

DOI: 10.7667/PSPC151281

计及阻抗匹配平衡牵引变压器的电网短路计算方法

陈博¹, 邱建², 曾耿晖², 李一泉², 罗深增¹, 石东源¹

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 华中科技大学, 湖北 武汉 430074;
2. 广东电网公司电力调度控制中心, 广东 广州 510620)

摘要: 深入分析了阻抗匹配平衡牵引变压器的接线形式, 分别提出了基于对称分量法的计及阻抗匹配平衡牵引变压器的电网短路计算方法以及基于相分量法的短路计算方法。给出了各种类型的故障计算公式。并将两种方法相比较, 结合算例验证了方法的正确性和实用性。与基于相分量法的短路计算方法相比, 基于对称分量法的短路计算方法更容易与现有普遍应用的基于对称分量法的电力系统故障计算程序相结合, 只需在程序中添加相应的短路计算模块即可对阻抗匹配平衡牵引变压器短路故障进行计算。利用所提基于对称分量法的计算方法开发的软件包已用于实际工程。

关键词: 电气化铁路; 阻抗匹配平衡牵引变压器; 短路计算; 对称分量; 相分量

Short-circuit calculation methods for the grid considering impedance-matching balance traction transformers

CHEN Bo¹, QIU Jian², ZENG Genghui², LI Yiquan², LUO Shenzeng¹, SHI Dongyuan¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Dispatching and Control Center of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510620, China)

Abstract: By analyzing in-depth the connection mode of the impedance-matching balance traction transformer, two practical methods respectively based on symmetrical component and phase component are proposed to calculate the short-circuit current of power grid when short occurs in the secondary side of the transformer. And the formulas for a variety of fault types are given. The comparison of two methods is also proposed. An example using actual grid is given to prove the accuracy and practicability of the two methods. The method based on symmetrical component can be adopted in nowadays calculation programs widely applying in power system based on symmetrical component more conveniently than the method based on phase component and the calculation programs can calculate the short current rapidly by adding special module using symmetrical component when short occurs in the secondary side of the transformer. A software package based on symmetrical component has been applied in the actual project.

Key words: electrified railways; impedance-matching balance traction transformers; short-circuit calculation; symmetrical component method; phase component

0 引言

根据 2008 年调整的《中国长期铁路网规划》, 到 2020 年, 我国铁路的电化率将达到 60%以上。电气化铁路的发展对铁路供电设备的保护提出了更高的要求。目前, 已有单相牵引变压器、V/V 牵引变压器、阻抗匹配牵引变压器等不同接线方式的牵引变压器在我国得到了广泛的应用。其中, 阻抗匹配平衡牵引变压器是我国研制出的一种牵引变压器^[1],

已在沪昆线等铁路线路中得到广泛应用。

牵引变压器的接入会给电力系统特别是电力系统的继电保护工作带来了一定的影响^[2-4]。正确地进行故障分析又是继电保护工作的基础, 正确地进行故障分析又是继电保护工作的基础, 对此已有一些文献进行了相应的研究^[5-7]。对于阻抗匹配平衡牵引变压器, 文献[8]利用相分量法讨论了低压侧各种类型短路故障下低压侧的短路电流, 但电网的整定计算工作显然更关心高压侧的短路电流。目前的短路计

算软件大多基于对称分量法, 尚没有文献对对称分量坐标下计及阻抗匹配平衡变压器的电网短路计算进行研究。

文献[9-11]根据阻抗匹配平衡牵引变压器的结构对其性质进行了深入的分析, 其一些结论可以直接用于含阻抗匹配平衡变压器的牵引供电系统以及电网分析与计算。本文在上述文献的基础上, 分析了阻抗匹配平衡变压器的接线形式, 然后分别推导了根据对称分量法以及相分量法计算变压器低压侧发生各种类型短路故障时的短路电流的方法, 结合算例验证了两种方法的正确性。其中基于对称分量法的短路计算方法可以更方便的应用于现行的基于对称分量法的电力系统短路计算程序, 只需在程序中根据阻抗匹配平衡牵引变压器的模型即可与原有的对称三相系统一起应用对称分量法进行短路计算。

1 阻抗匹配平衡变压器的数学模型

如图 1 所示为阻抗匹配平衡变压器的接线图, 其中绕组 1 与绕组 2、3、4 耦合, 绕组 5 与绕组 6 耦合, 绕组 7 与绕组 8 耦合。各个绕组的匝数如图所示。高压侧由电网三相供电, 低压侧由 α 与 β 两个供电臂向牵引负荷供电, Z_α 与 Z_β 分别表示 α 相与 β 相牵引负荷的等效阻抗。

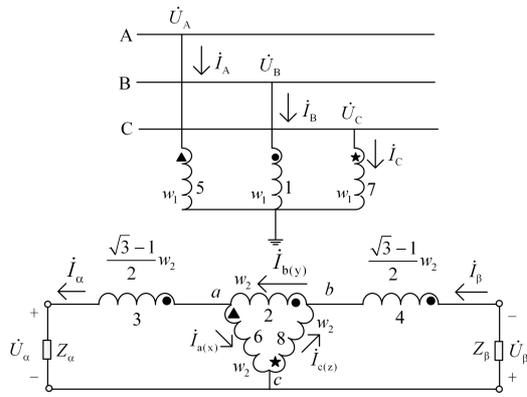


图 1 阻抗匹配平衡牵引变压器的接线图

Fig. 1 Connection diagram of impedance-matching balance traction transformer

该变压器运行时应该满足以下主要条件:

- (1) 一次侧施加三相对称电压, 二次侧两个供电臂连接的牵引负荷相等, 则 α 、 β 相电压相差 90° 。
- (2) 一次侧中性点接地运行时, 中性点不产生零序电流。

(3) 低压侧两端口互相解耦, 互阻抗为零。

为了满足条件(1), 应该使变压器的匝数满足图 1 所示的关系; 为了满足条件(2)、(3), 变压器还应

该满足文献[11]中的阻抗匹配关系。变压器满足条件(1)、(2)、(3)后, 高低压侧电压及电流满足以下关系, 如式(1)~式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{k} \begin{bmatrix} \frac{3+\sqrt{3}}{6} & -\frac{3-\sqrt{3}}{6} \\ -\frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \\ -\frac{3-\sqrt{3}}{6} & \frac{3+\sqrt{3}}{6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{\alpha 0} \\ \dot{U}_{\beta 0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z & 0 \\ 0 & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\alpha 0} \\ \dot{U}_{\beta 0} \end{bmatrix} = \frac{1}{k} \begin{bmatrix} \frac{3+\sqrt{3}}{6} & -\frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{3-\sqrt{3}}{6} \\ -\frac{3-\sqrt{3}}{6} & -\frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{3+\sqrt{3}}{6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 $k = w_1 / w_2$, $Z = Z_T / k^2$, 其中 Z_T 为变压器低压侧 α 、 β 相接地短路后高压侧的短路阻抗。由于高压侧中性点始终没有零序电流, 下式成立:

$$\dot{i}_A + \dot{i}_B + \dot{i}_C = 0 \quad (4)$$

以上为阻抗匹配平衡变压器满足的基本方程。

下面根据这些方程, 利用对称分量法以及相分量法计算牵引变低压侧短路时的短路电流。

2 基于对称分量法的短路计算

在进行故障计算时忽略负荷的影响, 由于变压器的激磁电抗很大, 且由上一章可知, 阻抗匹配平衡牵引变压器不存在零序通路, 因此在牵引变供电线路上发生各种类型的短路故障时, 线路的牵引变一侧视为开路, 因此可看成空充线路短路, 与三相对称系统短路情况一致, 可直接对称分量法进行计算。因此本文重点分析牵引变低压侧发生短路故障的情况。

由于牵引变供电线路属于终端线路, 所以可以将牵引变接入牵引变供电线路的点看成是边界节点, 将电网侧视为非故障部分, 将整个牵引供电系统视为故障部分, 求出边界节点处的电压电流关系。

联立方程(1)~(4), 可以得出边界节点处的电压电流关系, 如方程(5)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{AA} & Y_{AB} & Y_{AC} \\ Y_{BA} & Y_{BB} & Y_{BC} \\ Y_{CA} & Y_{CB} & Y_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned}
 Y_{AA} &= \frac{2+\sqrt{3}}{6}Y_1 + \frac{2-\sqrt{3}}{6}Y_2 \\
 Y_{BB} &= \frac{1}{3}Y_1 + \frac{1}{3}Y_2 \\
 Y_{CC} &= \frac{2-\sqrt{3}}{6}Y_1 + \frac{2+\sqrt{3}}{6}Y_2 \\
 Y_{AB} &= Y_{BA} = -\frac{1+\sqrt{3}}{6}Y_1 + \frac{\sqrt{3}-1}{6}Y_2 \\
 Y_{AC} &= Y_{CA} = -\frac{1}{6}Y_1 - \frac{1}{6}Y_2 \\
 Y_{BC} &= Y_{CB} = \frac{\sqrt{3}-1}{6}Y_1 - \frac{\sqrt{3}+1}{6}Y_2 \\
 Y_1 &= \frac{1}{Z_T + Z_\alpha} \\
 Y_2 &= \frac{1}{Z_T + Z_\beta}
 \end{aligned}$$

根据故障类型给 Z_α 与 Z_β 赋不同的值可模拟变压器各种不同类型的短路故障。利用相-序变换将其变为对称分量下的电压电流关系, 与非故障处的网络方程(6)联立^[12], 解得短路电流, 再进一步求得电网任一位置的短路电流与电压。其中下文中 $a=1\angle 120^\circ$, \dot{U}_{f1} 、 \dot{U}_{f2} 、 \dot{U}_{f0} 分别为边界节点处的正、负、零序电压, i_{f1} 、 i_{f2} 、 i_{f0} 分别为故障电流的正、负、零序分量, Z_{ff1} 、 Z_{ff2} 、 Z_{ff0} 分别为从边界节点即牵引变接入电网点看进去的正、负、零序阻抗, $\dot{U}_f^{(0)}$ 为故障之前故障点的电压。

$$\begin{cases} \dot{U}_{f1} = \dot{U}_f^{(0)} - Z_{ff1}i_{f1} \\ \dot{U}_{f2} = -Z_{ff2}i_{f2} \\ \dot{U}_{f0} = -Z_{ff0}i_{f0} \end{cases} \quad (6)$$

2.1 α 相短路

当 α 相短路时, $Z_\alpha = 0$ 、 $Z_\beta \rightarrow \infty$, 此时 $Y_1 = 1/Z_T$, $Y_2 = 0$, 得到以下方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{6Z_T} \begin{bmatrix} 2+\sqrt{3} & -\sqrt{3}-1 & -1 \\ -\sqrt{3}-1 & 2 & \sqrt{3}-1 \\ -1 & \sqrt{3}-1 & 2-\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (7)$$

以A相为基准相, 经相序变换可得到方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{f1} \\ \dot{I}_{f2} \\ \dot{I}_{f0} \end{bmatrix} = \frac{1}{6Z_T} \begin{bmatrix} 3 & \sqrt{3}(1-a) & 0 \\ \sqrt{3}(1-a^2) & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{f1} \\ \dot{U}_{f2} \\ \dot{U}_{f0} \end{bmatrix} \quad (8)$$

将方程(7)与方程(8)联立, 可以得到正、负、零序电流如下所示。

$$\begin{cases} \dot{I}_{f1} = \frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_T + Z_{ff1} + Z_{ff2}} \\ \dot{I}_{f2} = \frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_T + Z_{ff1} + Z_{ff2}} \angle 30^\circ \\ \dot{I}_{f0} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

进一步求得 ABC 三相的电流为

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{f1} + \dot{I}_{f2} = \frac{1.932\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_T + Z_{ff1} + Z_{ff2}} \angle 15^\circ \\ \dot{I}_B = a^2\dot{I}_{f1} + a\dot{I}_{f2} = \frac{1.414\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_T + Z_{ff1} + Z_{ff2}} \angle -165^\circ \\ \dot{I}_C = a\dot{I}_{f1} + a^2\dot{I}_{f2} = \frac{0.518\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_T + Z_{ff1} + Z_{ff2}} \angle -165^\circ \end{cases} \quad (10)$$

2.2 β 相短路

当 β 相短路时, $Z_\beta = 0$ 、 $Z_\alpha \rightarrow \infty$, 此时, $Y_1 = 0$, $Y_2 = 1/Z_T$, 得到以下方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{6Z_T} \begin{bmatrix} 2-\sqrt{3} & \sqrt{3}-1 & -1 \\ \sqrt{3}-1 & 2 & -\sqrt{3}-1 \\ -1 & -\sqrt{3}-1 & 2+\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (11)$$

以A相为基准相, 经相序变换可得方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{f1} \\ \dot{I}_{f2} \\ \dot{I}_{f0} \end{bmatrix} = \frac{1}{6Z_T} \begin{bmatrix} 3 & -\sqrt{3}(1-a) & 0 \\ -\sqrt{3}(1-a^2) & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{f1} \\ \dot{U}_{f2} \\ \dot{U}_{f0} \end{bmatrix} \quad (12)$$

可以得到正、负、零序电流如下所示:

$$\begin{cases} \dot{I}_{f1} = \frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_T + Z_{ff1} + Z_{ff2}} \\ \dot{I}_{f2} = \frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_T + Z_{ff1} + Z_{ff2}} \angle -150^\circ \\ \dot{I}_{f0} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

进一步求得 ABC 三相电流为

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{f1} + \dot{I}_{f2} = \frac{0.518\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_T + Z_{ff1} + Z_{ff2}} \\ \dot{I}_B = a^2\dot{I}_{f1} + a\dot{I}_{f2} = \frac{1.414\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_T + Z_{ff1} + Z_{ff2}} \angle -75^\circ \\ \dot{I}_C = a\dot{I}_{f1} + a^2\dot{I}_{f2} = \frac{1.932\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_T + Z_{ff1} + Z_{ff2}} \angle 105^\circ \end{cases} \quad (14)$$

2.3 α、β接地短路

当α、β相接地短路时， $Z_\alpha = Z_\beta = 0$ ，此时 $Y_1 = Y_2 = 1/Z_T$ ，得到以下方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3Z_T} & -\frac{1}{3Z_T} & -\frac{1}{3Z_T} \\ -\frac{1}{3Z_T} & \frac{2}{3Z_T} & -\frac{1}{3Z_T} \\ -\frac{1}{3Z_T} & -\frac{1}{3Z_T} & \frac{2}{3Z_T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (15)$$

以A相为基准相，经相序变换可得方程如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{f1} \\ \dot{i}_{f2} \\ \dot{i}_{f0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_T} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_T} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{f1} \\ \dot{U}_{f2} \\ \dot{U}_{f0} \end{bmatrix} \quad (16)$$

可以得到正、负、零序电流如下所示：

$$\begin{cases} \dot{i}_{f1} = \frac{\dot{U}_f^{(0)}}{Z_T + Z_{f1}} \\ \dot{i}_{f2} = \dot{i}_{f0} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

ABC相的电流分别为

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \frac{\dot{U}_f^{(0)}}{Z_{f1} + Z_T} \\ \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_f^{(0)}}{Z_{f1} + Z_T} \angle -120^\circ \\ \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_f^{(0)}}{Z_{f1} + Z_T} \angle 120^\circ \end{cases} \quad (18)$$

2.4 α、β相间短路

此时 Z_α 与 Z_β 的值并不能直接看出，此时 $\dot{I}_\alpha = \dot{I}_\beta$ ， $\dot{U}_\alpha + \dot{U}_\beta = 0$ ，与方程(1)~(4)联立可以得到：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{6Z_T} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (19)$$

以A相为基准相，变为对称分量坐标下的形式：

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{f1} \\ \dot{i}_{f2} \\ \dot{i}_{f0} \end{bmatrix} = \frac{1}{2Z_T} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & 0 \\ a & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{f1} \\ \dot{U}_{f2} \\ \dot{U}_{f0} \end{bmatrix} \quad (20)$$

可以得到正、负、零序电流如下所示：

$$\begin{cases} \dot{i}_{f1} = \frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_T + Z_{f1} + Z_{f2}} \\ \dot{i}_{f2} = \frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_T + Z_{f1} + Z_{f2}} \angle 120^\circ \\ \dot{i}_{f0} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

求得ABC三相电流为

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{i}_{f1} + \dot{i}_{f2} = \frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_T + Z_{f1} + Z_{f2}} \angle 60^\circ \\ \dot{I}_B = a^2 \dot{i}_{f1} + a \dot{i}_{f2} = \frac{2\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_T + Z_{f1} + Z_{f2}} \angle -120^\circ \\ \dot{I}_C = a \dot{i}_{f1} + a^2 \dot{i}_{f2} = \frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_T + Z_{f1} + Z_{f2}} \angle 60^\circ \end{cases} \quad (22)$$

3 基于相量法的短路计算

文献[9]给出了阻抗匹配平衡牵引变压器的三相变两相等效电路，并利用此电路求解牵引变低压侧短路时的高压侧短路电流的大小，但并未考虑短路电流的相位。下面利用文献[9]中的三相变两相等效电路再结合公式(1)所示的高低电压侧电流变换关系来求解。

变压器三相变两相等效电路如图2所示，两相系统的阻抗 Z 是将绕组一次侧阻抗归算到二次侧后再将其与二次侧的阻抗相叠加，再按照网络的适当等效及简化而来。计及系统电源至变压器高压母线的系统等效阻抗 Z_s ，则 $Z = (Z_s + Z_T) / k^2$ 。

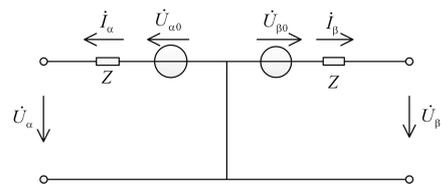


图2 三相变两相的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the two phases from three phases

如图3所示为相量法的故障计算模型，其中 \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 分别为系统侧A、B、C三相等值

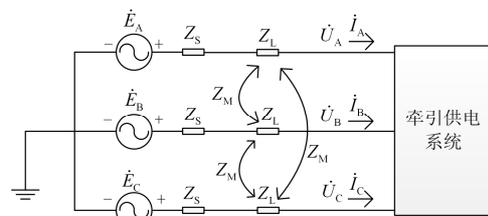


图3 相量法模型

Fig. 3 Model of phase components method

电源电压, Z_S 为系统等值阻抗, Z_L 与 Z_M 分别为牵引变压器供电线路的自阻抗及互阻抗。

牵引变压器的接入点满足方程(23)。

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E}_A \\ \dot{E}_B \\ \dot{E}_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_L + Z_S & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_L + Z_S & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_L + Z_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{bmatrix} \quad (23)$$

式(23)可变为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E}_A \\ \dot{E}_B \\ \dot{E}_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{L1} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{L1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{L1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_M & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E}_A \\ \dot{E}_B \\ \dot{E}_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{L1} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{L1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{L1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_M \\ Z_M \\ Z_M \end{bmatrix}$$

$$3\dot{i}_0 = \begin{bmatrix} \dot{E}_A \\ \dot{E}_B \\ \dot{E}_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{L1} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{L1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{L1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{bmatrix} \quad (24)$$

其中: $Z_{L1} = Z_S + Z_L - Z_M$, 则图 2 中的 Z 的值为 $(Z_S + Z_L - Z_M + Z_T) / k^2$ 。图 3 中的 \dot{U}_α 、 \dot{U}_β 可由式(3)求出, 只是将 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 换成系统电源的值 \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 。由于 \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 三相对称, 故有

$$\begin{cases} \dot{U}_{\alpha 0} = \frac{\sqrt{6}}{2k} \dot{E}_A \angle 15^\circ \\ \dot{U}_{\beta 0} = \frac{\sqrt{6}}{2k} \dot{E}_A \angle 105^\circ \end{cases} \quad (25)$$

可以直接根据三相一两相等效电路求出牵引变低电压侧发生各种类型短路故障时低电压侧的短路电流 \dot{i}_α 、 \dot{i}_β , 再根据式(1)求得高压侧 A、B、C 三相的电流。

3.1 α 相短路

α 相发生接地短路时

$$\begin{cases} \dot{i}_\alpha = \frac{\sqrt{6}k\dot{E}_A}{2(Z_S + Z_L - Z_M + Z_T)} \angle 15^\circ \\ \dot{i}_\beta = 0 \end{cases} \quad (26)$$

利用式(1)可得到高压侧的电流为

$$\begin{cases} \dot{i}_A = \frac{0.966\dot{E}_A}{Z_S + Z_L - Z_M + Z_T} \angle 15^\circ \\ \dot{i}_B = \frac{0.707\dot{E}_A}{Z_S + Z_L - Z_M + Z_T} \angle -165^\circ \\ \dot{i}_C = \frac{0.259\dot{E}_A}{Z_S + Z_L - Z_M + Z_T} \angle -165^\circ \end{cases} \quad (27)$$

3.2 β 相短路

β 相发生接地短路时:

$$\begin{cases} \dot{i}_\alpha = 0 \\ \dot{i}_\beta = \frac{\sqrt{6}k\dot{E}_A}{2(Z_S + Z_L - Z_M + Z_T)} \angle 105^\circ \end{cases} \quad (28)$$

利用式(1)可得到高压侧的电流为

$$\begin{cases} \dot{i}_A = \frac{0.259\dot{E}_A}{Z_S + Z_L - Z_M + Z_T} \angle -75^\circ \\ \dot{i}_B = \frac{0.707\dot{E}_A}{Z_S + Z_L - Z_M + Z_T} \angle -75^\circ \\ \dot{i}_C = \frac{0.966\dot{E}_A}{Z_S + Z_L - Z_M + Z_T} \angle 105^\circ \end{cases} \quad (29)$$

3.3 α 、 β 相接地短路

α 、 β 相发生接地短路时有

$$\begin{cases} \dot{i}_\alpha = \frac{\sqrt{6}k\dot{E}_A}{2(Z_S + Z_L - Z_M + Z_T)} \angle 15^\circ \\ \dot{i}_\beta = \frac{\sqrt{6}k\dot{E}_A}{2(Z_S + Z_L - Z_M + Z_T)} \angle 105^\circ \end{cases} \quad (30)$$

利用式(1)可得到高压侧的电流为

$$\begin{cases} \dot{i}_A = \frac{\dot{E}_A}{Z_S + Z_L - Z_M + Z_T} \\ \dot{i}_B = \frac{\dot{E}_A}{Z_S + Z_L - Z_M + Z_T} \angle -120^\circ \\ \dot{i}_C = \frac{\dot{E}_A}{Z_S + Z_L - Z_M + Z_T} \angle 120^\circ \end{cases} \quad (31)$$

3.4 α 、 β 相间短路

α 、 β 相发生相间短路时有 $\dot{i}_\alpha = \dot{i}_\beta$ 、 $\dot{U}_\alpha + \dot{U}_\beta = 0$,

可得到 \dot{i}_α 与 \dot{i}_β 分别为

$$\begin{cases} \dot{i}_\alpha = \frac{\sqrt{3}k\dot{E}_A}{2(Z_S + Z_L - Z_M + Z_T)} \angle -30^\circ \\ \dot{i}_\beta = \frac{\sqrt{3}k\dot{E}_A}{2(Z_S + Z_L - Z_M + Z_T)} \angle 150^\circ \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} \dot{i}_A = \frac{0.5\dot{E}_A}{Z_S + Z_L - Z_M + Z_T} \angle 60^\circ \\ \dot{i}_B = \frac{\dot{E}_A}{Z_S + Z_L - Z_M + Z_T} \angle -120^\circ \\ \dot{i}_C = \frac{0.5\dot{E}_A}{Z_S + Z_L - Z_M + Z_T} \angle 60^\circ \end{cases} \quad (33)$$

4 对比分析

上文的对称分量法将牵引变压器与牵引变供电线路的连接点看成边界节点，推导出连接点处对称分量坐标下的电压电流方程，再进一步求得正、负、零序分量；相分量法利用牵引变压器的高低压侧的电压电流关系直接计算牵引变低压侧发生短路故障时变压器高压侧的短路电流。

对于对称分量法， $Z_{ff1} = Z_{ff2} = Z_S + Z_L - Z_M$ 。由于是以 A 相为特殊相，故 $\dot{U}_f^{(0)} = \dot{E}_A$ ，所以式(10)可以写成：

$$\begin{cases} \dot{i}_A = \frac{0.966\dot{E}_A}{Z_S + Z_L - Z_M + Z_T} \angle 15^\circ \\ \dot{i}_B = \frac{0.707\dot{E}_A}{Z_S + Z_L - Z_M + Z_T} \angle -165^\circ \\ \dot{i}_C = \frac{0.259\dot{E}_A}{Z_S + Z_L - Z_M + Z_T} \angle -165^\circ \end{cases} \quad (34)$$

与式(27)形式相同。再比较其他几组公式，也可验证对称分量法的计算结果与相分量法完全相同。

现有的电网短路计算和继电保护整定计算软件中，对于短路故障的计算一般都是采用对称分量法。如果对于新加入的阻抗匹配平衡牵引变压器采用相分量法进行计算，则需要将三相对称系统等值到牵引变与牵引变供电线路的连接点，应用相分量法进行牵引变部分的短路电流计算后，再反推计算电网中的短路电流分布，计算过程复杂。而应用本文推导的基于对称分量法的短路计算方法，则只需在现有程序中根据阻抗匹配平衡牵引变压器的模型及具体的故障点位置，将其转换为用对称分量表示的不对称故障边界条件，即可与原有的对称三相系统一起应用对称分量法开展短路计算，显然是在现有普遍应用的基于对称分量法的电力系统故障计算程序中实现对阻抗匹配平衡变压器的短路计算的更简洁通用的方法。

5 算例

在如图 4 所示的简单电网中，分别利用本文提出的相分量法以及对称分量法对阻抗匹配平衡牵引变压器的低压侧各种故障情况下的短路电流进行计算。



图 4 简单电网示意图

Fig. 4 Diagram of simple grid

牵引变为阻抗匹配平衡变压器。牵引变型号：SF5/QY-20000/110；额定容量：20MVA；额定电压 110/27.5kV；短路阻抗：8.98%。系统等值电势标幺值： $\dot{E}_A = 1 \angle 0^\circ$ ，阻抗的标幺值： $Z_S = j0.2$ ；牵引变供电线路的正、负、零序阻抗的标幺值分别为： $Z_{L1} = Z_{L2} = 0.0086 + j0.0276$ 、 $Z_{L0} = 0.0258 + j0.0828$ （系统阻抗与线路阻抗均以 100 MVA 为基准）。应用两种方法计算得到的三相电流如表 1 所示。

表 1 两种计算方法结果的比较

Table 1 Comparison of two calculation methods

		相分量 (标幺值)	对称分量 (标幺值)
α相短路	\dot{i}_A	1.428 $\angle -74.27^\circ$	1.428 $\angle -74.24^\circ$
	\dot{i}_B	1.045 $\angle 105.73^\circ$	1.045 $\angle 105.73^\circ$
	\dot{i}_C	0.383 $\angle 105.73^\circ$	0.383 $\angle 105.74^\circ$
β相短路	\dot{i}_A	0.383 $\angle -164.26^\circ$	0.383 $\angle -164.27^\circ$
	\dot{i}_B	1.045 $\angle -164.27^\circ$	1.045 $\angle -164.24^\circ$
	\dot{i}_C	1.428 $\angle 15.73^\circ$	1.427 $\angle 15.74^\circ$
α、β相接地短路	\dot{i}_A	1.478 $\angle -89.27^\circ$	1.476 $\angle -89.27^\circ$
	\dot{i}_B	1.478 $\angle 150.72^\circ$	1.476 $\angle 150.73^\circ$
	\dot{i}_C	1.478 $\angle 30.73^\circ$	1.476 $\angle 30.73^\circ$
α、β相间短路	\dot{i}_A	0.739 $\angle -29.27^\circ$	0.739 $\angle -29.27^\circ$
	\dot{i}_B	1.478 $\angle 150.75^\circ$	1.478 $\angle 150.74^\circ$
	\dot{i}_C	0.739 $\angle -29.27^\circ$	0.739 $\angle -29.27^\circ$

由表 1 可以看出，忽略由计算带来的误差，采用对称分量法与采用相分量法的计算结果完全一致，与本文理论分析的结果相同。

6 结论

本文分别利用对称分量法以及相分量法对阻抗匹配平衡牵引变压器的低压侧短路时的短路电流计算方法进行了详细地推导，比较了两种方法用程序在现有短路计算程序中实现的难易程度，并利用算例验证了本文的结论。其中基于对称分量法的短路计算方法能更方便的应用于现有的短路计算程序中，根据本文结论开发出的程序包已经成功应用到了电网短路计算和继电保护整定计算软件中。

参考文献

[1] 周书亮, 代斌, 周腊吾, 等. 阻抗匹配平衡牵引变压器的阻抗计算[J]. 变压器, 2014, 51(8): 1-4.
ZHOU Shuliang, DAI Bin, ZHOU Lawu, et al. Calculation of impedance for impedance-matching balance traction transformer[J]. Transformer, 2014, 51(8): 1-4.

[2] 周末, 王果, 常文寰, 等. 适于电气化铁路的三相两臂

- 混合有源补偿研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 100-104.
- ZHOU Mo, WANG Guo, CHANG Wenhuan, et al. Study on hybrid active compensation based on three-phase two-leg inverter for electrification railway, 2015, 43(13): 100-104.
- [3] 何建宗, 徐晓春, 曾子县, 等. 一种适用于两相式输电线路的相组合差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 21-26.
- HE Jianzong, XU Xiaochun, ZENG Zixian, et al. A new phase combined line current differential relay for two-phase transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 21-26.
- [4] 刘淼, 石东源, 杨雄平. 计及电气化铁路两相交流供电系统不对称性的输电网实用故障计算方法比较研究[J]. 继电器, 2007, 35(8): 21-26.
- LIU Miao, SHI Dongyuan, YANG Xiongping. Comparison of fault calculation methods for transmission network considering unsymmetrical two-phase railway power supply system[J]. Relay, 2007, 35(8): 21-26.
- [5] 吴奎忠, 王建勋, 马丽红, 等. 基于序分量法的 V/V 接线牵引变压器实用快速短路计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 61-65.
- WU Kuizhong, WANG Jianxun, MA Lihong, et al. Fast practical short-circuit current calculation method based on sequence component in V/V structure traction transformer for electrified railway[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 61-65.
- [6] 王敬军, 张予鄂, 刘华, 等. 基于分相法的牵引供电系统等值阻抗分析及对距离保护的校核[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 141-144, 148.
- WANG Jingjun, ZHANG Yué, LIU Hua, et al. Analysis on the equivalent impedances based on respective phase method in traction power supply system for electrified railway and the check back for line distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 141-144, 148.
- [7] 肖乐军, 江荣汉, 刘福生, 等. 阻抗匹配平衡牵引变压器供电系统的短路分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 1995, 7(4): 19-25.
- XIAO Leijun, JIANG Ronghan, LIU Fusheng, et al. Short-circuit analysis for traction power supply system with impedance matching balance transformers[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1995, 7(4): 19-25.
- [8] 张志文, 刘福生, 熊芝耀, 等. 阻抗匹配平衡牵引变压器的电量变换和运行计算[J]. 电工技术学报, 2000, 15(2): 6-11.
- ZHANG Zhiwen, LIU Fusheng, XIONG Zhiyao, et al. Electrical transformations and operating calculations on the impedance-matching balance transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(2): 6-11.
- [9] 陆家榆, 陈莉, 丁青青, 等. YN/V 联结平衡变压器运行特性的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(5): 345-349.
- LU Jiayu, CHEN Li, DING Qingqing, et al. The mathematical model of operating characteristics of YN/V connected balance transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(5): 345-349.
- [10] 吴命利, 范瑜. 星型延边三角形接线平衡变压器的阻抗匹配与数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 160-166.
- WU Mingli, FAN Yu. Impedance matching and mathematical model of wye-prolonged delta connected balance transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 160-166.
- [11] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 166-171.

收稿日期: 2015-07-24; 修回日期: 2015-11-27

作者简介:

陈博(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护及其整定计算; E-mail: chenbo@hust.edu.cn

邱建(1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护整定计算;

曾耿晖(1977-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护整定运行与管理。

(编辑 张爱琴)