

电牵引供电系统故障的 对称分量统一解析法

王 勋 刘润田

(电气工程系)

摘 要

将电牵引供电系统作为具有不对称串联阻抗的网络,提出电牵引供电系统故障分析的通用等效电路,应用对称分量法,推导出牵引供电系统的序网络阻抗矩阵计算公式,建立统一序网方程和序网络。根据电牵引供电系统的特点,把故障归结为广义两相短路和广义三相短路两大类,形成相应的复合序网,推导出两类短路电流序分量计算通式。从而建立电牵引供电系统故障的对称分量统一解析方法。

关键词:电牵引供电系统;故障分析;对称分量;不对称串联阻抗

0 引 言

电牵引供电系统故障分析的计算结果为供电系统中设备的选取和元件参数的整定以及系统运行状态的分析提供依据,因而它影响着供电系统的正常和有效供电,对保证电气化铁路正常运行有着深远的影响。所以对电牵引供电系统故障分析计算的研究是极有意义的。

电牵引供电系统由牵引变电所和牵引网组成,就三相而言其构成不对称阻抗的网络,因此电牵引供电系统故障分析比较困难。目前,电牵引供电系统故障分析主要有两类分析计算方法:应用三相对称分量法按三相对称网络结合欧姆定律进行的分析计算^[1];使用系统变换法将牵引变电所前的一次供电三相系统变换到牵引侧两相系统进行的分析计算^{[2]、[3]、[4]}。此外,主要用于非故障分析的其它计算方法^{[5]、[6]}亦能进行故障分析计算。

本文论述一种新的解析方法,这种方法仍应用三相对称分量法。其关键是依据牵引变电所和牵引网具有三相不对称阻抗,且与一次供电系统在电路上具有串联关系的特点,把牵引变电所和牵引网当作具有不对称串联阻抗的网络。这种解析法首先把 ABC (或 abc)三相对称系统变换到 012 三序对称分量系统,不对称串联阻抗网络也变换到 012 系统^{[7]、[8]},建立序网方程和序网络,结合短路边界条件求得的短路点电压和电流序分量关系,形成复合序网。由此求出短路电流序分量,最后由系统逆变换式求得短路电流。本文阐述常用接线(V/V 、 $Y/$

本文于1993年8月18日收到

△-11、SCOTT) 变电所构成的牵引供电系统中牵引侧各种故障分析计算。

1 等效电路

电力系统(一次供电系统)和电牵引供电系统构成向电力机车提供完备电能的大系统。在大系统中一次供电系统与电牵引供电系统相接,如图1。图中 m 点左侧网络为一次供电系统, m 点右侧为电牵引供电系统。

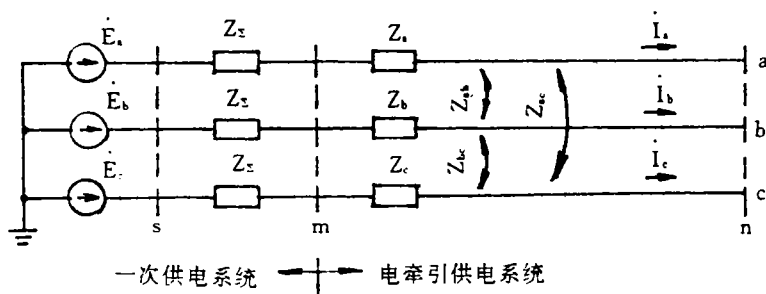


图1 电牵引供电系统故障的等效电路

一次供电系统的网络一般比较复杂,为突出电牵引供电系统故障的分析方法,设一次供电系统仅为三相对称的电源电势和总阻抗组成简单的等效网络,并设三相电源电势为 $\dot{E}_a$ 、 $\dot{E}_b$ 、 $\dot{E}_c$ (为分析方便,设文中所有电气量均为标么值),三相总阻抗都为 Z_s (如图1所示),在正序网中 $Z_s = Z_{1s}$,负序网中 $Z_s = Z_{2s}$,零序网中 $Z_s = Z_{0s}$ 。

牵引网的电气特性与相联着的牵引变电所牵引侧的电气特性相同,因此把牵引变电所和牵引网当作一个网络处理,即图1中 mn 段网络。由于变电所和牵引网是三相不对称的,因此用图1中不对称通用等效网络来表示。图中 Z_a 、 Z_b 、 Z_c 为各相自阻抗, Z_{ab} 、 Z_{bc} 、 Z_{ac} 为相间互阻抗。这样以图1等效电路分析故障实际上包含了牵引变电所牵引侧母线短路和牵引网短路两种形式的故障。

图1中, sm 段为一次供电系统的无源网络,这个网络是三相对称的; mn 段为电牵引供电系统的三相不对称网络; n 点设为故障点。图中很清楚地示出了 mn 段网络与 sm 段网络之间的串联关系。因此, mn 段是具有不对称串联阻抗的网络。

2 序网方程及序网络

对于图1电路,当 n 点发生不对称故障时,应用三相对称分量法,可以写出矩阵形式的序网方程^[8]

$$\dot{E}_{p-012} = \dot{U}_{sm-012} + \dot{U}_{mn-012} - \dot{U}_{n-012} \quad (1)$$

式中

p ——代表 a, b, c 三相中一相, 该相是短路计算的基准相, 另外两相设为 q, r 相, 且 pqr 满足正相序 (文中下同);

$\dot{E}_{p-012}$ ——基准相 p 电源电势三序分量列阵;

$\dot{U}_{im-p-012}, \dot{U}_{mn-p-012}$ ——分别表示 sm 段网络和 mn 段网络基准相 p 电压降三序分量列阵;

$\dot{U}_{n-p-012}$ —— n 点基准相 p 电压三序分量列阵。

牵引变电所牵引侧一公共接地端 (一相) 和两供电臂 (另两相) 构成三相系统 (如图 1 所示), 三相网络 (无中性线) 短路点总有 $\dot{I}_p + \dot{I}_q + \dot{I}_r = 0$, 由系统变换关系式可得短路电流零序分量等于零, 则电压零序分量亦等于零。所以, 牵引供电系统牵引侧发生故障不必考虑零序分量。由此对式 (1) 中有关零序的部分可不予考虑, 则式 (1) 简写成

$$\dot{E}_{p-12} = \dot{U}_{im-p-12} + \dot{U}_{mn-p-12} - \dot{U}_{n-p-12}, \quad (1a)$$

式中各列阵是式 (1) 中只取后两行的子阵。

三相对称电路中, 电源电势正、负序分量^[8]

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_{p-12} \\ \dot{E}_{p-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} \dot{E}_p \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\dot{E}_p$ 为基准相 p 的电势。

sm 段电压降正、负序分量

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{im-p-1} \\ \dot{U}_{im-p-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 \\ 0 & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{p-1} \\ \dot{I}_{p-2} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $\dot{I}_{p-1}, \dot{I}_{p-2}$ 分别表示基准相 p 电流正、负序分量。

具有不对称串联阻抗的 mn 段网络的电压降正、负序分量将根据变电所接线形式而确定其与电流正、负序分量之间的具体关系, 但可以用通式表示

$$\dot{U}_{mn-p-12} = \dot{Z}_{p-12} \dot{I}_{p-12}, \quad (4)$$

式中 $\dot{Z}_{p-12}$ 表示 mn 段网络相应正、负序网的序网络阻抗矩阵。

式 (4) 写成繁式

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{mn-p-1} \\ \dot{U}_{mn-p-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{p-11} & Z_{p-12} \\ Z_{p-21} & Z_{p-22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{p-1} \\ \dot{I}_{p-2} \end{bmatrix}, \quad (4a)$$

式中

Z_{p-11}, Z_{p-22} —— mn 段网络基准相 p 的正序网、负序网自阻抗;

Z_{p-12}, Z_{p-21} —— mn 段网络基准相 p 的正、负序网间互阻抗。

将式 (1a) 写成繁式, 把式 (2)、(3)、(4a) 代入并整理得

$$\begin{bmatrix} \sqrt{3} \dot{E}_p \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} + Z_{p-11} & Z_{p-12} \\ Z_{p-21} & Z_{22} + Z_{p-22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{p-1} \\ \dot{I}_{p-2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{n-p-1} \\ \dot{U}_{n-p-2} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

上式是电牵引供电系统故障分析的通用序网方程,由此方程可画出对应的通用序网络,如图 2 所示。图中互阻抗引起的电压降用受控电压源表示。

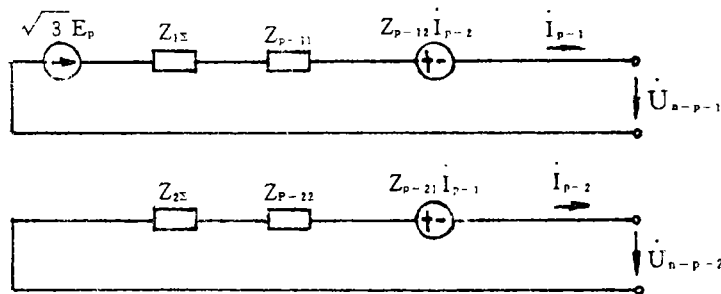


图 2 电牵引供电系统故障的序网络

3 具有不对称串联阻抗网络的序网络阻抗矩阵

3.1 一般三相不对称网络

图 1 中, mn 段网络是一般三相不对称网络, 其三相电压降是

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{mn-p} \\ \dot{U}_{mn-q} \\ \dot{U}_{mn-r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_{pq} & Z_{pr} \\ Z_{pq} & Z_q & Z_{qr} \\ Z_{pr} & Z_{qr} & Z_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_p \\ \dot{I}_q \\ \dot{I}_r \end{bmatrix}, \quad (6)$$

写成简式

$$\dot{U}_{mn-pqr} = Z_{pqr} \dot{I}_{pqr}. \quad (6a)$$

式 (6a) 中电压降和电流用其对称分量表示, 则 (6a) 式成为

$$A \dot{U}_{mn-p-012} = Z_{pqr} A \dot{I}_{p-012},$$

上式两边左乘 A^{-1} 得 mn 段网络电压降与电流的 p 相对称分量之间关系

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{mn-p-0} \\ \dot{U}_{mn-p-1} \\ \dot{U}_{mn-p-2} \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} Z_p & Z_{pq} & Z_{pr} \\ Z_{pq} & Z_q & Z_{qr} \\ Z_{pr} & Z_{qr} & Z_r \end{bmatrix} A \begin{bmatrix} \dot{I}_{p-0} \\ \dot{I}_{p-1} \\ \dot{I}_{p-2} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

写成简式

$$\dot{U}_{mn-p-012} = A^{-1} Z_{pqr} A \dot{I}_{p-012}. \quad (7a)$$

式中 A 和 A^{-1} 为一对系统变换矩阵^[8]

$$A = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}, \quad A^{-1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}.$$

变换矩阵中算符 $a = e^{j120^\circ}$ 。

根据欧姆定律, 令式 (7a) 中

$$\mathbf{Z}_{p-012} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{Z}_{pqr} \mathbf{A} \quad (8)$$

式中 $\mathbf{Z}_{p-012}$ 表示 mn 段网络 p 相的序网络阻抗矩阵。

式 (8) 是 pqr 系统变换到 012 系统时 $\mathbf{Z}_{pqr}$ 表示的三相网络变换到用 $\mathbf{Z}_{p-012}$ 表示的序网络的阻抗矩阵变换式。

3.2 V/V 或 Y/Δ-11 接线牵引变电所和牵引网

V/V 接线变电所中变压器由两台单相变压器组成, Y/Δ-11 接线变电所中变压器是三相变压器。根据这两种变电所等效电路^[1], 考虑与变电所相接的牵引网, 可用图 3 所示的通用等效网络表示 V/V 接线变电所或 Y/Δ-11 接线变电所和牵引网。图中 Z_p, Z_q, Z_r 为三相阻抗。对于 V/V 接线, 三相中一相阻抗为零, 该相为变电所牵引侧公共接地端对应相, 另两相阻抗由各自的变压器阻抗和牵引网阻抗组成; 对于 Y/Δ-11 接线, 三相中一相阻抗仅包含变压器阻抗, 该相为变电所牵引侧公共接地端对应相, 另两相不仅包含相同的变压器阻抗还包含各自的牵引网阻抗。

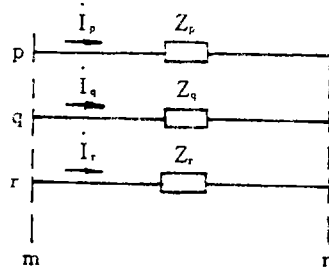


图3 V/V 或 Y/Δ-11 变电所及牵引网的等效网络

图3是图1中 mn 段网络互阻抗为零的形式, 则图3中 mn 段网络电压降与电流序分量之间的关系

如式 (7) 或 (7a), 阻抗矩阵变换式如式 (8), 把 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{A}^{-1}$ 及 $Z_{pq} = Z_{qr} = Z_{rp} = 0$ 代入 (8) 式, 整理并化简得图3网络的对应序网络阻抗矩阵

$$\mathbf{Z}_{p-012} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}(Z_p + Z_q + Z_r) & \frac{1}{3}(Z_p + a^2 Z_q + a Z_r) & \frac{1}{3}(Z_p + a Z_q + a^2 Z_r) \\ \frac{1}{3}(Z_p + a Z_q + a^2 Z_r) & \frac{1}{3}(Z_p + Z_q + Z_r) & \frac{1}{3}(Z_p + a^2 Z_q + a Z_r) \\ \frac{1}{3}(Z_p + a^2 Z_q + a Z_r) & \frac{1}{3}(Z_p + a Z_q + a^2 Z_r) & \frac{1}{3}(Z_p + Z_q + Z_r) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

不考虑零序部分, 则 (9) 式简写成

$$\mathbf{Z}_{p-12} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}(Z_p + Z_q + Z_r) & \frac{1}{3}(Z_p + a^2 Z_q + a Z_r) \\ \frac{1}{3}(Z_p + a Z_q + a^2 Z_r) & \frac{1}{3}(Z_p + Z_q + Z_r) \end{bmatrix}. \quad (9a)$$

式 (9a) 是 V/V 接线或 Y/Δ-11 接线变电所和牵引网组成的牵引供电系统的序网络阻

抗矩阵计算式。

3.3 SCOTT 接线变电所和牵引网

SCOTT 接线变电所中变压器是 SCOTT 变压器, 它由两台单相变压器组成, 如图 4 (a)^[1], 设两台单相变压器阻抗为 $Z_{B\alpha}$ (对应 α 相) 和 $Z_{B\beta}$ (对应 β 相), 变电所牵引侧公共接地端为 o' 相, 这里 o' 相不是零序, 该相在计算公共端流出电流 I_o 时考虑。

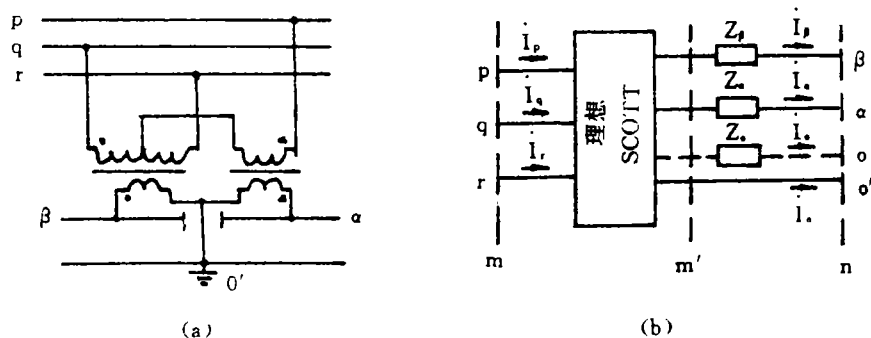


图 4 SCOTT 变电所及牵引网

图 4 (b) 为 SCOTT 接线变电所和牵引网的等效网络。为了分析方便, 在牵引侧虚设了零序^{[1],[2]}, 图中用 o 表示, 阻抗为 Z_o 。图中还把 SCOTT 变压器和牵引网分成两段: mm' 段为理想 SCOTT 变压器, 即有 $Z_{B\alpha}=0$, $Z_{B\beta}=0$; $m'n$ 段仍为牵引侧, 其阻抗是实际 SCOTT 变压器的阻抗与牵引网阻抗之和, 即 $Z_\alpha=Z_{B\alpha}+Z_{Q\alpha}$, $Z_\beta=Z_{B\beta}+Z_{Q\beta}$ 。

3.3.1 理想 SCOTT 变压器牵引侧电压和电流与序分量的变换关系

理想 SCOTT 变压器两侧电压及电流关系是^{[1],[2]}

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_p \\ \dot{U}_q \\ \dot{U}_r \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_p \\ \dot{I}_q \\ \dot{I}_r \end{bmatrix}$$

其简式为

$$\dot{U}_{\alpha\beta} = A_\alpha \dot{U}_{pqr}, \quad \dot{I}_{\alpha\beta} = A_\beta \dot{I}_{pqr}$$

式中 $\dot{U}_0$ 、 $\dot{I}_0$ 都为零序分量, 且与 $\dot{U}_\alpha$ 、 $\dot{I}_\alpha$ 不同。

简式中 $\dot{U}_{pqr}$ 和 $\dot{I}_{pqr}$ 用其三相对称分量表示, 则

$$\dot{U}_{\alpha\beta} = A_\alpha A \dot{U}_{p-012}, \quad (10)$$

$$\dot{I}_{\alpha\beta} = A_\beta A \dot{I}_{p-012}. \quad (11)$$

写成繁式, 代入 A_α 、 A_β 、 A , 经计算和整理且不考虑零序部分得

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -j & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{p-1} \\ \dot{U}_{p-2} \end{bmatrix}, \quad (10a)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -j & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{p-1} \\ \dot{I}_{p-2} \end{bmatrix}. \quad (11a)$$

式(10a)和(11a)的逆变换式

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{p-1} \\ \dot{U}_{p-2} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{p-1} \\ \dot{I}_{p-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix}. \quad (13)$$

式(10a)与式(12)是理想 SCOTT 变压器牵引侧电压与其相应的 p 相正、负序分量相互变换关系式; 式(11a)与式(13)是理想 SCOTT 变压器牵引侧电流与其相应的 p 相正、负序分量相互变换关系式。因为图4中 $m'n$ 段网络与理想 SCOTT 变压器牵引侧的电气特性相同, 所以上述两对变换关系式亦适用于 $m'n$ 段网络。

3.3.2 序网络阻抗矩阵

图4(b) mn 段网络中, mm' 段为理想变压器, 则 mm' 段电压降为零。因此, $\dot{U}_{mn-\alpha\beta} = \dot{U}_{m'n-\alpha\beta}$, 则有

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{mn-\alpha} \\ \dot{U}_{mn-\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & Z_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix},$$

简式为

$$\dot{U}_{mn-\alpha\beta} = Z_{\alpha\beta} \dot{I}_{\alpha\beta}.$$

根据式(10)、(11), 则上式变成

$$\mathbf{A}_u \dot{U}_{mn-pqr} = Z_{\alpha\beta} \mathbf{A}_i \dot{I}_{pqr}.$$

两边左乘 $\mathbf{A}_u^{-1}$ 得

$$\dot{U}_{mn-pqr} = \mathbf{A}_u^{-1} Z_{\alpha\beta} \mathbf{A}_i \dot{I}_{pqr}, \quad (14)$$

将(14)式与(6a)式比较得

$$\mathbf{Z}_{pqr} = \mathbf{A}_u^{-1} Z_{\alpha\beta} \mathbf{A}_i. \quad (15)$$

此式是 $\alpha\beta$ 系统变换到 pqr 三相系统的网络阻抗变换式, 变换后阻抗矩阵表示的网络结构上与图1中 mn 段完全一样。

把(15)式代入(8)式得

$$\mathbf{Z}_{p-012} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A}_u^{-1} Z_{\alpha\beta} \mathbf{A}_i \mathbf{A}, \quad (16)$$

上式右边代入各参数, 整理并不考虑零序部分得

$$\mathbf{Z}_{p-12} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}(Z_\alpha + Z_\beta) & \frac{1}{4}(Z_\alpha - Z_\beta) \\ \frac{1}{4}(Z_\alpha - Z_\beta) & \frac{1}{4}(Z_\alpha + Z_\beta) \end{bmatrix}. \quad (16a)$$

式 (16a) 是 SCOTT 变电所和牵引网组成 mn 段网络对应的序网络阻抗矩阵计算式。

4 故障解析

电牵引供电系统牵引侧故障有三种:

1. 一相接地短路。形式是一臂牵引母线接地短路, 或牵引网一相接地短路。
2. 两相短路。形式是两臂牵引母线短路, 或复线牵引网异相供电时异相短路。
3. 两相短路接地。形式是两臂牵引母线短路接地, 或单线牵引网两臂同时接地短路, 或复线牵引网异相供电时异相短路接地。

从变电所牵引侧接轨地的公共端作为一相考虑, 牵引供电系统故障归结为两大类:

第一类为广义两相短路, 其包括一相接地短路和两相短路;

第二类为广义三相短路, 即两相短路接地。

按两大类故障分析, 可形成相应的复合序网 (即有两种复合序网), 求得相应的短路电流分量计算通式, 最后求得短路电流计算通式。详细的解析过程汇于电牵引供电系统故障分析计算表 (表 1)。表中分析过程使用了式 (5) 序网方程和图 2 序网络以及图 5 所示复合序网。

表中短路电流计算通式, 对于具体电路, 找出基准相替换 p , 按序网络阻抗矩阵计算公式求得各元素, 并按表中系数 c 代入, 则得具体计算公式 (若代入具体数据则得短路电流值), 这些具体计算公式与文献^{[1][2][3][9]}一致, 这里不再赘述。

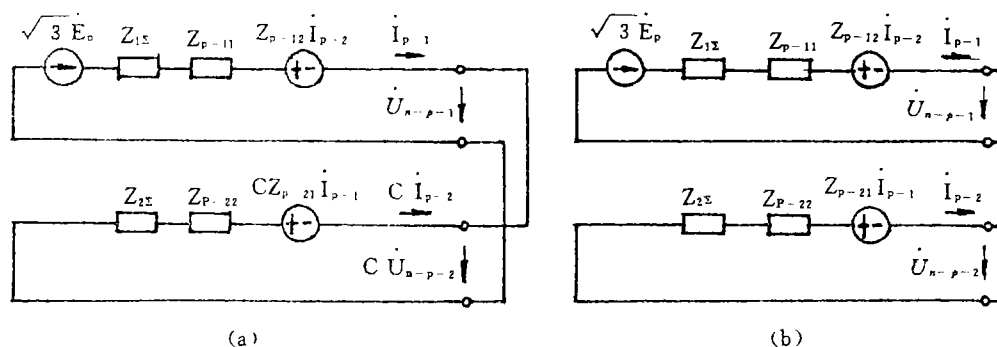


图 5 电牵引供电系统故障的复合序网

5 结束语

本文系统地阐述了电牵引供电系统故障的对称分量统一解析方法, 以建立通用等效电路、统一的序网方程和序网络以及两类故障复合序网和故障电流分量计算通式, 使电牵引供电系统故障分析应用对称分量法具有统一的理论体系。此外, 这种解析法使电牵引供电系统故障分析与电力系统故障分析^{[1][7][8]}相一致, 因而更易于分析电牵引系统对电力系统的影响。

表 1 电牵引供电系统故障分析计算

故障形式		广义两相短路		广义三相短路	
		一相接地短路	两相短路	两相短路接地	
相情况	边界条件	r相接地短路,q相接地	q,r相短路,p相接地	q,r相短路接地,p相接地	
		a相接地短路	a,β相短路	a,β相短路接地	
边界条件	V/V或Y/Δ-11	$\dot{U}_{n-r}=\dot{U}_{n-q}=0, I_r=0$	$\dot{U}_{n-q}=\dot{U}_{n-r}, I_p=0$	$\dot{U}_{n-q}=\dot{U}_{n-r}, I_p=0$	
	SCOTT	$\dot{U}_{n-s}=0, I_p=0$	$\dot{U}_{n-s}=\dot{U}_{n-p}, I_s+I_p=0$	$\dot{U}_{n-s}=\dot{U}_{n-p}, I_s+I_p=0$	
	按变换式 ^[1] 计算V/V或Y/Δ-11	$\dot{U}_{n-r-1}=\dot{U}_{n-p-1}, I_{r-1}=-I_{p-1}$			
	按式(12)或(13)计算SCOTT	$\dot{U}_{n-r-1}=-\dot{U}_{n-p-1}, I_{r-1}=I_{p-1}$	$\dot{U}_{n-r-1}=j\dot{U}_{n-p-1}, I_{r-1}=-jI_{p-1}$		
	通用形式	$\dot{U}_{n-r-1}=C\dot{U}_{n-p-1}, I_{r-1}=-CI_{p-1}$			$\dot{U}_{n-p-1}=\dot{U}_{n-r-1}=0$
系数C	V/V或Y/Δ-11	$C=1$			
	SCOTT	$C=-1(\beta\text{相接地短路 } C=1)$		$C=j$	
复台序网		图 5(a)		图 5(b)	
短路电流序分量		$\dot{I}_{r-1}=\Delta_1^{-1}\sqrt{3}\dot{E}_r$ $\dot{I}_{p-1}=-C^{-1}\Delta_1^{-1}\sqrt{3}\dot{E}_r$ 式中 $\Delta_1=Z_{12}+Z_{p-11}+Z_{p-22}-C^{-1}Z_{p-12}-CZ_{p-21}$		式 中 $\dot{I}_{r-1}=(Z_{12}+Z_{p-22})\Delta_1^{-1}\sqrt{3}\dot{E}_r$ $\dot{I}_{p-1}=-Z_{p-11}\Delta_1^{-1}\sqrt{3}\dot{E}_r$ $\Delta_1=(Z_{12}+Z_{p-11})(Z_{12}+Z_{p-22})-Z_{p-12}Z_{p-21}$	
短 路 电 流	V/V或Y/Δ-11 SCOTT(一次侧) (按变换式 ^[1] 计算)	$\dot{I}_r=0$ $\dot{I}_q=(a^2-C^{-1}a)\Delta_1^{-1}\dot{E}_r$ $\dot{I}_s=(a-C^{-1}a^2)\Delta_1^{-1}\dot{E}_r$		$\dot{I}_r=(Z_{12}+Z_{p-22}-Z_{p-11})\Delta_1^{-1}\dot{E}_r$ $\dot{I}_q=[a^2(Z_{12}+Z_{p-11})-aZ_{p-21}]\Delta_1^{-1}\dot{E}_r$ $\dot{I}_s=[a(Z_{12}+Z_{p-22})-a^2Z_{p-11}]\Delta_1^{-1}\dot{E}_r$	
	SCOTT(牵引侧) (按式(11a)计算)	$\dot{I}_s=(1-C^{-1})(2\Delta_1)^{-1}\sqrt{3}\dot{E}_r$ $\dot{I}_p=-j(1+C^{-1})(2\Delta_1)^{-1}\sqrt{3}\dot{E}_r$		$\dot{I}_s=(Z_{12}+Z_{p-22}-Z_{p-11})(2\Delta_1)^{-1}\sqrt{3}\dot{E}_r$ $\dot{I}_p=-j(Z_{12}+Z_{p-22}-Z_{p-11})(2\Delta_1)^{-1}\sqrt{3}\dot{E}_r$	

参 考 文 献

- [1] 贺威俊, 简克良. 电气化铁道供变电工程. 北京: 中国铁道出版社, 1986. 186~198
- [2] 王凤华. 三相—两相牵引变电所和网络的系统变换. 铁道学报, 1981, 3 (2)
- [3] 王凤华. 单相和三相牵引变电所及故障解析. 西南交通大学, 1981
- [4] 王凤华. 牵引变电所单相负载的组合特征. 铁道学报, 1984, 6 (1)
- [5] 李群湛, 贺建刚. 牵引变电所基波和谐波通用模型. 铁道学报, 1992, 14 (3)
- [6] 唐永忠. 有牵引负荷的电力系统多相网络计算方法. 中国铁道科学, 1991, 12 (2)
- [7] W. D. Stevenson. Elements of Power System Analysis, New York: McGraw Hill, 1975. 315~317
- [8] 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
- [9] 王勋. V/V 接线变电所牵引侧复故障的一种分析计算. 华东交通大学学报, 1993, 10 (4)

Unified Analysis of Railway Traction Power Supply System

Faults by the Method of Symmetrical Components

Wang Xun Liu Runtian

ABSTRACT

Regarding the railway traction power supply system as the network with the unsymmetrical series impedances, this paper presents a general three-phase equivalent circuit used in the fault analysis of the system. Using the method of symmetrical components, the formulae of the sequence network impedance matrix are derivated from the system, the unified sequence network equations and sequence networks are established, the sequence network connections are formed as regards the generalized line-to-line fault and the generalized three-phase fault on the system, and the general formulae of the two kind fault current sequence components are derivated. It consequently establishes the unified analysis by the method of symmetrical components.

Key words: Railway traction power supply system; Symmetrical components; Fault analysis; Unsymmetrical series impedances