

电牵引供电系统短路计算机辅助分析

王 勋 刘润田

(电气工程系)

摘 要 根据电牵引供电系统故障的对称分量统一解析法及不对称短路计算的正序等效定则, 形成一个通用等效复合序网, 以运算曲线法, 建立牵引供电系统中发生短路后任意时刻网络中任一处电气量的机辅分析计算的一套数学模型, 并给出程序设计框图.

关键词 电牵引供电系统; 短路计算; 计算机辅助分析; 建模

分类号 TM922.3

0 引 言

利用计算机进行科学计算, 具有运算速度快、精度高、贮存容量大、一次编程多次使用的特点, 所以, 计算机辅助分析在各个领域获得了许多成果. 电牵引供电系统短路计算为供电系统中设备的选取、元件参数的整定及系统运行状态的分析提供依据, 因此, 短路计算是非常重要的. 既有的计算方法^[1,2]通过对电力系统(一次供电系统)的网络化简得到戴维南等效网络, 再按故障类型进行分析计算. 这种方法主要分析故障对牵引供电系统自身的影响, 适用于手工计算, 对节点少的网络是方便的. 现代大型电力系统中网络节点数多达数百个, 手算显然繁琐而费时. 因此, 利用计算机进行辅助分析计算是十分必要的, 但分析计算方法有其特殊性. 本文对常用接线(V/V、Y/△-11、SCOTT)变电所构成的电牵引供电系统, 根据对称分量统一解析法^[3], 论述电牵引供电系统中短路的计算机辅助分析(CAA)的一般方法.

1 电牵引供电系统故障等效网络

1.1 三相等效网络

电牵引供电系统短路三相等效网络^[3]如图1所示. 图中, 一次供电系统是有源三相对称网络, m 节点为牵引变电所高压侧母线, f 点是短路点. m 、 f 两节点间网络为电牵引供电系统, 它由牵引变电所和牵引网两部分组成, 牵引变电所(牵引变压器)以牵引侧形式表示参数, 这

收稿日期: 1994-12-05.

王勋, 男, 1960年生, 讲师.

样, 牵引网与牵引变电所具有相同的电气特性. mf 段是三相不对称串联阻抗网络. 文中电气量除说明外是以统一基准的标么值.

1.2 012 系统变换

012 系统变换式^[1,4]是

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_{p-0} \\ \dot{F}_{p-1} \\ \dot{F}_{p-2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_p \\ \dot{F}_q \\ \dot{F}_r \end{bmatrix}, \quad (1)$$

及逆变换式

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_p \\ \dot{F}_q \\ \dot{F}_r \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_{p-0} \\ \dot{F}_{p-1} \\ \dot{F}_{p-2} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式(1)、(2)中 p 代表基准相, q, r 代表其它两相, 且 pqr 满足正相序.

具有三相不对称串联阻抗网络(网络阻抗矩阵为 Z_{pqr})变换到 012 系统的序网络阻抗矩阵为

$$Z_{p-012} = A^{-1} Z_{pqr} A, \quad (3)$$

上式 A^{-1} 和 A 分别是式(1)、(2)中系数矩阵, 且有互逆关系. 图1中 mf 段网络用式(3)实现变换.

在电牵引供电系统中牵引网(包括牵引变电所牵引母线)发生短路不存在零序分量, 因此, 零序分量电气量为零, 且零序网络不予考虑.

1.3 序网络

图1所示三相等效网络, 经 012 系统变换得到图2形式的序网络^[3].

图2中 m, f 两点间正、负序网络阻抗矩阵元素按表1计算^[3], 表中各阻抗是牵引变电所和牵引网之和, 若短路点在牵引母线处, 则各相阻抗仅为牵引变电所相应的阻抗.

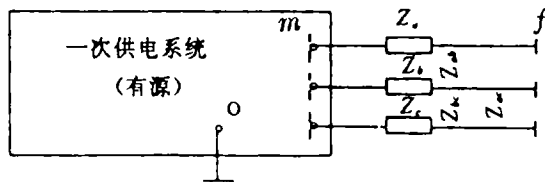


图1 电牵引供电系统故障三相等效网络

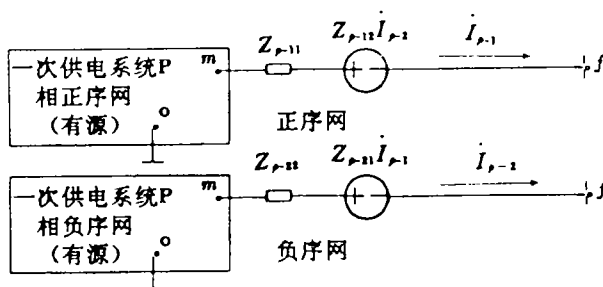


图2 电牵引供电系统故障的序网络

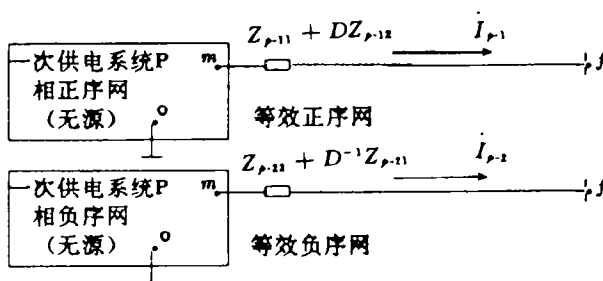


图3 电牵引供电系统故障的等效序网络

表1 正、负序网络阻抗矩阵元素计算表

变电所及 相应牵引网	$\begin{bmatrix} Z_{p-11} & Z_{p-12} \\ Z_{p-21} & Z_{p-22} \end{bmatrix}$
V/V 或 Y/ Δ -11	$\begin{bmatrix} \frac{1}{3}(Z_p + Z_q + Z_r) & \frac{1}{3}(Z_p + a^2 Z_q + a Z_r) \\ \frac{1}{3}(Z_p + a Z_q + a^2 Z_r) & \frac{1}{3}(Z_p + Z_q + Z_r) \end{bmatrix}$
SCOTT	$\begin{bmatrix} \frac{1}{4}(Z_e + Z_p) & \frac{1}{4}(Z_e - Z_p) \\ \frac{1}{4}(Z_e - Z_p) & \frac{1}{4}(Z_e + Z_p) \end{bmatrix}$

由牵引供电系统广义两相短路和广义三相短路分析^[3]可得故障口正、负序电流关系

$$\dot{I}_{p-2} = D\dot{I}_{p-1}. \quad (4)$$

上式中系数 D 取表 2 对应值. 将式 (4) 式代入图 2 中并变换受控电压源的形式, 则图 2 变成图 3 等效序网络.

2 电牵引供电系统短路电气量计算

2.1 正、负序网方程

图 3 为正、负序等效网络. 设独立节点数为 n , 以节点阻抗矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} Z_{11}^{(s)} & Z_{12}^{(s)} & \cdots & Z_{1m}^{(s)} & \cdots & Z_{1f}^{(s)} & \cdots & Z_{1n}^{(s)} \\ Z_{21}^{(s)} & Z_{22}^{(s)} & \cdots & Z_{2m}^{(s)} & \cdots & Z_{2f}^{(s)} & \cdots & Z_{2n}^{(s)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_{n1}^{(s)} & Z_{n2}^{(s)} & \cdots & Z_{nm}^{(s)} & \cdots & Z_{nf}^{(s)} & \cdots & Z_{nn}^{(s)} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 s 表示序, 取 1 或 2.

对于正序网, 节点阻抗矩阵与节点电流源列阵及节点电压列阵表示的网络方程是

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1-p-1} \\ \vdots \\ \dot{U}_{f-p-1} \\ \vdots \\ \dot{U}_{n-p-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}^{(1)} & \cdots & Z_{1n}^{(1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{f1}^{(1)} & \cdots & Z_{fn}^{(1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1}^{(1)} & \cdots & Z_{nn}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ (-\dot{I}_{p-1}) \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix}. \quad (6)$$

若已知节点阻抗矩阵及节点电流源列阵 (注入节点电流为正, 故障口 $\dot{I}_{p-1}$ 流出节点为负), 则由式 (6) 计算各节点的正序电压分量.

对于负序网, 节点电流除 f 节点外都为零, 因此相应的方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1-p-2} \\ \vdots \\ \dot{U}_{n-p-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1f}^{(2)} \\ \vdots \\ Z_{nf}^{(2)} \end{bmatrix} (-\dot{I}_{p-2}). \quad (7)$$

若已知正、负序网中各节点电压, 则任一条无源支路 (两节点为 i, j) 的电流序分量

$$\dot{I}_{ij-p-1} = \frac{\dot{U}_{i-p-1} - \dot{U}_{j-p-1}}{z_{ij}^{(1)}}, \quad (8)$$

式中 $z_{ij}^{(s)}$ 为 s 序网中节点 i 与 j 之间的支路阻抗.

正序网中有源支路 (母线节点为 i 、接地点为参考点 o) 电流分量是

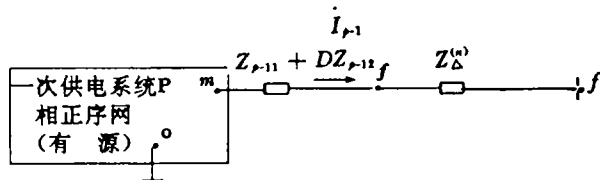


图4 等效复合序网

$$\dot{I}_{i \rightarrow p-1} = \frac{\sqrt{3} \dot{E}_i - \dot{U}_{i-p-1}}{z_{io}^{(1)}}, \quad (8a)$$

式中 $\dot{E}_i$ 为电源电势, $\dot{U}_{i-p-1}$ 为电源母线的正序电压, $z_{io}^{(1)}$ 为电源支路正序阻抗。

2.2 短路电气量计算

根据正序等效定则^[1], 不对称短路任意时刻短路点正序电流与在短路点每相接入附加阻抗 $Z_{\Delta}^{(*)}$ 而发生三相短路电流相等。由此得到计算牵引供电系统短路任意时刻正序电流的等效复合序网, 如图4所示, 图中附加阻抗计算列于表2中。

2.2.1 超暂态电气量计算

短路发生后, 各电源电势若已知暂态电势时, 则系统中电气量为超暂态电气量。

图4中, 电压源转换成电流源, 则任一电源电势 $\dot{E}_i''$ 转换成电流源

$$\dot{I}_i = \frac{\sqrt{3} \dot{E}_i''}{z_{io}^{(1)}} \quad (9)$$

f' 点处理成接地点, 即对应三相短路, 相应的节点阻抗矩阵以添加一条接地连支在 f 节点上而修改式(5)的正序网对应矩阵的所有元素^[1], 即

$$Z_{ij}^{(1)} = Z_{ij}^{(1)} - \frac{Z_{if}^{(1)} Z_{jf}^{(1)}}{Z_{ff}^{(1)} + Z_{\Delta}^{(*)}}, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

由修改后的节点阻抗矩阵与节点电流源列阵乘积得等效复合序网中各节点的正序电压即

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1-p-1} \\ \vdots \\ \dot{U}_{n-p-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}^{(1)} & \cdots & Z_{1n}^{(1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1}^{(1)} & \cdots & Z_{nn}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix}. \quad (11)$$

短路端口正序电流, 即 f, f' 两点间支路的电流

$$\dot{I}_{p-1} = \frac{\dot{U}_{f-p-1}}{Z_{\Delta}^{(*)}}. \quad (12)$$

其它电气量按式(4)、(7)、(8)、(8a)(2)式分别计算。

2.2.2 任意时刻电气量计算

故障发生后若电源电势具体变化未知, 则采用短路电流实用计算方法^[5], 即运算曲线法。对于机辅分析, 以数据文件代替运算曲线, 查曲线变为访问数据文件。

为了计算图4中各电源对 f' 点的转移阻抗, 把 f' 点设为独立节点, 则相应原网络增加一个节点, 原节点阻抗矩阵增加一阶, 新增的一列元素是^[1]

$$\begin{cases} Z_{if'}^{(1)} = Z_{if}^{(1)}, & i = 1, 2, \dots, n; \quad i \neq f' \\ Z_{f'f'}^{(1)} = Z_{ff}^{(1)} + Z_{\Delta}^{(*)}. \end{cases} \quad (13)$$

对任一电源, 设母线节点为 i , 支路正序阻抗为 $z_{io}^{(1)}$, 容量为 S_n (有名值), 则该电源对 f' 点的转移阻抗^[6]是

表2 系数 D 和附加阻抗 $Z_{\Delta}^{(*)}$ 的计算表

故障类型	系数 D	附加阻抗 $Z_{\Delta}^{(*)}$
广义两相短路	$-C^{-1}$	$Z_{mm}^{(2)} + Z_{p-22} - CZ_{p-21}$
广义三相短路	$-\frac{Z_{p-21}}{Z_{mm}^{(2)} + Z_{p-22}}$	0

注: C ——对于 V/V 或 Y/Δ 取 1; 对于 SCOTT, α 相接地短路取 -1 , β 相接地短路取 1, α, β 相短路取复数 j ;

$Z_{mm}^{(2)}$ ——图2或图3负序网中 m 节点对应节点阻抗矩阵中自阻抗元素。

$$z_{if} = \frac{Z_{ff}^{(1)}}{Z_{if}^{(1)}}, z_{io}^{(1)}. \quad (14)$$

图 4 网络则变成图 5 的简化网络.

任一电源对 f' 点的计算阻抗为

$$z_{if}^{(p)} = z_{if} \cdot \frac{S_n}{S_j} \quad (15)$$

由计算阻抗 $z_{if}^{(p)}$ (忽略电阻, 以电抗运算) 和短路后时刻 t 两参数访问数据文件, 得到相应电源对短路点提供的短路电流正序分量 $\dot{I}_{if}^{(p)}(t)$ (已计及系统变换的系数).

此刻电源电势为

$$\sqrt{3} \dot{E}_i = z_{if}^{(p)} \cdot \dot{I}_{if}^{(p)}(t),$$

转换成电流源

$$\dot{I}_i = \frac{\sqrt{3} \dot{E}_i}{z_{io}},$$

即

$$\dot{I}_i = \frac{z_{if}^{(p)}}{z_{io}} \cdot \dot{I}_{if}^{(p)}(t). \quad (16)$$

短路端口总的正序电流

$$\dot{I}_{f-1} = \sum_{i=1}^m \dot{I}_{if}^{(p)}(t) \cdot \frac{S_j}{S_n}, \quad (17)$$

把式 (16)、(17) 代入式 (6) 得图 3 正序网中各节点正序电压, 其它电气量按式 (4)、(7)、(8)、(8a)、(2) 分别计算.

2.2.3 牵引母线电压及牵引网电流计算

牵引网短路时牵引母线电压按牵引变电所与牵引网串联关系计算, 设牵引网序阻抗矩阵为 $\begin{bmatrix} Z_{QP-11} & Z_{QP-12} \\ Z_{QP-21} & Z_{QP-22} \end{bmatrix}$, 则牵引母线电压正、负序分量是

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{m'-p-1} \\ \dot{U}_{m'-p-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{QP-11} & Z_{QP-12} \\ Z_{QP-21} & Z_{QP-22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{f-1} \\ \dot{I}_{f-2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{f-p-1} \\ \dot{U}_{f-p-2} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

对于 V/V 和 Y/ Δ -11 变电所组成的牵引供电系统, 牵引母线各相电压由式 (18) 代入式 (2) 求得; 对于 SCOTT 变电所牵引母线各相电压按下式计算^[3]

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -j & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{m'-p-1} \\ \dot{U}_{m'-p-2} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

牵引网电流的计算, 对于 V/V 和 Y/ Δ -11 变电所组成的牵引供电系统, 在求得正、负序电流分量后代入式 (2) 计算; 对于 SCOTT 变电所组成的牵引供电系统, 牵引网电流按下式计算^[3]

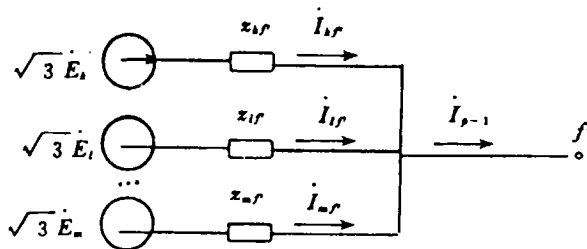


图 5 等效复合序网的简化形式

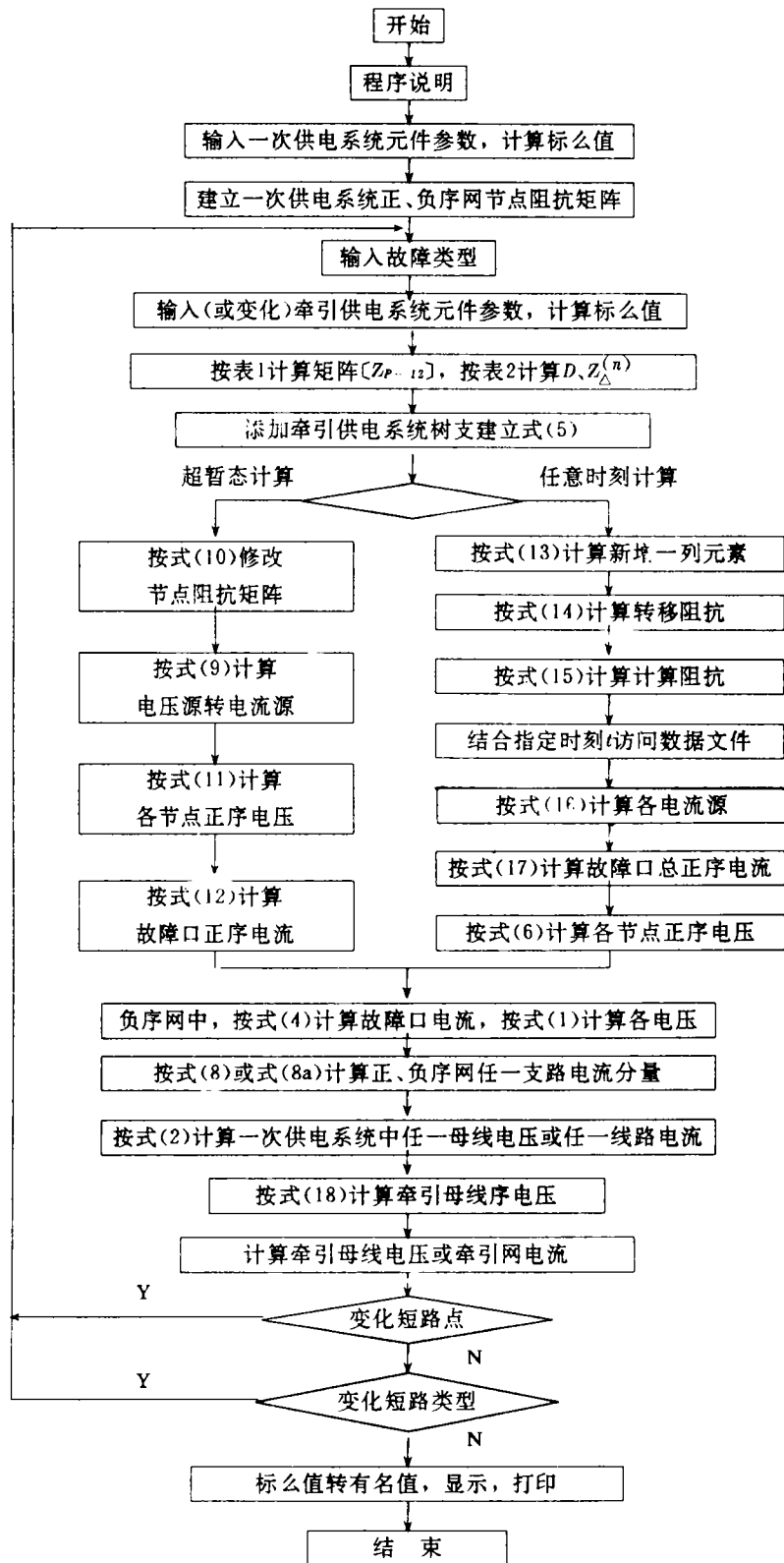


图6 程序框图

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -j & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{p-1} \\ \dot{I}_{p-2} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

3 程序设计及分析计算方法比较

电牵引供电系统短路计算程序框图如图 6 所示. 按此框图编制的程序, 计算了几个实例, 结果正确, 限于篇幅, 在此从略.

前述机辅分析计算方法与既有方法^[1,2]比较主要有以下几点不同:

(1) 数学模型 机辅分析计算方法是用于计算机计算的, 它以统一的等效网络(如图 1~4)为基础, 建立适合各种故障计算的通用数学模型, 其对于计算机编程是极为方便的. 既有方法适用于手工计算, 对不同类型牵引变电所构成的牵引供电系统有各自的短路计算数学模型.

(2) 计算转移阻抗 机辅分析计算通过建立节点阻抗矩阵, 如式(5)和式(13), 再由式(14)计算出短路点与电源间的转移阻抗. 既有方法则是通过网络化简获得的, 显然对大型网络进行网络化简是很不方便的.

(3) 查运算曲线 机辅分析把运算曲线数字表以数据文件形式预先存储好, 查曲线则变成自动访问数据文件. 既有方法则需人工查运算曲线, 由于人工查曲线易产生误差, 故自动访问数据文件获得的短路电流精确度高.

(4) 计算一次供电系统的电气量 机辅分析方法通过节点阻抗矩阵很方便地计算出系统中各节点电压序分量, 如式(6)和(7), 进一步可算出各支路中电流序分量, 如式(8)、(8a), 由此按式(2)计算出任一节点三相电压及任一条线路中三相电流, 而既有方法则不易计算. 这是机辅分析方法的一个显著优点.

4 结束语

电牵引供电系统短路计算机辅助分析是提高供电系统计算的运算质量和准确性及劳动效率的有效手段. 本文建立了电牵引供电系统短路后任意时刻网络中任一处电气量的机辅分析计算的数学模型, 为短路计算通用软件的研制奠定了基础.

参 考 文 献

- 1 简克良. 电力系统分析. 成都: 西南交通大学出版社, 1993
- 2 铁道部电气化工程局电气化勘测设计院编. 电气化铁道设计手册. 牵引供电系统. 北京: 中国铁道出版社, 1988, 59~64
- 3 王勋, 刘润田. 电牵引供电系统故障的对称分量统一解析法. 华东交通大学学报, 1994, 11 (1): 25~34
- 4 P. M. 安德逊著, 王际强等译. 电力系统故障分析. 北京: 电力工业出版社, 1980, 18~25
- 5 西安交通大学. 短路电流实用计算方法. 北京: 电力工业出版社, 1982
- 6 米麟书, 刘芳宁. 电力系统故障的计算机辅助分析. 重庆: 重庆大学出版社, 1992, 18~20

CAA for Railway Traction Power

Supply System Faults

Wang Xun Liu Runtian

Abstract According to the unified analyses of railway traction power supply system faults by the method of symmetrical components and the positive sequence equivalent standing rule of unsymmetrical fault calculation, a generalized equivalent sequence network connection is established. Using the method of operating curve, it is established that a set of CAA's mathematic model of electrical values at a time after the occurrence of a fault wherever the railway traction power supply system. And the flowchart is given.

Key words Railway traction power supply system; Fault calculation; CAA; Modelling