

V/V 接线变电所 牵引侧复故障的一种分析计算

王 勋

(电气工程系)

摘 要

本文将电牵引供电系统中 V/V 接线变电所当作具有不对称串联阻抗的网络,运用三相对称分量法,分析计算 V/V 接线变电所牵引侧复故障,对该故障的分析指出和提供了一种新方法,而且概念清晰,步骤简单。

关键词: 短路计算; 不对称串联阻抗; 牵引变电所

0 引 言

电牵引供电系统中 V/V 接线变电所牵引侧复故障是异相牵引母线短路接地的三相短路,其分析计算十分复杂。文 [1] 中指出的两种分析计算方法是: (1) 把变电所一次侧 (即高压侧) 的三相系统用系统变换法变成与二次侧 (即低压侧, 或牵引侧) 相同系统, 直接计算出牵引侧短路电流; (2) 把短路点的边界条件用欧姆定律转换成变电所一次侧的边界条件, 再运用对称分量法, 求解联立方程组, 计算出短路电流。本文论述这种故障分析计算的第三种方法, 与前两种方法主要区别在于后者把牵引变电所三相不对称阻抗当作短路点与电力网络 (即变电所一次侧) 之间的不对称串联阻抗, 再运用三相对称分量法, 求解短路电流。它与前两种方法相比不仅能同样分析计算短路电流, 而且有很多方便之处。下面论述这种分析计算方法。

1 具有不对称串联阻抗网络的电压和电流序分量间的关系^②

为了运用三相对称分量法分析计算 V/V 接线变电所牵引侧复故障, 首先必须找出变电所这个具有不对称串联阻抗网络的各序电压和电流分量之间的关系, 图 1 为具有一般形式的一段不对称串联阻抗三相系统。

从图 1 写出 mn 段电压降方程:

本文于 1993 年 5 月 7 日收到

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{mn-a} \\ \dot{U}_{mn-b} \\ \dot{U}_{mn-c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

上式中电压降和电流用 a 相的对称分量表示, 则

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} \dot{U}_{mn-a-0} \\ \dot{U}_{mn-a-1} \\ \dot{U}_{mn-a-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \mathbf{A} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a-0} \\ \dot{I}_{a-1} \\ \dot{I}_{a-2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

由(2)式得到电压降的对称分量:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{mn-a-0} \\ \dot{U}_{mn-a-1} \\ \dot{U}_{mn-a-2} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} -Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \mathbf{A} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a-0} \\ \dot{I}_{a-1} \\ \dot{I}_{a-2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

式(3)给出了 mn 段不对称串联阻抗网络电压和电流对称分量之间的关系, 利用(3)式可进行包含 mn 段网络的电路的各种故障分析。

2 V/V 接线变电所单侧复故障分析计算

设 V/V 接线变电所接线方式如图 2(a), 其等效电路如图 2(b), 复故障等效电路如图 2(c)。图中两台单相变压器 B_1 和 B_2 的阻抗分别为 Z_{B1} ($Z_{B1} = R_{B1} - jX_{B1}$) 和 Z_{B2} ($Z_{B2} = R_{B2} - jX_{B2}$), 变压器前电力系统三序总阻抗分别为 $Z_{1\Sigma}$ ($Z_{1\Sigma} = R_{1\Sigma} - jX_{1\Sigma}$)、 $Z_{2\Sigma}$ ($Z_{2\Sigma} = R_{2\Sigma} - jX_{2\Sigma}$)、 $Z_{0\Sigma}$ ($Z_{0\Sigma} = R_{0\Sigma} - jX_{0\Sigma}$)。

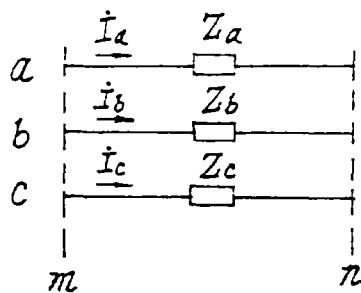


图 1 具有串联阻抗的三相系统

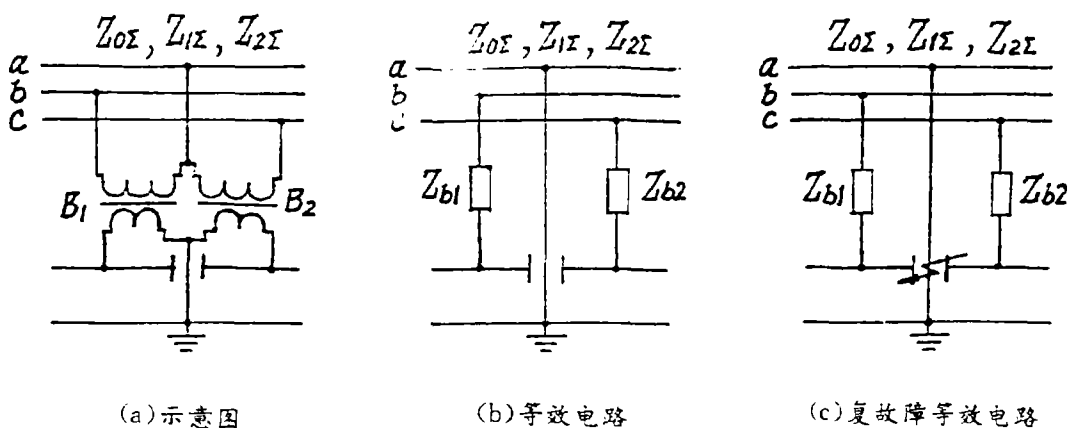


图2 V/V 接线变电所

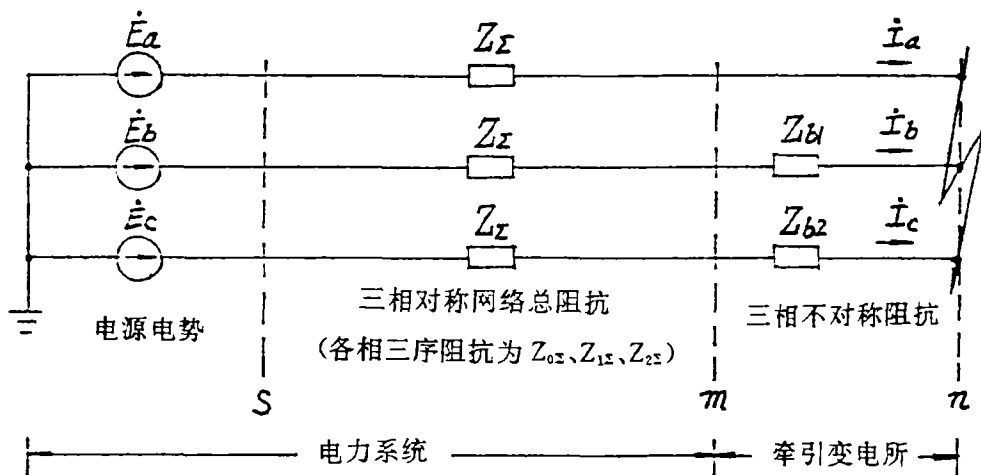


图3 V/V 接线变电所复故障

+jx_{0Σ}), 为分析方便设所有电气量均为标么值。图2(c)以图3形式示出。从图3中清楚地看出, sm段为三相对称网络, mn段为不对称网络, 而且是不对称串联阻抗网络。利用(3)式写出其在012系统中的电压和电流分量间的关系式, 即:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{m-a-0} \\ \dot{U}_{m-a-1} \\ \dot{U}_{m-a-2} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{b1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{b2} \end{bmatrix} \mathbf{A} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a-0} \\ \dot{I}_{a-1} \\ \dot{I}_{a-2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于图3的复故障, 有短路边界条件:

$$\dot{U}_{m-a} = \dot{U}_{m-b} = \dot{U}_{m-c} = 0$$

代入对称分量变换式

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{a-a-0} \\ \dot{U}_{a-a-1} \\ \dot{U}_{a-a-2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{a-a} \\ \dot{U}_{a-b} \\ \dot{U}_{a-c} \end{bmatrix}$$

得

$$\dot{U}_{a-a-0} = \dot{U}_{a-a-1} = \dot{U}_{a-a-2} = 0 \quad (5)$$

根据 012 对称分量电势方程有:

$$\dot{E}_{a-012} = \dot{U}_{sm-a-012} + \dot{U}_{mn-a-012} + \dot{U}_{n-a-012} \quad (6)$$

式中:

$\dot{E}_{a-012}$ —— a 相序等效电源电势列阵;

$\dot{U}_{sm-a-012}$ —— sm 段网络 a 相序电压降列阵;

$\dot{U}_{mn-a-012}$ —— mn 段网络 a 相序电压降列阵;

$\dot{U}_{n-a-012}$ —— n 点 a 相序电压列阵。

三相对称电路中, 电源电势:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_{a-0} \\ \dot{E}_{a-1} \\ \dot{E}_{a-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{E}_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

sm 段序电压降:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{sm-a-0} \\ \dot{U}_{sm-a-1} \\ \dot{U}_{sm-a-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{0\Sigma} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{1\Sigma} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{2\Sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a-0} \\ \dot{I}_{a-1} \\ \dot{I}_{a-2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

将(4)、(5)、(7)、(8)式代入(6)式得:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \dot{E}_a \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{0\Sigma} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{1\Sigma} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{2\Sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a-0} \\ \dot{I}_{a-1} \\ \dot{I}_{a-2} \end{bmatrix} + \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{b1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{b2} \end{bmatrix} \mathbf{A} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a-0} \\ \dot{I}_{a-1} \\ \dot{I}_{a-2} \end{bmatrix}$$

代入 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{A}^{-1}$ 并整理得:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\mathbf{E}}_a \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{0\Sigma} + \frac{1}{3}(Z_{b1} + Z_{b2}) & \frac{1}{3}(a^2 Z_{b1} + a Z_{b2}) & \frac{1}{3}(a Z_{b1} + a^2 Z_{b2}) \\ \frac{1}{3}(a Z_{b1} + a^2 Z_{b2}) & Z_{1\Sigma} + \frac{1}{3}(Z_{b1} + Z_{b2}) & \frac{1}{3}(a^2 Z_{b1} + a Z_{b2}) \\ \frac{1}{3}(a^2 Z_{b1} + a Z_{b2}) & \frac{1}{3}(a Z_{b1} + a^2 Z_{b2}) & Z_{2\Sigma} + \frac{1}{3}(Z_{b1} + Z_{b2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{a-0} \\ \dot{\mathbf{I}}_{a-1} \\ \dot{\mathbf{I}}_{a-2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据基尔霍夫电流定律,图3中短路点有电流关系:

$$\dot{\mathbf{I}}_a + \dot{\mathbf{I}}_b + \dot{\mathbf{I}}_c = 0$$

则 a 相零序电流分量:

$$\dot{\mathbf{I}}_{a-0} = \frac{1}{3}(\dot{\mathbf{I}}_a + \dot{\mathbf{I}}_b + \dot{\mathbf{I}}_c) = 0$$

因此(9)式又变成:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{E}}_a \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1\Sigma} + \frac{1}{3}(Z_{b1} + Z_{b2}) & \frac{1}{3}(a^2 Z_{b1} + a Z_{b2}) \\ \frac{1}{3}(a Z_{b1} + a^2 Z_{b2}) & Z_{2\Sigma} + \frac{1}{3}(Z_{b1} + Z_{b2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{a-1} \\ \dot{\mathbf{I}}_{a-2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

解上式并整理得:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{a-1} \\ \dot{\mathbf{I}}_{a-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{2\Sigma} + \frac{1}{3}(Z_{b1} + Z_{b2})}{\Delta} \dot{\mathbf{E}}_a \\ -\frac{\frac{1}{3}(a Z_{b1} + a^2 Z_{b2})}{\Delta} \dot{\mathbf{E}}_a \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中:

$$\Delta = [Z_{1\Sigma} + \frac{1}{3}(Z_{b1} + Z_{b2})][Z_{2\Sigma} + \frac{1}{3}(Z_{b1} + Z_{b2})] - \frac{1}{9}(Z_{b1}^2 + Z_{b2}^2 - Z_{b1}Z_{b2})$$

所以,短路电流为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_a \\ \dot{\mathbf{I}}_b \\ \dot{\mathbf{I}}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{a-0} \\ \dot{\mathbf{I}}_{a-1} \\ \dot{\mathbf{I}}_{a-2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{Z_{12} + \frac{1}{3}(Z_{b1} + Z_{b2})}{\Delta} E_a \\ -\frac{\frac{1}{3}(aZ_{b1} + a^2Z_{b2})}{\Delta} E_a \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{Z_{12} + \frac{1}{3}(1-a)Z_{b1} + \frac{1}{3}(1-a^2)Z_{b2}}{\Delta} E_a \\ \frac{a^2Z_{12} - \frac{1}{3}(a^2-1)Z_{b2}}{\Delta} E_a \\ \frac{aZ_{12} + \frac{1}{3}(a-1)Z_{b1}}{\Delta} E_a \end{bmatrix} \quad (12)
 \end{aligned}$$

上式为 V/V 接线变电所牵引侧母线发生复故障短路电流的一般计算式。若所有阻抗中忽略电阻仅用电抗表示,且两台单相变压器的电抗相等,即 $X_{b1} = X_{b2} = X_b$,则式(12)变为:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{j(X_{12} + X_b)}{\Delta} E_a \\ \frac{j[a^2X_{12} + \frac{1}{3}(a^2-1)X_b]}{\Delta} E_a \\ -\frac{j[aX_{12} - \frac{1}{3}(a-1)X_b]}{\Delta} E_a \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:

$$\Delta = (X_{12} + \frac{2}{3}X_b)(X_{12} + \frac{2}{3}X_b) - \frac{1}{9}X_b^2$$

从(13)式得到最大短路电流 $|\dot{I}_a|$ 及其它两相 $|\dot{I}_b|$ 、 $|\dot{I}_c|$,且 $|\dot{I}_b| = |\dot{I}_c|$,其形式与文[1]中一致,这里不再叙述。

上述分析计算了变电所牵引侧复故障情形,若复故障发生在牵引网中,利用上述方法同样方便。其计算方法一,在图3中 n 点再串接牵引网阻抗, a 相串接阻抗为0, b 相为 Z_{n1} , c 相为 Z_{n2} ,把牵引网三相阻抗构成的网络亦作为不对称串联阻抗网络,计算方法与前面论述的内容相同;方法二,也是简便的方法,把牵引网与变电所结合起来作为不对称串联阻抗网络,因此,图3中 Z_{b1} 以 $Z_{b1} = Z_{b1} + Z_{n1}$ 代替, Z_{b2} 以 $Z_{b2} = Z_{b2} + Z_{n2}$ 代替,则图3为分析牵引网复故障的电路图,而式(12)也相应代替,其为牵引网复故障的计算结果。

3 结束语

从上述分析过程清楚地看出,把 V/V 接线变电所和牵引网作为三相不对称串联阻抗的网络,有效地进行了复故障分析计算。值得指出这种方法可以应用于牵引供电系统中其它形式的故障分析,而且由于使用三相对称分量,因而更适用于对系统的计算机辅助分析。

作者在写作本文过程中得到刘润田教授和林秀涛副教授的指导,借此深表谢意。

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,1986:186~188
- [2] W. D. Stevenson. Elements of power system analysis. New York:ord:Mcgraw-Hill, 1975:315~317

Analysis of Three—Phase Fault on the Tractive Side of V/V Connection Railway Traction Substation

Wang Xun

ABSTRACT

This paper regards the V/V connection railway traction substation in the tractive power supply system as the network with unsymmetrical series impedances, analyses three—phase fault on the substation using the method of symmetrical components. The new analysis is indicated and supplied for this fault. And the concept is clear. The steps are simple.

Key words: Fault calculation; Unsymmetrical series impedances; Traction substation