

牵引网广义两相不对称系统 短路阻抗计算方法

王 勋

(电气工程系)

摘 要 将牵引网广义两相不对称系统当作具有两相不对称串联阻抗的网络,运用两相对称分量法,形成牵引网短路的复合序网,导出牵引网短路阻抗的一般计算公式。

关键词 牵引网; 短路阻抗; 不对称串联阻抗; 广义对称分量法

分类号 TM711; TM922

0 引 言

电牵引供电系统由牵引变电所和牵引网两部分组成,牵引网中有沿着电气化铁路露天设置的接触网,铁路运营中供电系统的故障大多数为接触网故障,因此,对牵引网故障点的确定及故障分析是非常重要的,这些都与牵引网短路阻抗的大小相关。

牵引网广义两相系统是指直接供电或 BT 供电的复线电气化铁路牵引网,或 AT 供电的单线电气化铁路牵引网。在计算牵引网短路阻抗时,已知牵引网各输电线的单位阻抗及短路点至牵引变电所的牵引网长度等,牵引网短路阻抗的计算方法有按各自供电方式的等效网络分别计算^[1,2]及运用广义对称分量法建立等效复合序网的计算^[1,3]。后一种方法需把牵引网处理成两相对称系统,即要求两相参数几乎相同。实际上牵引网两相系统一般是不对称的,AT 供电牵引网是典型的例子。对此,本文论述具有不对称广义两相系统的牵引网,将其当作具有不对称串联阻抗的网络,运用两相对称分量法,建立相应的等效复合序网,计算牵引网短路阻抗。

1 系统变换及序阻抗

1.1 广义两相系统的系统变换

收稿日期: 1994-10-05.

王 勋,男,1960 年生,讲师。

由多相对称分量法^[1,3,4]将 ab 两相对称系统中不对称电气量与其在 01 两序系统中对称分量的变换关系^[1,3]是

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_a \\ \dot{F}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_{a-0} \\ \dot{F}_{a-1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_{a-0} \\ \dot{F}_{a-1} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_a \\ \dot{F}_b \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 具有不对称串联阻抗两相网络的电压与电流关系

图 1 是 ij 段 ab 两相具有不对称串联阻抗的网络. 根据图中网络结构得下列电压与电流关系式

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{ij-a} \\ \dot{U}_{ij-b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_{ab} \\ Z_{ab} & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \end{bmatrix} \quad (3)$$

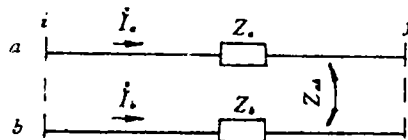


图 1 具有不对称串联阻抗的两相网络

1.3 具有不对称串联阻抗两相网络的序阻抗

对图 1 所示两相网络, 运用两相对称分量法^[1,3], 将其变换到 01 两序系统. 以 a 相为基准, 根据式 (1), 把式 (3) 中电压降列阵和电流列阵以对称分量表示, 则

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{ij-a-0} \\ \dot{U}_{ij-a-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_{ab} \\ Z_{ab} & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a-0} \\ \dot{I}_{a-1} \end{bmatrix},$$

整理得

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{ij-a-0} \\ \dot{U}_{ij-a-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(Z_a + Z_b) + Z_{ab} & \frac{1}{2}(Z_a - Z_b) \\ \frac{1}{2}(Z_a - Z_b) & \frac{1}{2}(Z_a + Z_b) - Z_{ab} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a-0} \\ \dot{I}_{a-1} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

根据欧姆定律, 显然从式 (4) 中得序阻抗矩阵

$$\begin{bmatrix} Z_0 & Z_{01} \\ Z_{01} & Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(Z_a + Z_b) + Z_{ab} & \frac{1}{2}(Z_a - Z_b) \\ \frac{1}{2}(Z_a - Z_b) & \frac{1}{2}(Z_a + Z_b) - Z_{ab} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式 (5) 是具有图 1 所示网络变换到 01 对称系统的通用阻抗变换矩阵.

2 牵引网等效序网络

2.1 直接供电或 BT 供电牵引网

复线电气化铁路供电系统中, 牵引变电所同相母线与一侧牵引网相连, 直接供电或 BT 供电牵引网等效电路如图 2 所示^[1].

图 2 中, 上行线和下行线的牵引网设为广义两相系统中 a 相和 b 相, 轨大地为参考电位, $\dot{E}_q$ 是为分析计算而设的电势, 大小为牵引母线对轨地 (亦为接地相) 的电压, 上、下行线间设有多个阻抗为零的横连线; Z'_a 、 Z'_b 及 Z'_{ab} 分别为计及了轨大地影响的 a 相、 b 相单位自阻抗及 a 、 b 相间单位互阻抗 (单位都为 Ω/km , 下同); m 节点为牵引母线, f 点设为故障点, 两点间牵引网长度为 l (单位为 km , 长度单位下同), 故障点所在横连线间牵引网长度为 L' , 故障点距变电所侧相邻的横连线间牵引网长度为 l' .

图 2 中 mf 段牵引网中各横连线间网络与图 1 网络具有相同的结构形式, 它们是不对称两相系统网络, 因此这些网络变换到 01 对称系统时, 各网络的单位序阻抗矩阵具有与式 (5) 相同的形式.

对于横连线, 根据序网形成方法, 在 0 序网中它呈开路, 在 1 序网中其呈短路^[1].

m 点各相电势 $[\dot{E}_a \quad \dot{E}_b]^T = [\dot{E}_q \quad \dot{E}_q]^T$, 按式 (2) 变换成对称分量 $[\dot{E}_{a-0} \quad \dot{E}_{a-1}]^T = [\dot{E}_q \quad 0]^T$.

f 点 a 相电压对称分量设为 $\dot{U}_{f-a-0}$ 和 $\dot{U}_{f-a-1}$; a 相电流对称分量设为 $\dot{I}_{a-0}$ 和 $\dot{I}_{a-1}$.

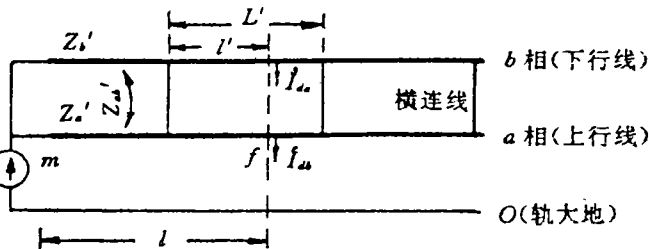


图 2 直接供电或 BT 供电牵引网等效电路

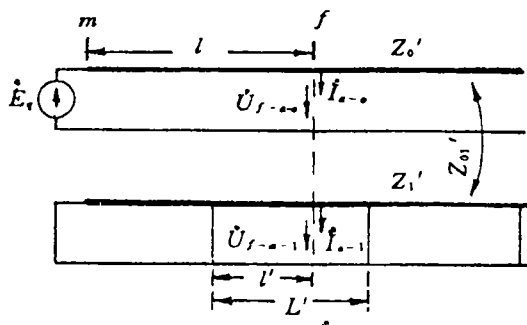


图 3 直接供电或 BT 供电牵引网序网络

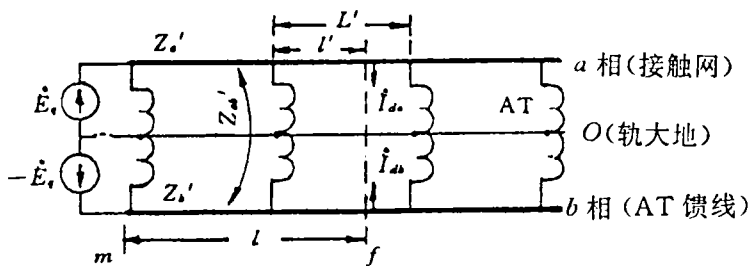


图 4 单线 AT 供电牵引网等效电路

综上所述, 图 2 所示网络变换到 01 对称系统有图 3 所示序网络。

2.2 AT 供电牵引网

单线电气化铁路 AT 供电牵引网等效电路如图 4 所示^[1]。图中接触网和 AT 馈线设为广义两相系统中 a 相和 b 相, 轨大地为参考电位, $\dot{E}_q$ 为分析计算牵引网短路阻抗而设的电势, 其大小为牵引母线对地电压 (对应 Y/△ 接线变电所, 图中轨大地相连电源的地如虚线所示), 或为接触网相连母线与 AT 馈线相连母线间电压的一半 (对应 SCOTT 变电所, 图中轨大地与电源的地不连); Z'_a 、 Z'_b 及 Z'_{ab} 分别为计及了轨大地影响的 a 相、 b 相单位自阻抗及 a 、 b 相间单位互阻抗; AT 设为理想自耦变压器, 则有激磁阻抗为无限大, 短路阻抗 (漏抗) 为零; m 点为牵引变电所母线, f 点为故障点; mf 两点间牵引网长度为 l , AT 间牵引网长度为 l' , 故障点 f 与变电所侧相邻 AT 间的牵引网长度为 l' 。

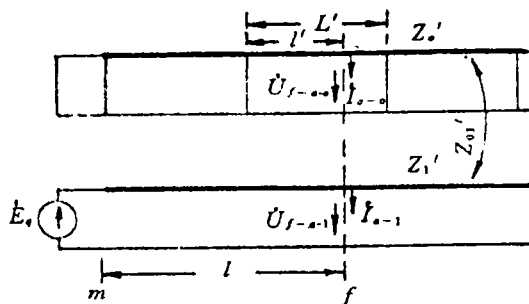


图 5 AT 供电牵引网序网络

对图 4 广义两相系统运用两相对称分量法进行系统变换。电源按式 (2) 变换

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_{a-0} \\ \dot{E}_{a-1} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_q \\ -\dot{E}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{E}_q \end{bmatrix},$$

AT 之间牵引网结构与图 1 相同, 因此, 单位序阻抗矩阵与式 (5) 相同; AT 为理想自耦变压器, 在 0 序网中呈短路, 在 1 序网中呈开路^[1]。由此图 4 形式的广义两相系统变换到 01 两序系统如图 5 所示。

3 牵引网短路阻抗计算

牵引网短路阻抗是归至牵引网电压 (27.5KV) 的转移阻抗, 大小是图 2 或图 4 中电源电势 $\dot{E}_q$ 与短路点处短路电流 $\dot{I}_d$ 的比值, 即

$$Z_q = \frac{\dot{E}_q}{\dot{I}_d} \quad (6)$$

从图 3 和图 5 看出, 两种序网络拓扑相同, 因此, 部分短路阻抗分析计算方法相同, 对于相同分析计算方法按图 3 序网络进行, 相应地给出图 5 情形计算公式。

3.1 一相接地短路

一相接地短路对图 2 是上行线或下行线接触网对地短路, 对图 4 是接触网或 AT 馈线对地短路。

设图 2 中 f 点 a 相接地短路, 短路电流 $\dot{I}_d = \dot{I}_a$, 边界条件是 $\dot{I}_b = 0$, $\dot{U}_{f-a} = 0$, 按式 (2) 转换成对称分量, 则电压有

$$\dot{U}_{f-a-0} + \dot{U}_{f-a-1} = 0, \quad (7)$$

电流

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a-0} \\ \dot{I}_{a-1} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \dot{I}_a \\ \frac{1}{2} \dot{I}_a \end{bmatrix},$$

则

$$\dot{I}_{a-0} = \dot{I}_{a-1} = \frac{1}{2} \dot{I}_a = \frac{1}{2} \dot{I}_d. \quad (8)$$

由图3序网络结合式(7)和式(8)边界条件形成复合序网如图6所示。图中虚线部分表示与牵引网短路阻抗计算无关。

从图6不难求得短路阻抗

从下式可推出几种特殊情况的计算公式:

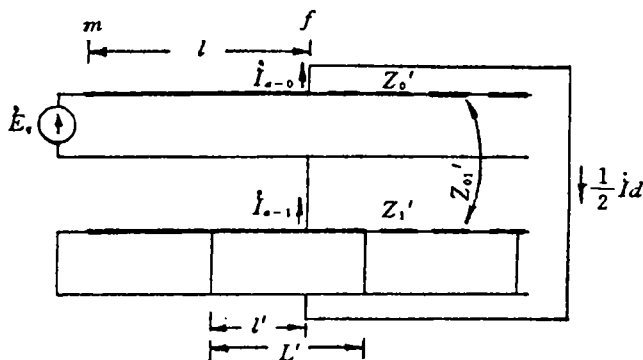


图6 一相接地短路复合序网

$$Z_q = \frac{\dot{E}_a}{\dot{I}_d} = \frac{1}{2} (Z'_0 - \frac{Z'^2_{01}}{Z'_1}) l + \frac{1}{2} \frac{(Z'_1 + Z'_{01})^2}{Z'_1} \frac{l'(L-l')}{L'}. \quad (9)$$

(1) 当牵引网中横连线无限多时, 则有 $l' \rightarrow 0$, $L' \rightarrow 0$, 则式(9)变成

$$Z_q = \frac{1}{2} (Z'_0 - \frac{Z'^2_{01}}{Z'_1}) l; \quad (9a)$$

(2) 当牵引网中仅末端有一条横连线时, 即有 $l' = l$, $L' = L$, 则式(9)变成

$$Z_q = \frac{1}{2} (Z'_0 - \frac{Z'^2_{01}}{Z'_1}) l + \frac{1}{2} \frac{(Z'_1 + Z'_{01})^2}{Z'_1} \frac{l(L-l)}{L}; \quad (9b)$$

(3) 当牵引网中无横连线时, 即有 $l' = l$, $L' \rightarrow \infty$, 则式(9)变成

$$Z_q = \frac{1}{2} (Z'_0 + Z'_1 + 2Z'_{01}) l. \quad (9c)$$

AT供电牵引网中AT与直接供电或BT供电牵引网中横连线对应, a 相接地短路时, 牵引网短路阻抗是式(9)中 Z'_0 以 Z'_1 代替, 同时 Z'_1 以 Z'_0 代替 (即 Z'_0 与 Z'_1 对换) 所得的计算公式。

3.2 两相短路

两相短路是图2中上、下行接触网短接, 或图4中接触网和AT馈线短接。图2中上、下行接触网短接实际上不可能发生, 若有这种情况的故障则相当于加了一条横连线, 因此, 不产生短路电流, 故牵引网短路阻抗为无穷大。

对于图4, 短路边界条件是 $\dot{U}_{f-a} = \dot{U}_{f-b}$, $\dot{I}_a = \dot{I}_b = -\dot{I}_c$, 按式(2)转换成序分量

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{f-a-0} \\ \dot{U}_{f-a-1} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{f-a} \\ \dot{U}_{f-b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{f-a} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{I}_d \end{bmatrix}. \quad (11)$$

由图 5 序网络结合式 (10)、(11) 的边界条件形成两相短路的复合序网如图 7 所示。

从图 7 求得牵引网短路阻抗

$$Z_q = \frac{\dot{E}_q}{\dot{I}_d} = (Z'_1 - \frac{Z'^2_{01}}{Z'_0})l + \frac{Z'^2_{01}}{Z'_0} \frac{l'(L' - l')}{L'}. \quad (12)$$

3.3 两相短路接地

3.3.1 直接供电或 BT 供电牵引网

短路边界条件是 $\dot{U}_{f-a} = \dot{U}_{f-b} = 0$, $\dot{I}_a + \dot{I}_b = \dot{I}_d$, 转换成序分量有

$$\dot{U}_{f-a-0} = \dot{U}_{f-a-1} = 0, \quad (13)$$

$$\dot{I}_{a-0} = \frac{1}{2} \dot{I}_d. \quad (14)$$

由图 3 序网络结合式 (13)、(14) 边界条件形成复合序网如图 8 所示。

从图 8 求得直接供电或 BT 供电牵引网两相短路接地时牵引网短路阻抗

$$Z_q = \frac{\dot{E}_q}{\dot{I}_d} = \frac{1}{2} (Z'_0 - \frac{Z'^2_{01}}{Z'_1})l. \quad (15)$$

3.3.2 AT 供电牵引网

短路边界条件 $\dot{U}_{f-a} = \dot{U}_{f-b} = 0$, 转换成序分量有

$$\dot{U}_{f-a-0} = \dot{U}_{f-a-1} = 0. \quad (16)$$

上式结合图 5 形成复合序网如图 9 所示。从图 9 中求得

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-Z'_{01}}{(Z'_0 Z'_1 - Z'^2_{01})l} \dot{E}_q \\ \frac{Z'_0}{(Z'_0 Z'_1 - Z'^2_{01})l} \dot{E}_q \end{bmatrix}. \quad (17)$$

(1) Y/△接线牵引变电所供电的牵引网

Y/△接线牵引变电所与 AT 牵引网相连的两个假设电势 $\dot{E}_q$ 和 $-\dot{E}_q$ 间公共点连着轨大地, 这两个电势是相互独立的, 因此, 两电势与短路点间转移阻抗分别计算。

将式 (17) 代入式 (1) 电流式得

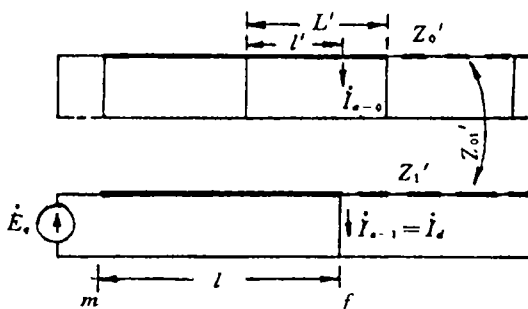


图 7 AT 供电牵引网两相短路复合序网

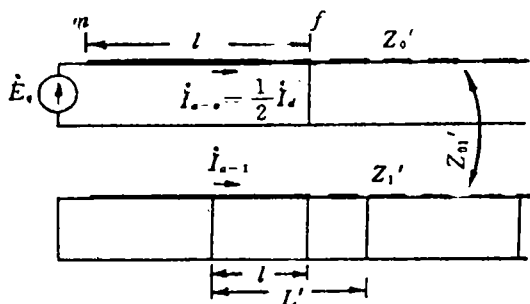


图 8 直接供电或 BT 供电牵引网两相短路接地复合序网

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{da} \\ \dot{I}_{db} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z'_0 - Z'_{01}}{(Z'_0 Z'_1 - Z'^2_{01})l} \dot{E}_q \\ \frac{Z'_0 + Z'_{01}}{(Z'_0 Z'_1 - Z'^2_{01})l} (-\dot{E}_q) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

由上式求得各相牵引网短路阻抗

$$\begin{bmatrix} Z_{qa} \\ Z_{qb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{E}_q}{\dot{I}_{da}} \\ -\frac{\dot{E}_q}{\dot{I}_{db}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z'_0 Z'_1 - Z'^2_{01}}{Z'_0 - Z'_{01}} l \\ \frac{Z'_0 Z'_1 - Z'^2_{01}}{Z'_0 + Z'_{01}} l \end{bmatrix}. \quad (19)$$

(2) SCOTT 接线牵引变电所供电的牵引网

SCOTT 接线牵引变电所与 AT 牵引网相连的两个假设电势 $\dot{E}_q$ 和 $-\dot{E}_q$ 实际上是一个电势 ($2\dot{E}_q$) 分开的, 其没有公共点连着轨大地, 它们不是独立的. 从图 9 可知, m 、 f 两点间, 0 序网中各处 $\dot{I}_{a0}$ 都相等, 1 序网中各处 $\dot{I}_{a1}$ 也都相等, 由式 (1) 得 a 相各处 $\dot{I}_{da}$

相等, b 相各处 $\dot{I}_{db}$ 相等, 而 m 点处必有 $\dot{I}_{ma} =$

$-\dot{I}_{mb}$ (电源 $2\dot{E}_q$ 两端电流关系), 所以短路点处也有 $\dot{I}_{da} = -\dot{I}_{db}$ ($=\dot{I}_{ma} = -\dot{I}_{mb}$). 但从式 (18) 可知 $\dot{I}_{da} \neq -\dot{I}_{db}$, 这与实际不符, 为此, 取式 (18) 求得的两相电流平均值作为实际短路电流, 即

$$\dot{I}_d = \frac{1}{2} (\dot{I}_{da} - \dot{I}_{db})$$

所以, 有牵引网短路阻抗

$$Z_q = \frac{\dot{E}_q}{\dot{I}_d} = \frac{\dot{E}_q}{\frac{1}{2} (\dot{I}_{da} - \dot{I}_{db})}$$

将式 (18) 中 $\dot{I}_{da}$ 和 $\dot{I}_{db}$ 代入上式并整理得

$$Z_q = (Z'_1 - \frac{Z'^2_{01}}{Z'_0})l. \quad (20)$$

从式 (15)、(19)、(20) 可知, 两相短路接地时牵引网短路阻抗与横连线 (或牵引网中 AT) 多少无关.

4 结束语

本文论述了牵引网广义两相系统短路阻抗的计算方式, 这种方法将广义两相不对称系统

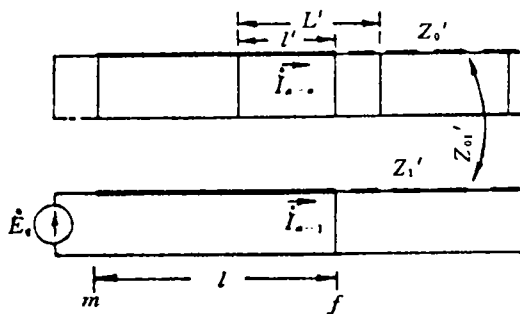


图 9 AT 供电牵引网两相短路接地复合序网

的牵引网当作具有不对称串联阻抗的网络,它不需将两相不对称参数处理成对称参数,因而,所得牵引网短路阻抗计算公式具有普遍意义,对于特例两相对称系统,则把 0 序和 1 序间互阻抗(即 Z'_{01})以零代入各公式而得相应的牵引网短路阻抗计算公式.某牵引网短路阻抗的具体计算依文中所得公式可藉助于计算机来完成.

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,1986,198~215
- [2] 铁道部电气化工程局电气化勘测设计院编. 牵引供电系统. 北京:中国铁道出版社,1988,59~64
- [3] 王凤华. 广义对称分量法及其应用. 西南交通大学学报,1981,16(4)
- [4] 安德逊 P. M.. 电力系统故障分析. 北京:电力工业出版社,1980,14~17

A Calculating Method of the Short—circuit Impedances on Generalized Two—phase Unsymmetrical Feeding System for Electric Traction

Wang Xun

Abstract Regarding the generalized two—phase unsymmetrical feeding system for electric traction as the network with the unsymmetrical series impedances, the sequence network connections are formed by using the method of two—phase symmetrical components, and the general formulae of the short—circuit impedances on the feeding system are derived.

Key words Feeding system for electric traction; Short—circuit impedances; Unsymmetrical series impedances; Generalized method of symmetrical components