$ 间呈现的总阻抗, 亦称戴维南等值阻抗。因 $0_{(s)}$ 为参考点, $\dot{U}_{p(1)}^0$ 等于 $f_{(1)}$ 点的开路电压, $Z_{p(s)}$ 等于 $Z_{(s)}$ 中第 $f_{(s)}$

列的对角元，即

$$\dot{U}_{p(1)}^0 = \dot{U}_{f(1)}^0 = \sum_{k=1}^{n_{(1)}} Z_{fk(1)} \dot{I}_{k(1)}^0 \quad (1-26)$$

$$Z_{p(n)} = Z_{ff(n)} \quad (1-27)$$

式 (1-25) 中， $\dot{I}_{p(n)}^{(n)}$ 、 $\dot{U}_{p(n)}^{(n)}$ 是与短路类型 (n) 有关的待求的故障口电流、故障口电压。

三、短路故障口边界条件方程及其等值电路——复合序网

当对称三相电力系统 f 处发生 (n) 型短路时，用对称分量法，可得短路端口各序电压的相互关系及端口各序电流的相互关系，描述这些关系的方程常称为故障边界条件方程，如表 1-1 所示。满足边界条件方程的等值电路叫复合序网。

表 1-1 故障口边界条件方程及其等值电路（复合序网）的构成方式

短路类型 (n)	故障端口支路的三相形式	以故障支路相电流相电压 表示的故障口边界条件方程	以 a 相序电流及序电压表示 的故障口边界条件方程	复合序网 构成方式
三相短路 $n=3$		$\dot{U}_{fa}^{(3)} - \dot{I}_{fa}^{(3)} z_f = 0$ $\dot{I}_{fa}^{(3)} = \dot{I}_{fb}^{(3)} = \dot{I}_{fc}^{(3)}$	$\dot{U}_{f(1)}^{(3)} - \dot{I}_{f(1)}^{(3)} z_f = 0$ $\dot{I}_{f(0)}^{(3)} = 0$ $\dot{I}_{f(2)}^{(3)} = 0$	正序网 于 $f^{(3)}$ 处 经 z_f 短 路
b、c 相短路 $n=2$		$\dot{I}_{fb}^{(2)} = -\dot{I}_{fc}^{(2)}$ $\dot{I}_{fa}^{(2)} = 0$ $\dot{U}_{fb}^{(2)} - \dot{I}_{fb}^{(2)} z_f = \dot{U}_{fc}^{(2)} - \dot{I}_{fc}^{(2)} z_f$	$\dot{I}_{f(0)}^{(2)} = 0$ $\dot{I}_{f(1)}^{(2)} + \dot{I}_{f(2)}^{(2)} = 0$ $\dot{U}_{f(1)}^{(2)} - \dot{I}_{f(1)}^{(2)} z_f = \dot{U}_{f(2)}^{(2)} - \dot{I}_{f(2)}^{(2)} z_f$	正序网 与负序网 在故障端 口并联
a 相接地 $n=1$		$\dot{I}_{fb}^{(1)} = 0$ $\dot{I}_{fc}^{(1)} = 0$ $\dot{U}_{fa}^{(1)} - \dot{I}_{fa}^{(1)} z_f = 0$	$\dot{I}_{f(1)}^{(1)} = \dot{I}_{f(2)}^{(1)} = \dot{I}_{f(0)}^{(1)}$ $\dot{U}_{f(1)}^{(1)} - \dot{I}_{f(1)}^{(1)} z_f + \dot{U}_{f(2)}^{(1)} - \dot{I}_{f(2)}^{(1)} z_f + \dot{U}_{f(0)}^{(1)} - \dot{I}_{f(0)}^{(1)} z_f = 0$	正、负、 零序网在 故障端口 串联
b、c 相接地 $n=1.1$		$\dot{I}_{fa}^{(1.1)} = 0$ $\dot{U}_{fb}^{(1.1)} - \dot{I}_{fb}^{(1.1)} z_f = 0$ $\dot{U}_{fc}^{(1.1)} - \dot{I}_{fc}^{(1.1)} z_f = 0$	$\dot{I}_{f(1)}^{(1.1)} + \dot{I}_{f(2)}^{(1.1)} + \dot{I}_{f(0)}^{(1.1)} = 0$ $\dot{U}_{f(1)}^{(1.1)} - \dot{I}_{f(1)}^{(1.1)} z_f = \dot{U}_{f(2)}^{(1.1)} - \dot{I}_{f(2)}^{(1.1)} z_f$ $= \dot{U}_{f(0)}^{(1.1)} - \dot{I}_{f(0)}^{(1.1)} z_f$	正、负、 零序网在 故障端口 并联

四、各类型短路故障口序电流的计算

利用 (n) 型短路故障口边界条件方程的等值电路——复合序网的概念,可简捷直观地算出各序网故障口电流 $\dot{I}_{f(n)}^{(n)}$,其中

$$\dot{I}_{p(1)}^{(n)} = \frac{\dot{U}_{p(1)}^0}{Z_{p(1)} + z_f + z^{(n)}} \quad (1-28)$$

式中 $z^{(n)}$ 是从 (n) 型短路故障的复合序网得出的接于正序网短路故障口的附加等值阻抗。 $z^{(n)}$ 及 $\dot{I}_{p(2)}^{(n)}$ 、 $\dot{I}_{p(0)}^{(n)}$ 的计算如表1-2所示。

表 1-2 $z^{(n)}$ 及 $\dot{I}_{p(2)}^{(n)}$ 、 $\dot{I}_{p(0)}^{(n)}$ 的计算式

短路类型 (n)	$z^{(n)}$	$\dot{I}_{p(2)}^{(n)}$	$\dot{I}_{p(0)}^{(n)}$
$n = 3$	0	0	0
$n = 2$	$Z_{p(2)} + z_f$	$-\dot{I}_{p(1)}^{(2)}$	0
$n = 1$	$Z_{p(2)} + Z_{p(0)} + 2z_f$	$\dot{I}_{p(1)}^{(1)}$	$\dot{I}_{p(1)}^{(1)}$
$n = 1, 1$	$\frac{1}{\frac{1}{Z_{p(2)} + z_f} + \frac{1}{Z_{p(0)} + z_f}}$	$-\frac{z^{(1,1)} \dot{I}_{p(1)}^{(1,1)}}{Z_{p(2)} + z_f}$	$-\frac{z^{(1,1)} \dot{I}_{p(1)}^{(1,1)}}{Z_{p(0)} + z_f}$

工程实用简化计算中常取 $\dot{U}_{p(1)}^0 = 1\text{pu}$ (标么值); $Z_{(2)} = Z_{(1)}$; 只计系统各元件的电抗; 忽略电流的正常分量, 只计故障分量。据此不难得出上述计算过程的简化计算公式。

从故障口电流及节点电压、支路电流计算公式看出, 对同一短路点的计算, 只需用到 $Z_{(n)}$ 中的局部列元素。例如工程实用简化计算中, 只用到 $Z_{(n)}$ 中与故障点关联列(第 $f(s)$)列内的某些元素。

五、同一点各型短路故障电流电压分布的快速计算

上述的短路计算模型表明: 在系统同一运行方式的条件下, 对于各类型的短路故障, 正序网同一节点电压的正常分量相同, 同一支路电流的正常分量也是相同的, 它们与故障位置及故障类型无关; 又根据线性网络特性, 各序网节点电压及支路电流的故障分量均与故障口电流成比例。利用这一特性可以简化和加快各型故障口电流及其分布的计算。

$$\text{令} \quad k = \frac{Z_{p(2)} + z_f}{Z_{p(2)} + z_f} \quad (1-29)$$

$$k_{(s)}^{(n)} = \frac{\dot{I}_{k(s)}^{(n)}}{\dot{I}_{p(1)}^{(1)}} \quad (n) = (3), (2), (1, 1) \quad (1-30)$$

表 1-3 以 a 相接地为基准的 $k_{(0)}^{(n)}$ 值

短路类型 (n)	$k_{(1)}^{(n)}$	$k_{(2)}^{(n)}$	$k_{(0)}^{(n)}$
(3)	$2+k$	0	0
(2)	$1+0.5k$	$-1-0.5k$	0
(1, 1)	$-(k_{(0)}^{(1,1)} + k_{(2)}^{(1,1)})$	$kk_{(0)}^{(1,1)}$	$-\frac{2+k}{1+2k}$

式中 $k_{(0)}^{(n)}$ 称为非单相接地短路与 a 相接地短路的同序口电流比例系数，在正序网与负序网阻抗参数相同的情况下，根据式 (1-29) 和式 (1-30)，可得 $k_{(0)}^{(n)}$ 值如表 1-3 所示。显然，根据实际应用的需要，还可导出以任何一种短路为基准的同序口电流比例系数。

从表 1-3 不难看出

$$k_{(2)}^{(2)} = -k_{(1)}^{(2)} = \frac{k_{(1)}^{(3)}}{2} \quad (1-31)$$

因此，只需详细算出 a 相接地时故障口的各序电流 $\dot{I}_{p(0)}^{(1)}$ 、任意节点 h 各序电压的故障分量 $\dot{U}_{h(0)}^{(1)}$ 与任意支路 $r-j$ 各序电流的故障分量 $\dot{I}_{rj(0)}^{(1)}$ 后，利用 $k_{(0)}^{(n)}$ 便可快速算出其余各类型故障情况下故障口各序电流， h 节点各序电压与 $r-j$ 支路各序电流的故障分量，即

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{p(0)}^{(n)} \\ \dot{U}_{h(0)}^{(n)} \\ \dot{I}_{rj(0)}^{(n)} \end{bmatrix} = k_{(0)}^{(n)} \begin{bmatrix} \dot{I}_{p(0)}^{(1)} \\ \dot{U}_{h(0)}^{(1)} \\ \dot{I}_{rj(0)}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (1-32)$$

由于 $\mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}_{(1)}$ 和 $\dot{I}_{p(2)}^{(1)} = \dot{I}_{p(1)}^{(1)}$ ，所以

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{h(1)}^{f(1)} \\ \dot{I}_{rj(1)}^{f(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{h(2)}^{f(1)} \\ \dot{I}_{rj(2)}^{f(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{h(2)}^{(1)} \\ \dot{I}_{rj(2)}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (1-33)$$

根据叠加原理，可得 (n) 型短路情况下任意节点 h 的正序电压 $\dot{U}_{h(1)}^{(n)}$ 、任意支路 $r-j$ 的正序电流 $\dot{I}_{rj(1)}^{(n)}$ 为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{h(1)}^{(n)} \\ \dot{I}_{rj(1)}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{h(1)}^0 \\ \dot{I}_{rj(1)}^0 \end{bmatrix} + k_{(1)}^{(n)} \begin{bmatrix} \dot{U}_{h(2)}^{(1)} \\ \dot{I}_{rj(2)}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (1-34)$$

【例 1-1】某 220 kV 系统的正序网络与零序网络如图 1-3 (a)、(b) 所示，其参数是以 $S_B = 60$ MVA、 $U_B = 230$ kV 为基准的标么值。各序网的节点阻抗矩阵 $\mathbf{Z}_{(0)}$ 、 $\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z}_{(2)}$ 均为已知。试计算节点③处各型金属性短路 ($z_f = 0$) 故障时，节点①、②、③的各序电压与支路 1-3、2-1 的各序电流。

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z}_{(2)} = j \begin{bmatrix} 0.04750 & 0.02246 & 0.02109 & 0.01259 \\ 0.02246 & 0.03537 & 0.02736 & 0.01632 \\ 0.02109 & 0.02736 & 0.03211 & 0.01915 \\ 0.01259 & 0.01632 & 0.01915 & 0.04775 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}_{(0)} = j \begin{bmatrix} 0.03170 & 0.00429 & 0.00307 & 0.00043 \\ 0.00429 & 0.02756 & 0.00916 & 0.00129 \\ 0.00307 & 0.00916 & 0.01806 & 0.00254 \\ 0.00043 & 0.00129 & 0.00254 & 0.02613 \end{bmatrix}$$

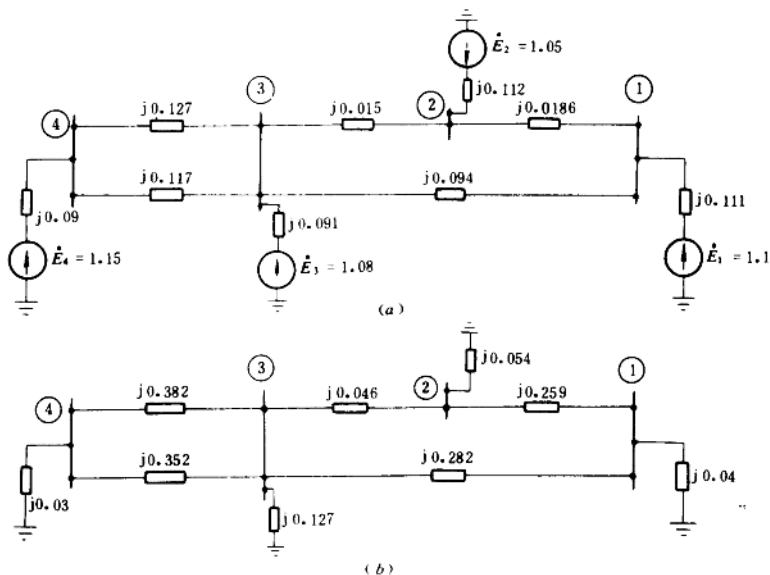


图 1-3 例 1-1 系统正、零序网络

(a) 正序网络; (b) 零序网络

解: 根据诺顿定理, 可得正序网节点电流源的正常分量为

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{(1)}^o &= \left[\frac{1.1}{j0.111} \quad \frac{1.05}{j0.112} \quad \frac{1.08}{j0.091} \quad \frac{1.15}{j0.09} \right]^T \\ &= [-j9.90991 \quad -j9.37500 \quad -j11.86813 \quad -j12.77778]^T \end{aligned}$$

根据式 (1-16), 可得正序网各节点的开路电压为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(1)}^o \\ \dot{U}_{2(1)}^o \\ \dot{U}_{3(1)}^o \\ \dot{U}_{4(1)}^o \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_{(1)} \mathbf{I}_{(1)}^o = \begin{bmatrix} 1.09245 \\ 1.08742 \\ 1.09128 \\ 1.11518 \end{bmatrix}$$

根据式 (1-28) 及表 1-2, 可得节点③处 a 相金属性接地短路的各序电流为

$$\begin{aligned} \dot{I}_{f(1)}^{(1)} &= \dot{I}_{f(2)}^{(1)} = \dot{I}_{f(0)}^{(1)} = \frac{\dot{U}_{3(1)}^o}{Z_{33(1)} + Z_{33(2)} + Z_{33(0)}} \\ &= \frac{1.09128}{j(0.03211 + 0.03211 + 0.01806)} = -j13.26300 \end{aligned}$$

根据式 (1-17)、式 (1-14)、式 (1-15)，可得节点①、②、③各序电压的故障分量为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(1)}^{f(1)} \\ \dot{U}_{2(1)}^{f(1)} \\ \dot{U}_{3(1)}^{f(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(2)}^{(1)} \\ \dot{U}_{2(2)}^{(1)} \\ \dot{U}_{3(2)}^{(1)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{13(1)} \\ Z_{23(1)} \\ Z_{33(1)} \end{bmatrix} \dot{I}_{f(1)}^{(1)} = -j \begin{bmatrix} 0.02109 \\ 0.02736 \\ 0.03211 \end{bmatrix} (-j13.26300) = \begin{bmatrix} -0.27922 \\ -0.36288 \\ -0.42588 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(0)}^{(1)} \\ \dot{U}_{2(0)}^{(1)} \\ \dot{U}_{3(0)}^{(1)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{13(0)} \\ Z_{23(0)} \\ Z_{33(0)} \end{bmatrix} \dot{I}_{f(0)}^{(1)} = -j \begin{bmatrix} 0.00307 \\ 0.00916 \\ 0.01806 \end{bmatrix} (-j13.26300) = \begin{bmatrix} -0.04072 \\ -0.12149 \\ -0.23953 \end{bmatrix}$$

根据式 (1-13C)，可得节点①、②、③的正序电压为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(1)}^{(1)} \\ \dot{U}_{2(1)}^{(1)} \\ \dot{U}_{3(1)}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(1)}^o \\ \dot{U}_{2(1)}^o \\ \dot{U}_{3(1)}^o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(1)}^{f(1)} \\ \dot{U}_{2(1)}^{f(1)} \\ \dot{U}_{3(1)}^{f(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.09245 \\ 1.08742 \\ 1.09128 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.27972 \\ -0.36288 \\ -0.42588 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.81273 \\ 0.72454 \\ 0.66540 \end{bmatrix}$$

根据式 (1-22A)、式 (1-19)、式 (1-20)，可得 1-3、2-1 支路的各序电流的故障分量为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{13(1)}^{f(1)} \\ \dot{I}_{21(1)}^{f(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{13(2)}^{(1)} \\ \dot{I}_{21(2)}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{U}_{1(1)}^{f(1)} - \dot{U}_{3(1)}^{f(1)}}{Z_{13(1)}} \\ \frac{\dot{U}_{2(1)}^{f(1)} - \dot{U}_{1(1)}^{f(1)}}{Z_{21(1)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-0.27972 - (-0.42588)}{j0.094} \\ \frac{-0.36288 - (-0.27972)}{j0.086} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j1.55488 \\ j0.96698 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{13(0)}^{(1)} \\ \dot{I}_{21(0)}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{U}_{1(0)}^{(1)} - \dot{U}_{3(0)}^{(1)}}{Z_{13(0)}} \\ \frac{\dot{U}_{2(0)}^{(1)} - \dot{U}_{1(0)}^{(1)}}{Z_{21(0)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-0.04072 - (-0.23953)}{j0.282} \\ \frac{-0.12149 - (-0.04072)}{j0.259} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.70501 \\ j0.31186 \end{bmatrix}$$

根据式 (1-21A)，可得 1-3、2-1 支路的正序电流的正常分量为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{13(1)}^o \\ \dot{I}_{21(1)}^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{U}_{1(1)}^o - \dot{U}_{3(1)}^o}{Z_{13(1)}} \\ \frac{\dot{U}_{2(1)}^o - \dot{U}_{1(1)}^o}{Z_{21(1)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1.09245 - 1.09128}{j0.094} \\ \frac{1.08742 - 1.09245}{j0.086} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.01245 \\ j0.05849 \end{bmatrix}$$

根据式 (1-18D)，可得 1-3、2-1 支路的正序电流为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{13(1)}^{(1)} \\ \dot{I}_{21(1)}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{13(1)}^o \\ \dot{I}_{21(1)}^o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{I}_{13(1)}^{f(1)} \\ \dot{I}_{21(1)}^{f(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.01245 \\ j0.05849 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -j1.55488 \\ j0.96698 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j1.56733 \\ j1.02547 \end{bmatrix}$$

根据式 (1-29) 得

$$k = \frac{Z_{33(0)}}{Z_{33(2)}} = \frac{j0.01806}{j0.03211} = 0.56244$$

根据表 1-3 可得

$$k_{(1)}^{(3)} = 2 + k = 2 + 0.56244 = 2.56244$$

$$k_{(1)}^{(2)} = -k_{(2)}^{(2)} = 1 + 0.5k = 1 + 0.5(0.56244) = 1.28122$$

$$k_{(0)}^{(1,1)} = -\frac{2+k}{1+2k} = -\frac{2+0.56244}{1+2(0.56244)} = -1.20592$$

$$k_{(2)}^{(1,1)} = kk_{(0)}^{(1,1)} = 0.56244(-1.20592) = -0.67826$$

$$k_{(1)}^{(1,1)} = -(k_{(0)}^{(1,1)} + k_{(2)}^{(1,1)}) = -(-1.20592 - 0.67826) = 1.88418$$

根据式 (1-32) ~ 式 (1-34), 可得节点③处非单相接地的各类型短路故障时, 节点①、

②、③的各序电压为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(1)}^{(3)} \\ \dot{U}_{2(1)}^{(3)} \\ \dot{U}_{3(1)}^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(1)}^0 \\ \dot{U}_{2(1)}^0 \\ \dot{U}_{3(1)}^0 \end{bmatrix} + k_{(1)}^{(3)} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(2)}^{(1)} \\ \dot{U}_{2(2)}^{(1)} \\ \dot{U}_{3(2)}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.09245 \\ 1.08742 \\ 1.09128 \end{bmatrix} + 2.56244 \begin{bmatrix} -0.27972 \\ -0.36288 \\ -0.42588 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.37568 \\ 0.15756 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(2)}^{(2)} \\ \dot{U}_{2(2)}^{(2)} \\ \dot{U}_{3(2)}^{(2)} \end{bmatrix} = k_{(2)}^{(2)} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(2)}^{(1)} \\ \dot{U}_{2(2)}^{(1)} \\ \dot{U}_{3(2)}^{(1)} \end{bmatrix} = -1.28122 \begin{bmatrix} -0.27972 \\ -0.36288 \\ -0.42588 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.35838 \\ 0.46493 \\ 0.54565 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(1)}^{(2)} \\ \dot{U}_{2(1)}^{(2)} \\ \dot{U}_{3(1)}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(1)}^0 \\ \dot{U}_{2(1)}^0 \\ \dot{U}_{3(1)}^0 \end{bmatrix} + k_{(1)}^{(2)} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(2)}^{(1)} \\ \dot{U}_{2(2)}^{(1)} \\ \dot{U}_{3(2)}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.09245 \\ 1.08742 \\ 1.09128 \end{bmatrix} + 1.28122 \begin{bmatrix} -0.27972 \\ -0.36288 \\ -0.42588 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.73407 \\ 0.62249 \\ 0.54563 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(1)}^{(1,1)} \\ \dot{U}_{2(1)}^{(1,1)} \\ \dot{U}_{3(1)}^{(1,1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(1)}^0 \\ \dot{U}_{2(1)}^0 \\ \dot{U}_{3(1)}^0 \end{bmatrix} + k_{(1)}^{(1,1)} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(2)}^{(1)} \\ \dot{U}_{2(2)}^{(1)} \\ \dot{U}_{3(2)}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.09245 \\ 1.08742 \\ 1.09128 \end{bmatrix} + 1.88418 \begin{bmatrix} -0.27972 \\ -0.36288 \\ -0.42588 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.56541 \\ 0.40369 \\ 0.28885 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(2)}^{(1,1)} \\ \dot{U}_{2(2)}^{(1,1)} \\ \dot{U}_{3(2)}^{(1,1)} \end{bmatrix} = k_{(2)}^{(1,1)} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(2)}^{(1)} \\ \dot{U}_{2(2)}^{(1)} \\ \dot{U}_{3(2)}^{(1)} \end{bmatrix} = -0.67826 \begin{bmatrix} -0.27972 \\ -0.36288 \\ -0.42588 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.18972 \\ 0.24613 \\ 0.28886 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(0)}^{(1,1)} \\ \dot{U}_{2(0)}^{(1,1)} \\ \dot{U}_{3(0)}^{(1,1)} \end{bmatrix} = \mathbf{k}_{(0)}^{(1,1)} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(0)}^{(1)} \\ \dot{U}_{2(0)}^{(1)} \\ \dot{U}_{3(0)}^{(1)} \end{bmatrix} = -1.20592 \begin{bmatrix} -0.04072 \\ -0.12149 \\ -0.23953 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.04911 \\ 0.14651 \\ 0.28885 \end{bmatrix}$$

根据式 (1-34), 可得节点③处非单相接地各型短路时, 支路 1-3、2-1 的各序电流为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{I}_{13(1)}^{(3)} \\ \dot{I}_{21(1)}^{(3)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{I}_{13(1)}^o \\ \dot{I}_{21(1)}^o \end{bmatrix} + \mathbf{k}_{(1)}^{(3)} \begin{bmatrix} \dot{I}_{13(2)}^{(1)} \\ \dot{I}_{21(2)}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.01245 \\ j0.05849 \end{bmatrix} + 2.56244 \begin{bmatrix} -j1.55488 \\ j0.96697 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -j3.99674 \\ j2.53629 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{I}_{13(1)}^{(2)} \\ \dot{I}_{21(1)}^{(2)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{I}_{13(1)}^o \\ \dot{I}_{21(1)}^o \end{bmatrix} + \mathbf{k}_{(1)}^{(2)} \begin{bmatrix} \dot{I}_{13(2)}^{(1)} \\ \dot{I}_{21(2)}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.01245 \\ j0.05849 \end{bmatrix} + 1.28122 \begin{bmatrix} -j1.55488 \\ j0.96697 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -j2.00459 \\ j1.23890 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{13(2)}^{(2)} \\ \dot{I}_{21(2)}^{(2)} \end{bmatrix} = \mathbf{k}_{(2)}^{(2)} \begin{bmatrix} \dot{I}_{13(2)}^{(1)} \\ \dot{I}_{21(2)}^{(1)} \end{bmatrix} = -1.28122 \begin{bmatrix} -j1.55488 \\ j0.96697 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j1.99214 \\ -j1.29739 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{I}_{13(1)}^{(1)} \\ \dot{I}_{21(1)}^{(1)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{I}_{13(1)}^o \\ \dot{I}_{21(1)}^o \end{bmatrix} + \mathbf{k}_{(1)}^{(1)} \begin{bmatrix} \dot{I}_{13(2)}^{(1)} \\ \dot{I}_{21(2)}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.01245 \\ j0.05849 \end{bmatrix} + 1.88418 \begin{bmatrix} -j1.55488 \\ j0.96697 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -j2.94212 \\ j1.88044 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{13(2)}^{(1)} \\ \dot{I}_{21(2)}^{(1)} \end{bmatrix} = \mathbf{k}_{(2)}^{(1)} \begin{bmatrix} \dot{I}_{13(2)}^{(1)} \\ \dot{I}_{21(2)}^{(1)} \end{bmatrix} = -0.67826 \begin{bmatrix} -j1.55488 \\ j0.96697 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j1.05461 \\ -j0.65586 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{13(0)}^{(1)} \\ \dot{I}_{21(0)}^{(1)} \end{bmatrix} = \mathbf{k}_{(0)}^{(1)} \begin{bmatrix} \dot{I}_{13(0)}^{(1)} \\ \dot{I}_{21(0)}^{(1)} \end{bmatrix} = -1.20592 \begin{bmatrix} -j0.70501 \\ j0.31186 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j0.85019 \\ j0.37608 \end{bmatrix}$$

根据标么值的定义, 不难算出各序节点电压与支路电流的有名值。例如

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(1)}^{(1,1)} \\ \dot{U}_{2(1)}^{(1,1)} \\ \dot{U}_{3(1)}^{(1,1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.56541 \\ 0.40369 \\ 0.28885 \end{bmatrix} \frac{230}{\sqrt{3}} = \begin{bmatrix} 75.0811 \\ 53.06062 \\ 38.31008 \end{bmatrix} \text{ kV (相电压)}$$