

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250232

# 计及牵引变压器的电网短路计算通用方法研究

余梦琪<sup>1</sup>, 杨增力<sup>2</sup>, 王友怀<sup>2</sup>, 王晶<sup>2</sup>, 张振<sup>2</sup>, 王镜毓<sup>1</sup>, 石东源<sup>1</sup>

(1. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;

2. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 电力系统短路电流的正确计算是确保继电保护整定计算工作有效实施的前提。牵引变压器的接入使电网呈三相不对称特性。为统一高效地实现计及多种牵引变压器的电网短路计算, 提出了一种可适用于含牵引变压器的电网通用短路故障模型。通过叠加故障修改节点导纳矩阵, 该方法可以直接实现全网短路电压、电流的计算。首先, 介绍了利用修改节点导纳矩阵进行电网故障计算的基本思路。然后, 详细推导了单相、V/V、V/X、Scott 以及阻抗匹配平衡牵引变低电压侧短路时的故障修改节点导纳矩阵。最后基于 IEEE9 节点系统进行仿真, 并与现有计算方法对比, 验证了该方法的正确性。该方法已应用于实际电网的故障分析及继电保护整定计算软件中, 具有较好的实用价值。

**关键词:** 电气化铁路; 牵引变压器; 电网短路计算; 对称分量法; 修改节点导纳矩阵

## A general method for power system short-circuit calculation considering traction transformers

YU Mengqi<sup>1</sup>, YANG Zengli<sup>2</sup>, WANG Youhuai<sup>2</sup>, WANG Jing<sup>2</sup>, ZHANG Zhen<sup>2</sup>, WANG Jingyu<sup>1</sup>, SHI Dongyuan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Accurate calculation of short-circuit currents in power systems is fundamental to the effective implementation of relay protection setting calculations. The integration of traction transformers introduces three-phase asymmetry into the power grid. To achieve a unified and efficient approach for short-circuit calculation in power systems containing various types of traction transformers, this paper proposes a general short-circuit fault model for power grids with traction transformers. By superimposing fault modified the nodal admittance matrix, the method can directly calculate the short-circuit voltages and currents throughout the entire network. First, the basic concept of power system fault analysis using a modified nodal admittance matrix is introduced. Then, the fault-modified nodal admittance matrices for low-voltage side faults of single-phase, V/V, V/X, Scott, and impedance-matched balanced traction transformers are derived in detail. Finally, the correctness of the proposed method is demonstrated by simulations based on the IEEE9-bus system and comparison with the existing calculation methods. The method has been applied in practical power grid fault analysis and relay protection setting calculation software, demonstrating good practicality and engineering value.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52207107).

**Key words:** electrified railway; traction transformer; power system short-circuit calculation; symmetrical component method; modified nodal admittance matrix

## 0 引言

截至 2024 年底, 我国铁路电气化率已突破 75.2%, 根据《“十四五”铁路发展规划》, 还会继续完善“八纵八横”高速铁路网建设, 推进城市

铁路的规划与发展<sup>[1-9]</sup>。电气化铁路中, 机车所需要的电能由三相电力系统经牵引变压器降压后输送至接触网<sup>[10]</sup>, 如图 1 所示。牵引变压器作为牵引变电站的核心, 是三相电力系统与牵引供电系统之间的关键枢纽<sup>[11]</sup>。常见牵引变压器按相数分为单相和三相, 前者包括纯单相和组合单相牵引变压器, 后者包括不平衡接线的 V/V、V/X 牵引变压器<sup>[12]</sup>, 以

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52207107)

及平衡接线的 Scott、阻抗匹配平衡牵引变压器等。

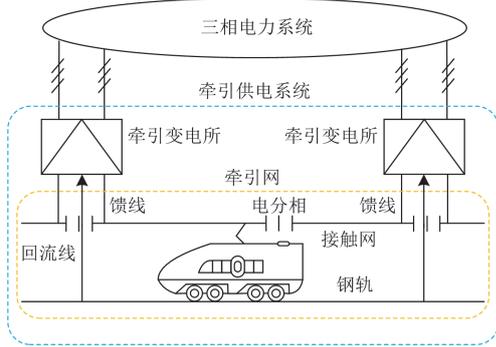


图1 牵引供电系统的组成

Fig. 1 Composition of traction power supply system

短路计算是电力系统中解决一系列技术问题，如设备选型、继电保护整定计算等不可缺少的基本计算，其任务是在电网某处发生短路故障时求解系统电压、电流的分布，在实用计算中一般只计算故障瞬间电压和电流的周期分量，忽略负荷的影响<sup>[13]</sup>，并采用对称分量法展开计算。牵引变压器作为终端供电设备，在计算其高压侧电网中的短路故障时可以忽略牵引变压器，仍直接使用对称分量法。但对于其低压侧故障，由于牵引变压器三相不对称<sup>[14]</sup>，无法与普通变压器一样建立其一相等值电路后接入系统，导致不能直接应用对称分量法进行求解。

为实现牵引变低压侧短路故障的计算，一般采用相分量法<sup>[15]</sup>或将低压侧故障等效变换到高压侧的三相网络再利用对称分量法进行计算<sup>[16]</sup>，后者思路因更易于整合到应用对称分量法的软件程序中而应用更为广泛。文献[17]将低压侧短路时的两相式牵引供电系统向牵引变高压侧等效为不对称过渡阻抗后用对称分量法进行求解；文献[18]介绍了V/V牵引变压器的高压侧故障等效模型与求解思路；文献[19]和文献[20]分别介绍了Scott和阻抗匹配平衡变压器低压侧短路时牵引变高压侧边界节点处电流的求解过程。然而，现有应用对称分量法的研究主要针对特定类型的牵引变压器，需先将电网等效到牵引变压器高压侧边界节点，然后结合相应的高压侧等效故障列出边界条件求解该处短路电流，最终根据边界节点的故障电流反推计算全网的短路电压、电流分布，计算推导复杂，且难以开展多重复杂故障计算。

针对上述问题，本文提出了基于牵引变压器通用故障模型，通过叠加故障修改节点导纳矩阵以直接实现全网短路电压、电流计算的方法。该方法还支持多重复杂故障的计算。首先介绍了该方法的基本思路。然后，对单相、V/V、V/X、Scott及阻抗匹配平衡牵引变压器等常见类型，详细进行了其低

压侧短路计算分析。最后通过PSCAD仿真，并与现有方法的计算结果进行对比验证，证明了该方法的正确性。

## 1 基于修改节点导纳矩阵的故障计算方法

电网三序导纳型网络方程为<sup>[21]</sup>

$$\mathbf{Y}^{(120)}\mathbf{V}^{(120)} = \mathbf{I}^{(120)} \quad (1)$$

式中： $\mathbf{Y}$ 为系统的节点导纳矩阵； $\mathbf{V}$ 为电压列向量； $\mathbf{I}$ 为电流列向量；上标1、2、0分别表示正、负、零序分量。

由于当网络元件参数三相对称时三序网络相互独立，三序网节点之间的耦合导纳矩阵均为零矩阵，且仅发电机节点有正序注入电流，故正常运行时式(1)可以写成如式(2)按分块矩阵排列的网络方程。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}^1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Y}^2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Y}^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}^1 \\ \mathbf{V}^2 \\ \mathbf{V}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}^1 \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2)$$

可将其记为

$$\mathbf{Y}^{(0)}\mathbf{V}^{(0)} = \mathbf{I}^{(0)} \quad (3)$$

式中：上标(0)表示系统正常状态下的电气量。

当电网发生短路故障时，网络方程为

$$\mathbf{Y}^{(f)}\mathbf{V}^{(f)} = \mathbf{I}^{(f)} \quad (4)$$

式中：上标(f)表示故障情况下的电气量； $\mathbf{Y}^{(f)}$ 为短路故障下的节点导纳矩阵，可由电网正常运行时的节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}^{(0)}$ 和短路故障边界条件对应的故障修改节点导纳矩阵 $\Delta\mathbf{Y}^{(f)}$ 叠加得到，如式(5)所示。

$$\mathbf{Y}^{(f)} = \mathbf{Y}^{(0)} + \sum_{k=1}^{n_f} \Delta\mathbf{Y}_k^{(f)} \quad (5)$$

式中： $n_f$ 表示故障重数； $\Delta\mathbf{Y}_k^{(f)}$ 为故障 $k$ 的修改节点导纳矩阵； $\Sigma$ 表示其可支持处理多重故障。

短路计算中发电机一般采用如图2(a)所示次暂态电势+次暂态电抗的模型<sup>[13]</sup>。短路瞬间，发电机次暂态电动势保持不变，因此根据与之相对应的图2(b)所示等效电流源模型计算电机节点的注入电流也

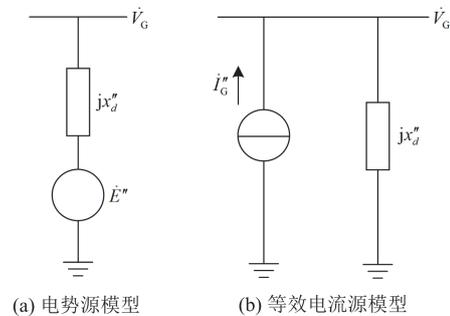


图2 发电机等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of generator

保持不变, 即有<sup>[21]</sup>

$$\mathbf{I}^{(f)} = \mathbf{I}^{(0)} \quad (6)$$

在实用计算中不计负载影响时, 常取次暂态电动势  $\dot{E}'' = 1.0$ , 可按图 2(b)所示的等效电流源模型, 用发电机次暂态电动势  $\dot{E}''$  除以次暂态电抗  $x_d''$  计算发电机节点的注入电流  $\dot{I}_G''$ , 即  $\dot{I}_G'' = 1/jx_d''$ , 其他节点的注入电流则为 0。

从而可得故障情况下基于三序节点导纳矩阵的网络线性方程为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{Y}^1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Y}^2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Y}^0 \end{pmatrix} + \sum_{k=1}^{n_f} \Delta \mathbf{Y}_k^{(f)} \begin{pmatrix} \mathbf{V}^1 \\ \mathbf{V}^2 \\ \mathbf{V}^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}^1 \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中故障修改节点导纳矩阵  $\Delta \mathbf{Y}_k^{(f)}$  反映了故障情况下三序网之间的耦合关系。设节点  $i$  处发生短路故障, 短路点故障端口的三序电压和电流满足式(8)。

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{10} \\ y_{21} & y_{22} & y_{20} \\ y_{01} & y_{02} & y_{00} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_i^1 \\ \dot{V}_i^2 \\ \dot{V}_i^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_i^1 \\ \dot{I}_i^2 \\ \dot{I}_i^0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

记  $\Delta \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{10} \\ y_{21} & y_{22} & y_{20} \\ y_{01} & y_{02} & y_{00} \end{bmatrix}$ , 其可根据不同类型

短路故障情况下短路点的边界条件推导得到, 具体可参考文献[21]。  $\Delta \mathbf{y}$  中的 9 个元素需叠加到式(7)中三序节点导纳矩阵  $\mathbf{Y}^{(0)}$  的各分块矩阵的相应位置, 从而可得其与故障修改导纳矩阵  $\Delta \mathbf{Y}_k^{(f)}$  的对应关系, 如式(9)所示。  $\Delta \mathbf{Y}_k^{(f)}$  的维数与  $\mathbf{Y}^{(0)}$  相同, 除  $y_{11}$ 、 $y_{12}$ 、 $y_{10}$  等 9 个元素之外, 其他元素均为 0。

$$\Delta \mathbf{Y}_k^{(f)} = \begin{matrix} & \begin{matrix} i & n+i & 2n+i \end{matrix} \\ \begin{matrix} \vdots \\ \cdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \cdots \\ \vdots \\ \cdots \\ \vdots \\ \cdots \\ \vdots \end{matrix} & \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & y_{11} & \cdots & \cdots & y_{12} & \cdots & \cdots & y_{10} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & y_{21} & \cdots & \cdots & y_{22} & \cdots & \cdots & y_{20} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & y_{01} & \cdots & \cdots & y_{02} & \cdots & \cdots & y_{00} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} & \begin{matrix} i \\ n+i \\ 2n+i \end{matrix} \end{matrix} \quad (9)$$

叠加后求解式(7)所示的网络方程可以直接得到全网各节点的三序电压, 再结合各支路两端节点的三序电压及各序参数, 求得各支路的三序短路电流, 进而即可求得全网的节点三相电压和支路三相电流。

综上所述, 基于牵引变压器通用故障模型, 利

用故障修改节点导纳矩阵进行短路计算的流程可概括如图 3 所示。

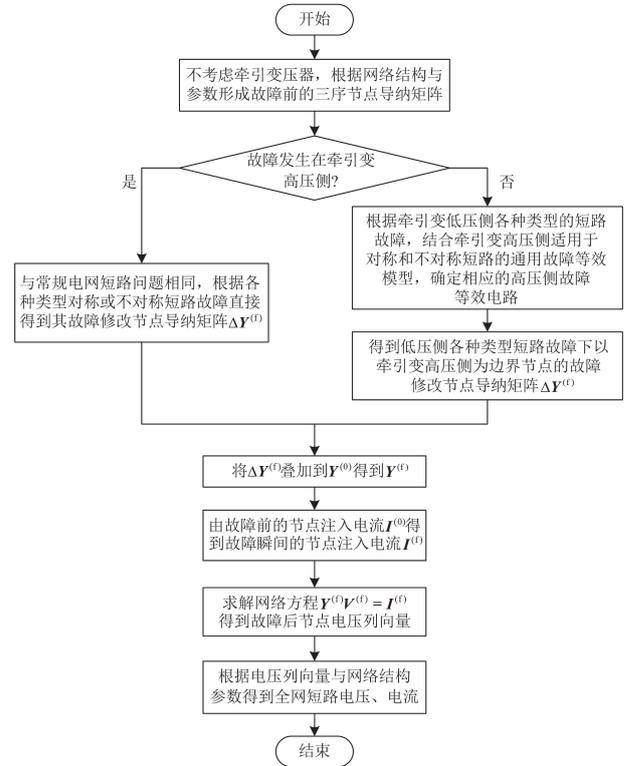


图 3 计及牵引变压器的电网短路计算流程图

Fig. 3 Flowchart of grid fault calculation considering traction transformer

## 2 牵引变压器低压侧故障时的通用故障模型

得到各牵引变压器低压侧短路时的故障修改导纳矩阵  $\Delta \mathbf{Y}^{(f)}$  是利用该方法进行短路计算的核心, 它反映了牵引变压器高压侧等效故障情况下三序网之间的耦合关系。由于牵引变压器低压侧发生短路时, 高压侧没有零序电流<sup>[22]</sup>, 因此可采用如图 4 所示的通用故障模型来等效高压侧故障。

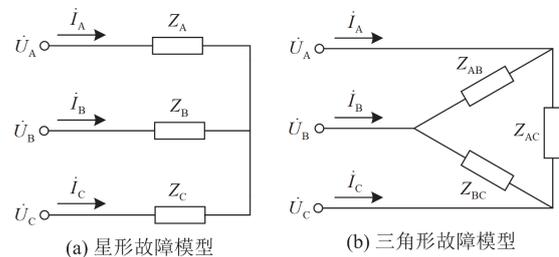


图 4 牵引变压器高压侧通用故障等效模型

Fig. 4 Universal equivalent fault model of high voltage side of traction transformer

两种方法所表示的故障等效模型, 通过星三角变换可以进行转化<sup>[23]</sup>, 其中过渡阻抗的关系为

$$\begin{cases} Z_{AB} = \frac{Z_B Z_C + Z_A Z_C + Z_A Z_B}{Z_C} \\ Z_{BC} = \frac{Z_B Z_C + Z_A Z_C + Z_A Z_B}{Z_A} \\ Z_{AC} = \frac{Z_B Z_C + Z_A Z_C + Z_A Z_B}{Z_B} \end{cases} \quad (10)$$

记  $y_{AB} = \frac{1}{Z_{AB}}$ ,  $y_{BC} = \frac{1}{Z_{BC}}$ ,  $y_{AC} = \frac{1}{Z_{AC}}$ , 根据图

4(b)所示高压侧故障等效模型得到的三相修改导纳矩阵为

$$\Delta \mathbf{y}^{(ABC)} = \begin{bmatrix} y_{AB} + y_{AC} & -y_{AB} & -y_{AC} \\ -y_{AB} & y_{AB} + y_{BC} & -y_{BC} \\ -y_{AC} & -y_{BC} & y_{AC} + y_{BC} \end{bmatrix} \quad (11)$$

由  $\Delta \mathbf{y}^{(120)} = \mathbf{S} \Delta \mathbf{y}^{(ABC)} \mathbf{S}^{-1}$ , 可得三序修改导纳矩阵为

$$\Delta \mathbf{y}^{(120)} = \begin{bmatrix} y_{AB} + y_{BC} + y_{AC} & -\alpha y_{AB} - y_{BC} - \alpha^2 y_{AC} & 0 \\ -\alpha^2 y_{AB} - y_{BC} - \alpha y_{AC} & y_{AB} + y_{BC} + y_{AC} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{S}$  为相-序变换矩阵, 具体为

$$\mathbf{S} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{S}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:  $\alpha$  为对称分量法中的旋转因子,  $\alpha = e^{j120^\circ}$ 。

下面对常见牵引变压器分别进行分析。

## 2.1 单相牵引变压器

单相牵引变压器又分为纯单相与组合单相牵引变压器。

纯单相牵引变压器接线如图 5 所示, 低压侧故障时将其等效到牵引变压器高压侧, 可视作三相电网中牵引变压器所接入的两相之间发生短路, 过渡阻抗为变压器的短路阻抗  $Z_T$ , 如图 6 所示。

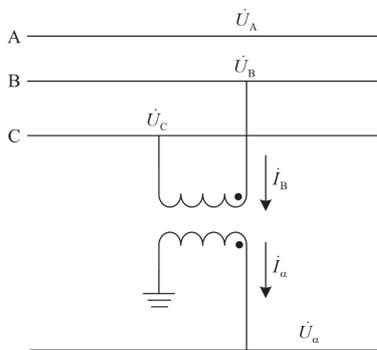


图 5 纯单相牵引变压器接线图

Fig. 5 Wiring diagram of pure single-phase traction transformer

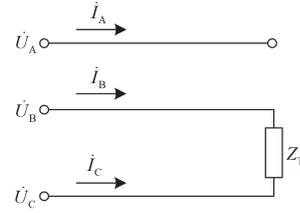


图 6 纯单相牵引变压器高压侧故障等效模型

Fig. 6 Equivalent fault model of high voltage side of pure single-phase traction transformer

因此, 以纯单相牵引变压器接在 B、C 相间为例, 结合图 6 与图 4, 可得  $y_{AB} = 0$ ,  $y_{BC} = \frac{1}{Z_T}$ ,  $y_{AC} = 0$ , 代入式(12)可得故障修改导纳矩阵为

$$\Delta \mathbf{y} = \frac{1}{Z_T} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

同理可得纯单相牵引变压器接在 A、B 或 A、C 相间的故障修改导纳矩阵。

组合单相牵引变压器接线如图 7 所示, 其折算到高压侧的等效电路如图 8 所示。

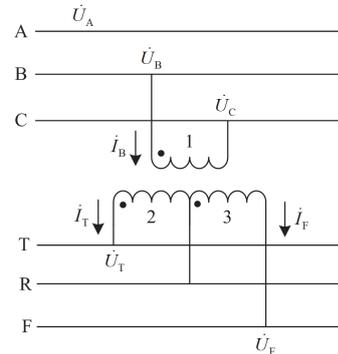


图 7 组合单相牵引变压器接线图

Fig. 7 Wiring diagram of combined single-phase traction transformer

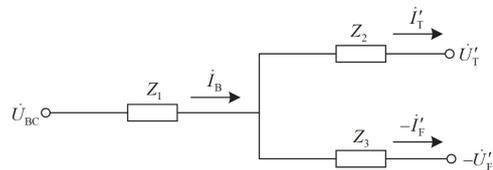


图 8 组合单相牵引变压器高压侧等效电路

Fig. 8 Equivalent circuit of high voltage side of combined single-phase traction transformer

其中,  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$  为与牵引变压器自身参数有关的阻抗, 且有  $Z_2 = Z_3$ 。  $\dot{U}_T$ 、 $\dot{I}_T$  和  $\dot{U}_F$ 、 $\dot{I}_F$  分

别表示低压侧 T 相与 F 相的电压与电流,  $\dot{U}'_T$ 、 $\dot{I}'_T$  和  $\dot{U}'_F$ 、 $\dot{I}'_F$  则分别表示折算到高压侧的 T 相与 F 相的电压与电流, 则根据图 8 所示的等效电路可以得到如式(15)所示关系式。

$$\begin{cases} \dot{I}_B = \dot{I}'_T - \dot{I}'_F \\ \dot{U}_{BC} = Z_1 \dot{I}_B + Z_2 \dot{I}'_T + \dot{U}'_T \\ \dot{U}_{BC} = Z_1 \dot{I}_B - Z_3 \dot{I}'_F - \dot{U}'_F \end{cases} \quad (15)$$

当低压侧发生不同类型短路故障时, 将故障边界条件代入式(15)可以分别得到  $\dot{U}_{BC}$  与  $\dot{I}_B$  的关系, 从而确定高压侧故障等效模型。其结果可表示为  $Z_X$  与某一阻抗串联在 B、C 相间, 若将该阻抗记为  $Z_X$ , 当低压侧发生不同类型短路故障时均可以用如图 9 所示的模型表示高压侧的等效故障。

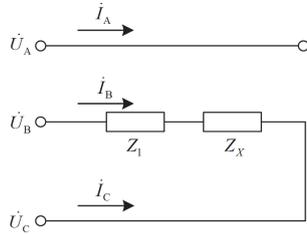


图 9 组合单相牵引变压器高压侧故障等效模型

Fig. 9 Equivalent fault model of high voltage side of combined single-phase traction transformer

具体有以下 4 种故障情况。

1) T 侧接地短路:  $\dot{U}_T = 0$ ,  $\dot{I}_F = 0$ , 代入式(15)后整理可得  $\dot{U}_{BC} = Z_1 \dot{I}_B + Z_2 \dot{I}_B$ , 则  $Z_X = Z_2$ 。

2) F 侧接地短路:  $\dot{U}_F = 0$ ,  $\dot{I}_T = 0$ , 代入式(15)后整理可得  $\dot{U}_{BC} = Z_1 \dot{I}_B + Z_3 \dot{I}_B$ , 则  $Z_X = Z_3$ 。

3) T、F 相间短路:  $\dot{U}_T = \dot{U}_F$ ,  $\dot{I}_T + \dot{I}_F = 0$ , 代入式(15)后整理可得  $\dot{U}_{BC} = Z_1 \dot{I}_B + \frac{Z_2 + Z_3}{4} \dot{I}_B$ , 则  $Z_X = \frac{Z_2 + Z_3}{4}$ 。

4) T、F 相间短路接地:  $\dot{U}_T = \dot{U}_F = 0$ , 代入式(15)后整理可得  $\dot{U}_{BC} = Z_1 \dot{I}_B + (Z_2 // Z_3) \dot{I}_B$ , 则  $Z_X = Z_2 // Z_3$ 。

结合图 9 和图 6 可以看出, 其故障等效模型与纯单相牵引变压器相同, 因此短路计算方法也相同, 只是此时的过渡阻抗为  $Z_T = Z_1 + Z_X$ , 又  $Z_2 = Z_3$ , 可得  $\frac{Z_2 + Z_3}{4} = Z_2 // Z_3$ , 可将 T(F)单相接地短路即分支短路时的  $Z_T$  记为  $Z_{TS}$ , 将 T、F 相间短路(接地)即双分支短路时的  $Z_T$  记为  $Z_{DS}$ , 相应的短路阻抗百

分数均会由变压器参数提供。

## 2.2 V/V 牵引变压器

V/V 牵引变压器由两台纯单相牵引变压器构成<sup>[24]</sup>, 其典型接线如图 10 所示, 其折算到高压侧的等效电路如图 11 所示。

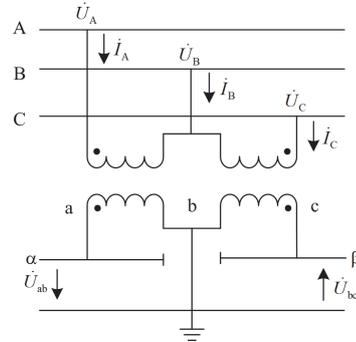


图 10 V/V 牵引变压器接线图

Fig. 10 Wiring diagram of V/V traction transformer

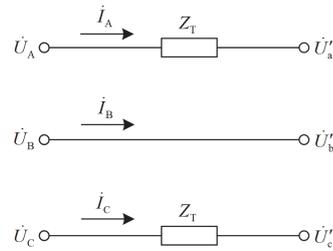


图 11 V/V 牵引变压器高压侧等效电路

Fig. 11 Equivalent circuit of high voltage side of V/V traction transformer

结合图 11 和图 4 所示的通用故障模型, 具体分析以下 4 种故障情况。

1)  $\alpha$  接地短路: 可等效为高压侧 A、B 相间发生短路阻抗为  $Z_T$  的相间短路故障, C 相可视作开路, 可得  $y_{AB} = \frac{1}{Z_T}$ ,  $y_{BC} = 0$ ,  $y_{AC} = 0$ , 相应的故障修改导纳矩阵为

$$\Delta \mathbf{y} = \frac{1}{Z_T} \begin{bmatrix} 1 & -\alpha & 0 \\ -\alpha^2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

2)  $\beta$  接地短路: 可等效为高压侧 B、C 相间发生短路阻抗为  $Z_T$  的相间短路, A 相可视作开路, 可得  $y_{AB} = 0$ ,  $y_{BC} = \frac{1}{Z_T}$ ,  $y_{AC} = 0$ , 相应的故障修改导纳矩阵为

$$\Delta \mathbf{y} = \frac{1}{Z_T} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

3)  $\alpha$ 、 $\beta$  相间短路: 可等效为高压侧 A、C 相间发生短路阻抗为  $2Z_T$  的相间短路故障, B 相可视为开路, 可得  $y_{AB}=0$ ,  $y_{BC}=0$ ,  $y_{AC}=\frac{1}{2Z_T}$ , 相应的故障修改导纳矩阵为

$$\Delta y = \frac{1}{2Z_T} \begin{bmatrix} 1 & -\alpha^2 & 0 \\ -\alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

4)  $\alpha$ 、 $\beta$  相间短路接地: 可等效为高压侧 A、B 以及 B、C 相间均发生短路阻抗为  $Z_T$  的短路故障, 可得  $y_{AB}=1/Z_T$ ,  $y_{BC}=1/Z_T$ ,  $y_{AC}=0$ , 相应的故障修改导纳矩阵为

$$\Delta y = \frac{1}{Z_T} \begin{bmatrix} 2 & \alpha^2 & 0 \\ \alpha & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

### 2.3 V/X 牵引变压器

V/X 牵引变压器由两台组合单相牵引变压器构成<sup>[25]</sup>, 如图 12 所示, 其折算到高压侧的等效电路如图 13 所示。

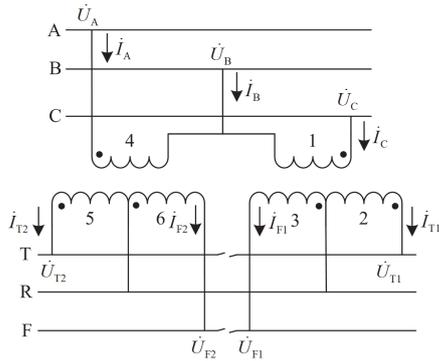


图 12 V/X 牵引变压器接线图

Fig. 12 Wiring diagram of V/X traction transformer

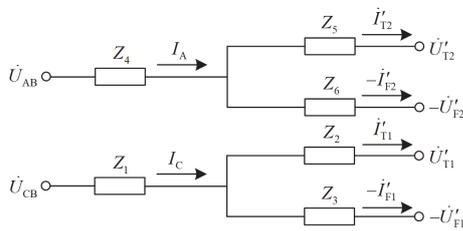


图 13 V/X 牵引变压器高压侧等效电路

Fig. 13 Equivalent circuit of high voltage side of V/X traction transformer

其中,  $Z_1 - Z_6$  为与牵引变压器自身参数有关的阻抗, 且有  $Z_2 = Z_3 = Z_5 = Z_6$ 、 $Z_1 = Z_4$ 。发生单侧短路故障时, 可以视作仅一台组合单相牵引变

压器故障而另一台开路, 该情况与 2.1 节所讨论的计算方法相同, 可以直接利用其中得出的结论。

当两侧都发生故障时, 高压侧故障等效模型如图 14 所示。

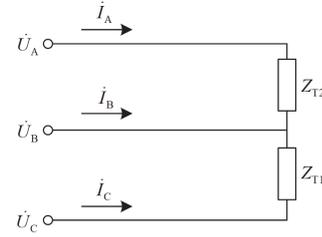


图 14 V/X 牵引变压器高压侧故障等效模型

Fig. 14 Equivalent fault model of high voltage side of V/X traction transformer

结合图 4 所示的通用故障等效模型, 可得  $y_{AB}=\frac{1}{Z_{T2}}$ ,  $y_{BC}=\frac{1}{Z_{T1}}$ ,  $y_{AC}=0$ 。其中  $Z_{T1}$  与  $Z_{T2}$  在低压侧发生单分支短路时过渡阻抗为  $Z_{TS}$ , 发生双分支短路时过渡阻抗为  $Z_{DS}$ 。

### 2.4 Scott 牵引变压器

Scott 牵引变压器是一种平衡变压器, 由两台单相变压器构成, 分别为 M 变和 T 变, 其接线如图 15 所示。它能够实现两相供电功能, 理想平衡变压器技术还要求当高压侧短路时, 从  $\alpha$ 、 $\beta$  相测得的短路阻抗相等, 且两相电气解耦, 互阻抗为 0。

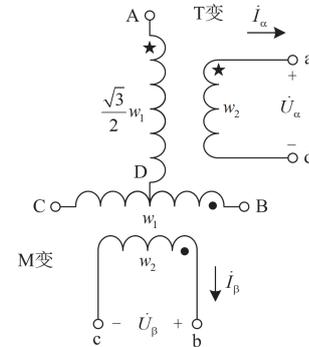


图 15 Scott 牵引变压器接线图

Fig. 15 Wiring diagram of Scott traction transformer

文献[26]详细介绍了 Scott 变压器的特性, 并得到了其一、二次侧电流和电压满足如式(20)和式(21)所示的变换关系。

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & 1 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\alpha 0} \\ \dot{U}_{\beta 0} \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中:  $K = \frac{w_1}{w_2}$ , 即为 Scott 变压器的变比;  $\dot{U}_{\alpha 0}$ 、 $\dot{U}_{\beta 0}$  分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  端口开路电压;  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$  分别为低压侧  $\alpha$ 、 $\beta$  相的电流。

Scott 牵引变压器低压侧等效电路如图 16 所示<sup>[26]</sup>。

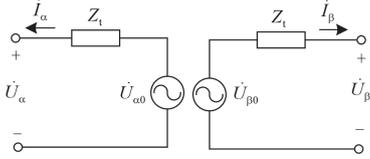


图 16 Scott 牵引变压器低压侧两相等效电路图

Fig. 16 Equivalent circuit of two phases of the low voltage side of Scott transformer

低压侧端口电压方程可表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{\alpha 0} \\ \dot{U}_{\beta 0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_t & 0 \\ 0 & Z_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中:  $Z_t$  为牵引变压器高压侧三相同步接地时低压侧的测量阻抗, 若  $Z_T$  为低压侧三相同步接地时高压侧的测量阻抗, 则  $Z_t = 2Z_T / K^2$ 。

设  $Z_\alpha$ 、 $Z_\beta$  分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  相牵引负荷的等效阻抗, 则

$$\begin{cases} \dot{U}_\alpha = Z_\alpha i_\alpha \\ \dot{U}_\beta = Z_\beta i_\beta \end{cases} \quad (23)$$

联立式(20)一式(23)可得其高压侧的电流、电压关系为

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4}{3}Y_1 & -\frac{2}{3}Y_1 & -\frac{2}{3}Y_1 \\ -\frac{2}{3}Y_1 & \frac{1}{3}Y_1 + Y_2 & \frac{1}{3}Y_1 - Y_2 \\ -\frac{2}{3}Y_1 & \frac{1}{3}Y_1 - Y_2 & \frac{1}{3}Y_1 + Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中:  $Y_1 = \frac{1}{2Z_T + K^2Z_\alpha}$ ,  $Y_2 = \frac{1}{2Z_T + K^2Z_\beta}$ , 为与低压侧故障类型相关的参数, 其值取决于故障边界条件。对比式(24)与式(11)可知, 牵引变压器低压侧故障时高压侧等效电路可以直接用图 4(b)所示的故障模型表示, 其中,  $y_{AB} = \frac{2}{3}Y_1$ ,  $y_{BC} = -\frac{1}{3}Y_1 + Y_2$ ,  $y_{AC} = \frac{2}{3}Y_1$ 。故障发生后, 模型中相应导纳参数  $Y_1$ 、 $Y_2$  发生改变, 此时可等效为高压侧发生带有相应过渡阻抗的三相

短路故障。下文将具体分析以下 4 种故障情况。

1)  $\alpha$  接地短路: 由故障边界条件可得  $Z_\alpha = 0$ ,  $Z_\beta = \infty$ , 即  $Y_1 = \frac{1}{2Z_T}$ ,  $Y_2 = 0$ 。则:  $y_{AB} = \frac{1}{3Z_T}$ ,  $y_{BC} = -\frac{1}{6Z_T}$ ,  $y_{AC} = \frac{1}{3Z_T}$ , 代入式(12)可得故障修改导纳矩阵为

$$\Delta y = \frac{1}{2Z_T} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

2)  $\beta$  接地短路: 由故障边界条件可得  $Z_\alpha = \infty$ ,  $Z_\beta = 0$ 。则:  $y_{AB} = 0$ ,  $y_{BC} = \frac{1}{2Z_T}$ ,  $y_{AC} = 0$ , 相应的故障修改导纳矩阵为

$$\Delta y = \frac{1}{2Z_T} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

3)  $\alpha$ 、 $\beta$  相间短路接地: 由故障边界条件可得  $Z_\alpha = 0$ ,  $Z_\beta = 0$ 。则:  $y_{AB} = \frac{1}{3Z_T}$ ,  $y_{BC} = \frac{1}{3Z_T}$ ,  $y_{AC} = \frac{1}{3Z_T}$ , 相应的故障修改导纳矩阵为

$$\Delta y = \frac{1}{Z_T} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

4)  $\alpha$ 、 $\beta$  相间短路: 故障边界条件为  $i_\alpha + i_\beta = 0$ ,  $\dot{U}_\alpha = \dot{U}_\beta$ 。将其与式(20)一式(23)重新联立求解可得高压侧电流、电压关系为

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_T} \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & -\frac{\sqrt{3}+1}{6} & \frac{\sqrt{3}-1}{6} \\ -\frac{\sqrt{3}+1}{6} & \frac{2+\sqrt{3}}{6} & -\frac{1}{6} \\ \frac{\sqrt{3}-1}{6} & -\frac{1}{6} & \frac{2-\sqrt{3}}{6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (28)$$

结合式(11)可得:  $y_{AB} = \frac{1+\sqrt{3}}{6Z_T}$ ,  $y_{BC} = \frac{1}{6Z_T}$ ,

$y_{AC} = \frac{1-\sqrt{3}}{6Z_T}$ , 相应的故障修改导纳矩阵为

$$\Delta y = \frac{1}{6Z_T} \begin{bmatrix} 3 & \sqrt{3}\alpha^2 - \sqrt{3}\alpha & 0 \\ \sqrt{3}\alpha - \sqrt{3}\alpha^2 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

## 2.5 阻抗匹配平衡牵引变压器

阻抗匹配平衡牵引变压器也是一种典型的三相-两相变压器, 其接线以及绕组耦合关系如图 17 所示。其低压侧  $\alpha$ 、 $\beta$  相互解耦, 互阻抗为 0, 且无论其高压侧的中性点接地与否, 变压器均无零序电流。

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2+\sqrt{3}}{6}Y_1 + \frac{2-\sqrt{3}}{6}Y_2 & -\frac{1+\sqrt{3}}{6}Y_1 + \frac{\sqrt{3}-1}{6}Y_2 & -\frac{1}{6}Y_1 - \frac{1}{6}Y_2 \\ -\frac{1+\sqrt{3}}{6}Y_1 + \frac{\sqrt{3}-1}{6}Y_2 & \frac{1}{3}Y_1 + \frac{1}{3}Y_2 & \frac{\sqrt{3}-1}{6}Y_1 - \frac{\sqrt{3}+1}{6}Y_2 \\ -\frac{1}{6}Y_1 - \frac{1}{6}Y_2 & \frac{\sqrt{3}-1}{6}Y_1 - \frac{\sqrt{3}+1}{6}Y_2 & \frac{2-\sqrt{3}}{6}Y_1 + \frac{2+\sqrt{3}}{6}Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (30)$$

式中:  $Y_1 = \frac{1}{Z_T + K^2 Z_\alpha}$ ;  $Y_2 = \frac{1}{Z_T + K^2 Z_\beta}$ 。对比式(30)

与式(11)可知, 阻抗匹配平衡牵引变压器低压侧故障时高压侧等效电路也可以直接用图 4(b)所示的故障模型表示, 其中,  $y_{AB} = \frac{1+\sqrt{3}}{6}Y_1 + \frac{1-\sqrt{3}}{6}Y_2$ ,  $y_{BC} = \frac{1-\sqrt{3}}{6}Y_1 + \frac{\sqrt{3}+1}{6}Y_2$ ,  $y_{AC} = \frac{1}{6}Y_1 + \frac{1}{6}Y_2$ , 具体分析以下 4 种故障情况。

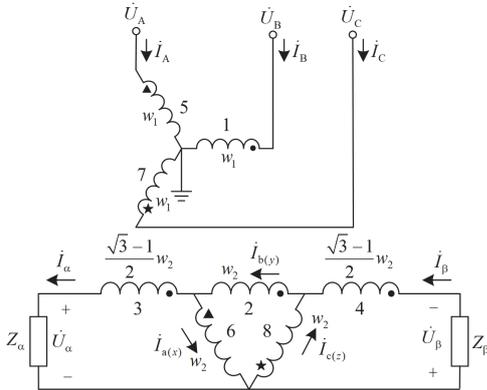


图 17 阻抗匹配平衡牵引变压器接线图

Fig. 17 Wiring diagram of impedance-matching balance traction transformer

1)  $\alpha$  接地短路:  $Z_\alpha = 0$ ,  $Z_\beta = \infty$ , 即  $Y_1 = \frac{1}{Z_T}$ ,

$Y_2 = 0$ 。则:  $y_{AB} = \frac{1+\sqrt{3}}{6Z_T}$ ,  $y_{BC} = \frac{1-\sqrt{3}}{6Z_T}$ ,  $y_{AC} = \frac{1}{6Z_T}$ ,

代入式(12)可得故障修改导纳矩阵为

$$\Delta y = \frac{1}{6Z_T} \begin{bmatrix} 3 & \sqrt{3} - \sqrt{3}\alpha & 0 \\ \sqrt{3} - \sqrt{3}\alpha^2 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

2)  $\beta$  接地短路:  $Z_\alpha = \infty$ ,  $Z_\beta = 0$ 。则:

由文献[27]可知, 阻抗匹配平衡变压器变比为

$$\sqrt{2} \frac{w_1}{w_2} = \sqrt{2}K, \text{ 因此 } Z_t = 2Z_T / (\sqrt{2}K)^2 = Z_T / K^2。文$$

献[20]已根据阻抗匹配平衡变压器的特性<sup>[27]</sup>求解得到了如式(30)所示的高压侧电流、电压关系。

$y_{AB} = \frac{1-\sqrt{3}}{6Z_T}$ ,  $y_{BC} = \frac{1+\sqrt{3}}{6Z_T}$ ,  $y_{AC} = \frac{1}{6Z_T}$ , 相应的故障修改导纳矩阵为

$$\Delta y = \frac{1}{6Z_T} \begin{bmatrix} 3 & \sqrt{3}\alpha - \sqrt{3} & 0 \\ \sqrt{3}\alpha^2 - \sqrt{3} & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

3)  $\alpha$ 、 $\beta$  相间短路接地:  $Z_\alpha = 0$ ,  $Z_\beta = 0$ 。则:

$y_{AB} = \frac{1}{3Z_T}$ ,  $y_{BC} = \frac{1}{3Z_T}$ ,  $y_{AC} = \frac{1}{3Z_T}$ , 相应的故障修改导纳矩阵为

$$\Delta y = \frac{1}{Z_T} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

4)  $\alpha$ 、 $\beta$  相间短路:  $\dot{i}_\alpha = \dot{i}_\beta$ ,  $\dot{U}_\alpha + \dot{U}_\beta = 0$ 。结

合该条件重新求解可得:  $y_{AB} = \frac{1}{3Z_T}$ ,  $y_{BC} = \frac{1}{3Z_T}$ ,

$y_{AC} = -\frac{1}{6Z_T}$ , 相应的故障修改导纳矩阵为

$$\Delta y = \frac{1}{2Z_T} \begin{bmatrix} 1 & \alpha^2 & 0 \\ \alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

## 3 仿真实验

为验证本文所提方法对牵引变压器低压侧短路时全网短路电压电流的有效计算, 选取标准 IEEE9 节点系统, 其参数由文献[28]得到, 忽略负荷, 在节点 6 处引出一条牵引站供电线路(以 100 MVA 为基准, 正序阻抗为  $Z_L = 0.0084 + j0.0606$  p.u., 电纳为  $B_L/2 = 0.056$  p.u.), 同时新增一个节点 10 并接入牵引变压器, 得到如图 18 所示的算例系统。由于两种单相牵引变压器计算方法相

同, V/V、V/X 牵引变压器分别由这两种变压器构成, 最终选取组合单相、V/V、Scott 和阻抗匹配平衡牵引变压器, 分别用本文所提方法对它们低压侧发生各种类型短路故障下的全网三序电压进行计算。将基于本文所提方法的 MATLAB 短路计算结果与 PSCAD 仿真结果进行对比验证。

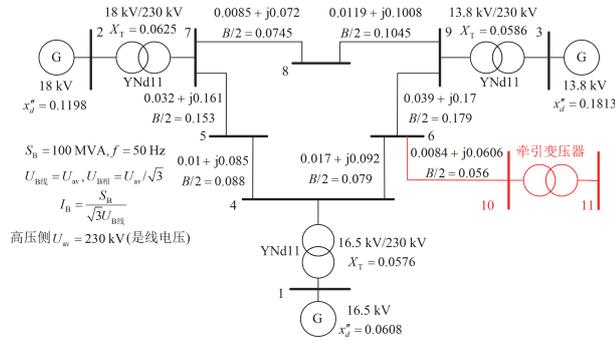


图 18 算例系统

Fig. 18 Example of the power system

组合单相牵引变压器型号: DF6/QY-40000/220, 额定容量: 40 MVA, 额定电压: 220 kV/27.5 kV/27.5 kV, 单、双分支短路电压: 13%、12%, 其 PSCAD 仿真模型如图 19 所示<sup>[29]</sup>, 短路阻抗标么值可由式 (35) 得到。

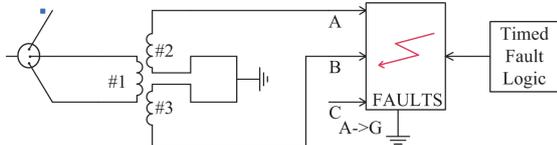


图 19 组合单相牵引变压器 PSCAD 仿真图

Fig. 19 PSCAD simulation of combined single-phase traction transformer

$$Z_T = jX_T = j \left( U_s \times \frac{S_B}{S_N} \right) \quad (35)$$

式中:  $U_s$  为牵引变压器的短路电压;  $S_B$  为系统的基准容量;  $S_N$  为牵引变压器的额定容量。

遵循第 1 节的思路, 将第 2 节通用故障模型所得的故障修改节点导纳矩阵叠加到正常三序导纳矩阵中, 求解网络方程即可求得全网三序短路电压标么值。为与 PSCAD 仿真结果对比, 进一步求出其三序短路电压有名值, 以节点 6 与节点 10 为例, 其 MATLAB 短路计算与 PSCAD 仿真结果如表 1 所示(以 A 相为基准)。

V/V 牵引变压器型号: SF6/QY-40000/220, 额定容量: 40 MVA, 额定电压: 220 kV/27.5 kV/27.5 kV, 短路电压: 10.36%, PSCAD 仿真模型如图 20 所示<sup>[29]</sup>, 三序短路电压计算与仿真结果如表 2 所示。

Scott 牵引变压器型号: SF9/QY-40000/220, 额定容量: 40 MVA, 额定电压: 220 kV/27.5 kV/27.5 kV, 短路电压: 10.5%, PSCAD 仿真模型如图 21 所示<sup>[29]</sup>, 三序短路电压计算与仿真结果如表 3 所示。

阻抗匹配平衡牵引变压器型号: SF6/QY-20000/220, 额定容量: 20 MVA, 额定电压: 220 kV/27.5 kV/27.5 kV, 短路电压: 8.98%, PSCAD 仿真模型如图 22 所示<sup>[29]</sup>, 三序短路电压计算与仿真结果如表 4 所示。

表 1 组合单相变压器短路计算结果与 PSCAD 仿真结果  
Table 1 Short-circuit calculation result and PSCAD simulation result of combined single-phase transformer

短路类型	故障计算结果/kV	仿真结果/kV		
T 侧接地	$\dot{U}_6^{(1)}$	120.37 $\angle$ -29.70°	120.42 $\angle$ -29.71°	
	$\dot{U}_6^{(2)}$	27.60 $\angle$ -32.76°	27.58 $\angle$ -32.74°	
	$\dot{U}_6^{(0)}$	0	0	
	短路	$\dot{U}_{10}^{(1)}$	108.04 $\angle$ -29.15°	108.09 $\angle$ -29.16°
		$\dot{U}_{10}^{(2)}$	40.48 $\angle$ -33.35°	40.46 $\angle$ -33.34°
		$\dot{U}_{10}^{(0)}$	0	0
F 侧接地	$\dot{U}_6^{(1)}$	120.37 $\angle$ -29.70°	120.42 $\angle$ -29.71°	
	$\dot{U}_6^{(2)}$	27.60 $\angle$ -32.76°	27.58 $\angle$ -32.74°	
	$\dot{U}_6^{(0)}$	0	0	
	短路	$\dot{U}_{10}^{(1)}$	108.04 $\angle$ -29.15°	108.09 $\angle$ -29.16°
		$\dot{U}_{10}^{(2)}$	40.48 $\angle$ -33.35°	40.46 $\angle$ -33.34°
		$\dot{U}_{10}^{(0)}$	0	0
T、F 相间	$\dot{U}_6^{(1)}$	119.36 $\angle$ -29.70°	119.42 $\angle$ -29.71°	
	$\dot{U}_6^{(2)}$	28.60 $\angle$ -32.62°	28.58 $\angle$ -32.61°	
	$\dot{U}_6^{(0)}$	0	0	
	短路	$\dot{U}_{10}^{(1)}$	106.56 $\angle$ -29.15°	106.62 $\angle$ -29.16°
		$\dot{U}_{10}^{(2)}$	41.95 $\angle$ -33.21°	41.92 $\angle$ -33.21°
		$\dot{U}_{10}^{(0)}$	0	0
T、F 相间 短路接地	$\dot{U}_6^{(1)}$	119.36 $\angle$ -29.70°	119.42 $\angle$ -29.71°	
	$\dot{U}_6^{(2)}$	28.60 $\angle$ -32.62°	28.58 $\angle$ -32.61°	
	$\dot{U}_6^{(0)}$	0	0	
	短路	$\dot{U}_{10}^{(1)}$	106.56 $\angle$ -29.15°	106.62 $\angle$ -29.16°
		$\dot{U}_{10}^{(2)}$	41.95 $\angle$ -33.21°	41.92 $\angle$ -33.21°
		$\dot{U}_{10}^{(0)}$	0	0

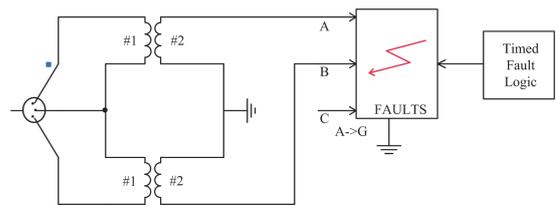


图 20 V/V 牵引变压器 PSCAD 仿真图

Fig. 20 PSCAD simulation of V/V traction transformer

由表 1—表 4 可知, 在忽略误差的情况下, 采用基于牵引变压器通用故障模型及叠加故障修改导纳矩阵方法的 MATLAB 短路计算结果, 与 PSCAD 仿真结果一致, 从而验证了本文理论推导的正确性。

表 2 V/V 牵引变压器短路计算结果与 PSCAD 仿真结果

Table 2 Short-circuit calculation result and PSCAD simulation result of V/V traction transformer

短路类型		故障计算结果/kV	仿真结果/kV
α相接地 短路	$\dot{U}_6^{(1)}$	117.55∠-29.72°	117.56∠-29.73°
	$\dot{U}_6^{(2)}$	30.41∠-152.38°	30.36∠-152.38°
	$\dot{U}_6^{(0)}$	0	0
	$\dot{U}_{10}^{(1)}$	103.90∠-29.14°	103.92∠-29.1°
	$\dot{U}_{10}^{(2)}$	44.61∠-152.97°	44.55∠-152.99°
	$\dot{U}_{10}^{(0)}$	0	0
β相接地 短路	$\dot{U}_6^{(1)}$	117.55∠-29.72°	117.56∠-29.73°
	$\dot{U}_6^{(2)}$	30.41∠-32.38°	30.36∠-32.38°
	$\dot{U}_6^{(0)}$	0	0
	$\dot{U}_{10}^{(1)}$	103.90∠-29.14°	103.92∠-29.15°
	$\dot{U}_{10}^{(2)}$	44.61∠-32.97°	44.55∠-32.99°
	$\dot{U}_{10}^{(0)}$	0	0
α、β相间 短路	$\dot{U}_6^{(1)}$	126.25∠-29.71°	126.27∠-29.72°
	$\dot{U}_6^{(2)}$	21.72∠86.47°	21.65∠86.50°
	$\dot{U}_6^{(0)}$	0	0
	$\dot{U}_{10}^{(1)}$	116.67∠-29.25°	116.66∠-29.26°
	$\dot{U}_{10}^{(2)}$	31.86∠85.88°	31.76∠85.89°
	$\dot{U}_{10}^{(0)}$	0	0
α、β相间 短路接地	$\dot{U}_6^{(1)}$	91.20∠-28.91°	91.29∠-28.94°
	$\dot{U}_6^{(2)}$	13.39∠-88.89°	13.39∠-88.89°
	$\dot{U}_6^{(0)}$	0	0
	$\dot{U}_{10}^{(1)}$	65.34∠-26.80°	65.42∠-26.83°
	$\dot{U}_{10}^{(2)}$	19.64∠-89.48°	19.64∠-89.50°
	$\dot{U}_{10}^{(0)}$	0	0

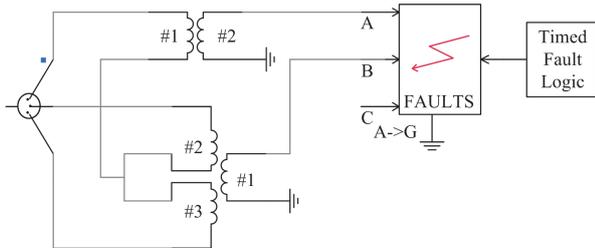


图 21 Scott 牵引变压器 PSCAD 仿真图

Fig. 21 PSCAD simulation of Scott traction transformer

表 3 Scott 牵引变压器短路计算结果与 PSCAD 仿真结果  
Table 3 Short-circuit calculation result and PSCAD simulation result of Scott traction transformer

短路类型		故障计算结果/kV	仿真结果/kV
α相接地 短路	$\dot{U}_6^{(1)}$	126.42∠-29.71°	126.46∠-29.72°
	$\dot{U}_6^{(2)}$	21.56∠146.44°	21.51∠146.48°
	$\dot{U}_6^{(0)}$	0	0
	$\dot{U}_{10}^{(1)}$	116.91∠-29.25°	116.95∠-29.26°
	$\dot{U}_{10}^{(2)}$	31.62∠145.85°	31.57∠145.89°
	$\dot{U}_{10}^{(0)}$	0	0
β相接地 短路	$\dot{U}_6^{(1)}$	126.42∠-29.71°	126.46∠-29.72°
	$\dot{U}_6^{(2)}$	21.56∠-33.56°	21.51∠-33.53°
	$\dot{U}_6^{(0)}$	0	0
	$\dot{U}_{10}^{(1)}$	116.91∠-29.25°	116.95∠-29.26°
	$\dot{U}_{10}^{(2)}$	31.62∠-34.15°	31.57∠-34.14°
	$\dot{U}_{10}^{(0)}$	0	0
α、β相间 短路	$\dot{U}_6^{(1)}$	126.42∠-29.71°	126.46∠-29.72°
	$\dot{U}_6^{(2)}$	21.56∠-123.56°	21.51∠-123.52°
	$\dot{U}_6^{(0)}$	0	0
	$\dot{U}_{10}^{(1)}$	116.91∠-29.25°	116.95∠-29.26°
	$\dot{U}_{10}^{(2)}$	31.62∠-124.15°	31.57∠-124.13°
	$\dot{U}_{10}^{(0)}$	0	0
α、β相间 短路接地	$\dot{U}_6^{(1)}$	104.92∠-28.92°	104.96∠-28.93°
	$\dot{U}_6^{(2)}$	0	0
	$\dot{U}_6^{(0)}$	0	0
	$\dot{U}_{10}^{(1)}$	85.45∠-27.45°	85.49∠-27.46°
	$\dot{U}_{10}^{(2)}$	0	0
	$\dot{U}_{10}^{(0)}$	0	0

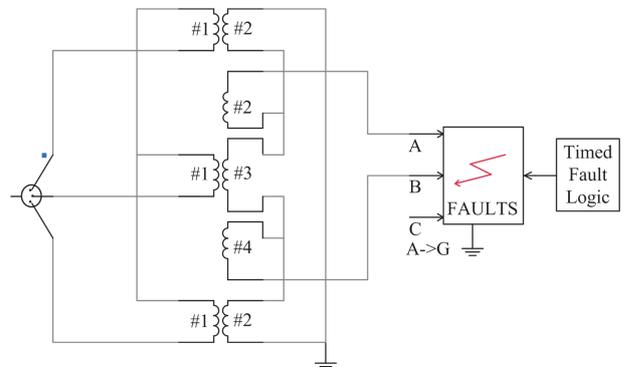


图 22 阻抗匹配平衡变压器 PSCAD 仿真图

Fig. 22 PSCAD simulation of impedance-matching balance traction transformer

表 4 阻抗匹配平衡变压器短路计算与 PSCAD 仿真结果  
Table 4 Short-circuit calculation result and PSCAD simulation result of impedance-matching balance traction transformer

短路类型		故障计算结果/kV	仿真结果/kV
α相接地 短路	$\dot{U}_6^{(1)}$	132.68 ∠ -29.79°	132.71 ∠ -29.80°
	$\dot{U}_6^{(2)}$	15.30 ∠ 175.62°	15.27 ∠ 175.63°
	$\dot{U}_6^{(0)}$	0	0
	$\dot{U}_{10}^{(1)}$	126.08 ∠ -29.46°	126.12 ∠ -29.48°
	$\dot{U}_{10}^{(2)}$	22.45 ∠ 175.03°	22.41 ∠ 175.03°
	$\dot{U}_{10}^{(0)}$	0	0
β相接地 短路	$\dot{U}_6^{(1)}$	132.68 ∠ -29.79°	132.71 ∠ -29.80°
	$\dot{U}_6^{(2)}$	15.30 ∠ -4.38°	15.27 ∠ -4.37°
	$\dot{U}_6^{(0)}$	0	0
	$\dot{U}_{10}^{(1)}$	126.08 ∠ -29.46°	126.12 ∠ -29.48°
	$\dot{U}_{10}^{(2)}$	22.45 ∠ -4.97°	22.41 ∠ -4.97°
	$\dot{U}_{10}^{(0)}$	0	0
α、β相间 短路	$\dot{U}_6^{(1)}$	132.68 ∠ -29.79°	132.71 ∠ -29.80°
	$\dot{U}_6^{(2)}$	15.30 ∠ -94.38°	15.27 ∠ -94.37°
	$\dot{U}_6^{(0)}$	0	0
	$\dot{U}_{10}^{(1)}$	126.08 ∠ -29.46°	126.12 ∠ -29.48°
	$\dot{U}_{10}^{(2)}$	22.45 ∠ -94.97°	22.41 ∠ -94.97°
	$\dot{U}_{10}^{(0)}$	0	0
α、β相间 短路接地	$\dot{U}_6^{(1)}$	117.43 ∠ -29.20°	117.47 ∠ -29.21°
	$\dot{U}_6^{(2)}$	0	0
	$\dot{U}_6^{(0)}$	0	0
	$\dot{U}_{10}^{(1)}$	103.76 ∠ -28.27°	103.79 ∠ -28.29°
	$\dot{U}_{10}^{(2)}$	0	0
	$\dot{U}_{10}^{(0)}$	0	0

### 4 对比分析

为更严格地验证本文所提方法的正确性，本节在第3节所述IEEE 9节点算例系统与牵引变压器参数的基础上，将其与现有方法进行对比验证，该方法需先将三相对称电网部分等效至牵引变压器接入点，再列写故障边界方程进行计算。

在第3节所述算例中，已采用本文所提方法计算出牵引变压器低压侧故障时各节点的三序电压。直接使用该结果中节点6和节点10的三序电压标幺值，即可根据式(36)求得高压侧的三序短路电流标幺值。

$$\dot{i}^{(m)} = \frac{\dot{U}_6^{(m)} - \dot{U}_{10}^{(m)}}{Z_L^{(m)}} - \frac{jB_L^{(m)}}{2} \times \dot{U}_{10}^{(m)}, (m = 1, 2, 0) \quad (36)$$

采用现有方法计算时，对上述IEEE9节点算例系统利用高斯消去法<sup>[30]</sup>进行网络方程的化简，将系统等效到牵引变压器高压侧节点10，可得系统的等效电势为  $\dot{U}_f^{(0)} = 0.9652 - j0.5639 \text{ p.u.}$ ，边界节点处等效阻抗为  $Z_{m1} = Z_{m2} = 0.0227 + j0.1929 \text{ p.u.}$ ，然后参考文献[17-20]分别得到将电网等效后的短路电流计算公式，并求得边界节点处的三序短路电流标幺值。

基于两种方法计算得到的牵引变压器高压侧短路电流结果如表5和表6所示(以A相为基准)。

由表5和表6的分析结果可知，在允许的误差范围内，本文提出的方法(基于牵引变压器通用故障模型并叠加故障修改节点导纳矩阵)与现有方法(将系统等效至边界节点计算)所得的牵引变压器高压侧短路电流结果一致。相比之下，本文方法能直接获取全网短路电压与电流，具有步骤更简、效率更高的优点。因此，它是一种能够统一处理三相对称

表 5 基于两种方法计算得到的不同牵引变压器高压侧三序短路电流标幺值

Table 5 Three-sequence short-circuit current of the high voltage side of various traction transformers with the two methods

牵引 变压器 种类	短路 类型	$\dot{I}_{A1}/\text{p.u.}$		$\dot{I}_{A2}/\text{p.u.}$		$\dot{I}_{A0}/\text{p.u.}$	
		本文方法	现有方法 公式 结果	本文方法	现有方法 公式 结果	本文 方法	现有 方法
组合单 相牵引 变压器	T 侧接地短路	1.57 ∠ -116.65°	$\frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_{ff} + Z_T}$ 1.57 ∠ -116.64°	1.57 ∠ 63.35°	$\dot{I}_{A2} = -\dot{I}_{A1}$ 1.57 ∠ 63.36°	0	0
	F 侧接地 短路	1.57 ∠ -116.65°	$\frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_{ff} + Z_T}$ 1.57 ∠ -116.64°	1.57 ∠ 63.35°	$\dot{I}_{A2} = -\dot{I}_{A1}$ 1.57 ∠ 63.36°	0	0
	T、F 相间短路	1.63 ∠ -116.51°	$\frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_{ff} + Z_T}$ 1.63 ∠ -116.51°	1.63 ∠ 63.49°	$\dot{I}_{A2} = -\dot{I}_{A1}$ 1.63 ∠ 63.49°	0	0
	T、F 相间 短路接地	1.63 ∠ -116.51°	$\frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_{ff} + Z_T}$ 1.63 ∠ -116.51°	1.63 ∠ 63.49°	$\dot{I}_{A2} = -\dot{I}_{A1}$ 1.63 ∠ 63.49°	0	0

续表 1

牵引 变压器 种类	短路 类型	$\dot{I}_{A1}/\text{p.u.}$			$\dot{I}_{A2}/\text{p.u.}$			$\dot{I}_{A0}/\text{p.u.}$	
		本文方法	现有方法		本文方法	现有方法		本文 方法	现有 方法
			公式	结果		公式	结果		
V/V 牵引 变压器	$\alpha$ 相接地 短路	$1.73 \angle -116.27^\circ$	$\frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_{ff} + Z_T}$	$1.73 \angle -116.27^\circ$	$1.73 \angle -56.27^\circ$	$\dot{I}_{A2} = \dot{I}_{A1} \angle 60^\circ$	$1.73 \angle -56.27^\circ$	0	0
	$\beta$ 相接地 短路	$1.73 \angle -116.27^\circ$	$\frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2Z_{ff} + Z_T}$	$1.73 \angle -116.27^\circ$	$1.73 \angle 63.73^\circ$	$\dot{I}_{A2} = -\dot{I}_{A1}$	$1.73 \angle 63.73^\circ$	0	0
	$\alpha$ 、 $\beta$ 相间短路	$1.24 \angle -117.42^\circ$	$\frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2(Z_{ff} + Z_T)}$	$1.24 \angle -117.42^\circ$	$1.24 \angle -177.42^\circ$	$\dot{I}_{A2} = \dot{I}_{A1} \angle -60^\circ$	$1.24 \angle -177.42^\circ$	0	0
	$\alpha$ 、 $\beta$ 相间 短路接地	$3.23 \angle -116.33^\circ$	$\frac{\dot{U}_f^{(0)}(3Z_{ff} + 2Z_T)}{(3Z_{ff} + Z_T)(Z_{ff} + Z_T)}$	$3.23 \angle -116.32^\circ$	$0.76 \angle 7.22^\circ$	$\dot{I}_{A2} = \frac{Z_T \angle 120^\circ}{3Z_{ff} + 2Z_T} \dot{I}_{A1}$	$0.76 \angle 7.23^\circ$	0	0
Scott 牵引 变压器	$\alpha$ 相接地 短路	$1.23 \angle -117.44^\circ$	$\frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2(Z_{ff} + Z_T)}$	$1.23 \angle -117.44^\circ$	$1.23 \angle -117.44^\circ$	$\dot{I}_{A2} = \dot{I}_{A1}$	$1.23 \angle -117.44^\circ$	0	0
	$\beta$ 相接地 短路	$1.23 \angle -117.44^\circ$	$\frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2(Z_{ff} + Z_T)}$	$1.23 \angle -117.44^\circ$	$1.23 \angle 62.56^\circ$	$\dot{I}_{A2} = -\dot{I}_{A1}$	$1.23 \angle 62.56^\circ$	0	0
	$\alpha$ 、 $\beta$ 相间短路	$1.23 \angle -117.44^\circ$	$\frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2(Z_{ff} + Z_T)}$	$1.23 \angle -117.44^\circ$	$1.23 \angle -27.44^\circ$	$\dot{I}_{A2} = \dot{I}_{A1} \angle 90^\circ$	$1.23 \angle -27.44^\circ$	0	0
	$\alpha$ 、 $\beta$ 相间 短路接地	$2.45 \angle -117.44^\circ$	$\frac{\dot{U}_f^{(0)}}{Z_{ff} + Z_T}$	$2.45 \angle -117.44^\circ$	0	0	0	0	0
阻抗 匹配 平衡 牵引 变压器	$\alpha$ 相接地 短路	$0.87 \angle -118.27^\circ$	$\frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2(Z_{ff} + Z_T)}$	$0.87 \angle -118.27^\circ$	$0.87 \angle -88.27^\circ$	$\dot{I}_{A2} = \dot{I}_{A1} \angle 30^\circ$	$0.87 \angle -88.27^\circ$	0	0
	$\beta$ 相接地 短路	$0.87 \angle -118.27^\circ$	$\frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2(Z_{ff} + Z_T)}$	$0.87 \angle -118.27^\circ$	$0.87 \angle 91.73^\circ$	$\dot{I}_{A2} = \dot{I}_{A1} \angle -150^\circ$	$0.87 \angle 91.73^\circ$	0	0
	$\alpha$ 、 $\beta$ 相间短路	$0.87 \angle -118.27^\circ$	$\frac{\dot{U}_f^{(0)}}{2(Z_{ff} + Z_T)}$	$0.87 \angle -118.27^\circ$	$0.87 \angle 1.73^\circ$	$\dot{I}_{A2} = \dot{I}_{A1} \angle 120^\circ$	$0.87 \angle 1.73^\circ$	0	0
	$\alpha$ 、 $\beta$ 相间 短路接地	$1.74 \angle -118.27^\circ$	$\frac{\dot{U}_f^{(0)}}{Z_{ff} + Z_T}$	$1.74 \angle -118.27^\circ$	0	0	0	0	0

表 6 基于两种方法计算得到的不同牵引变压器高压侧三相短路电流有名值

Table 6 Three-phase short-circuit current of the high voltage side of various traction transformers with the two methods

牵引变压器 种类	短路类型	$\dot{I}_A/\text{kA}$		$\dot{I}_B/\text{kA}$		$\dot{I}_C/\text{kA}$	
		本文方法	现有方法	本文方法	现有方法	本文方法	现有方法
组合单相 牵引变压器	T 侧接地短路	0	0	$0.68 \angle 153.35^\circ$	$0.68 \angle 153.36^\circ$	$0.68 \angle -26.65^\circ$	$0.68 \angle -26.64^\circ$
	F 侧接地短路	0	0	$0.68 \angle 153.35^\circ$	$0.68 \angle 153.36^\circ$	$0.68 \angle -26.65^\circ$	$0.68 \angle -26.64^\circ$
	T、F 相间短路	0	0	$0.71 \angle 153.49^\circ$	$0.71 \angle 153.49^\circ$	$0.71 \angle -26.51^\circ$	$0.71 \angle -26.51^\circ$
	T、F 相间 短路接地	0	0	$0.71 \angle 153.49^\circ$	$0.71 \angle 153.49^\circ$	$0.71 \angle -26.51^\circ$	$0.71 \angle -26.51^\circ$
V/V 牵引 变压器	$\alpha$ 相接地短路	$0.75 \angle -86.27^\circ$	$0.75 \angle -86.27^\circ$	$0.75 \angle 93.73^\circ$	$0.75 \angle 93.73^\circ$	0	0
	$\beta$ 相接地短路	0	0	$0.75 \angle 153.73^\circ$	$0.75 \angle 153.73^\circ$	$0.75 \angle -26.27^\circ$	$0.75 \angle -26.27^\circ$
	$\alpha$ 、 $\beta$ 相间短路	$0.54 \angle -147.42^\circ$	$0.54 \angle -147.42^\circ$	0	0	$0.54 \angle 32.58^\circ$	$0.54 \angle 32.58^\circ$
	$\alpha$ 、 $\beta$ 相间短路 接地	$0.72 \angle -103.63^\circ$	$0.72 \angle -103.62^\circ$	$1.00 \angle 124.35^\circ$	$1.00 \angle 124.36^\circ$	$0.75 \angle -9.57^\circ$	$0.75 \angle -9.56^\circ$
Scott 牵引 变压器	$\alpha$ 相接地短路	$0.62 \angle -117.44^\circ$	$0.62 \angle -117.44^\circ$	$0.31 \angle 62.56^\circ$	$0.31 \angle 62.56^\circ$	$0.31 \angle 62.56^\circ$	$0.31 \angle 62.56^\circ$
	$\beta$ 相接地短路	0	0	$0.53 \angle 152.56^\circ$	$0.53 \angle 152.56^\circ$	$0.53 \angle -27.44^\circ$	$0.53 \angle -27.44^\circ$
	$\alpha$ 、 $\beta$ 相间短路	$0.44 \angle -72.44^\circ$	$0.44 \angle -72.44^\circ$	$0.60 \angle 107.56^\circ$	$0.60 \angle 107.56^\circ$	$0.16 \angle -72.44^\circ$	$0.16 \angle -72.44^\circ$
	$\alpha$ 、 $\beta$ 相间短 路接地	$0.62 \angle -117.44^\circ$	$0.62 \angle -117.44^\circ$	$0.62 \angle 122.56^\circ$	$0.62 \angle 122.56^\circ$	$0.62 \angle 2.56^\circ$	$0.62 \angle 2.56^\circ$
阻抗匹配 平衡牵引 变压器	$\alpha$ 相接地短路	$0.42 \angle -103.27^\circ$	$0.42 \angle -103.27^\circ$	$0.31 \angle 76.73^\circ$	$0.31 \angle 76.73^\circ$	$0.11 \angle 76.73^\circ$	$0.11 \angle 76.73^\circ$
	$\beta$ 相接地短路	$0.11 \angle 166.73^\circ$	$0.11 \angle 166.73^\circ$	$0.31 \angle 166.73^\circ$	$0.31 \angle 166.73^\circ$	$0.42 \angle -13.27^\circ$	$0.42 \angle -13.27^\circ$
	$\alpha$ 、 $\beta$ 相间短路	$0.22 \angle -58.27^\circ$	$0.22 \angle -58.27^\circ$	$0.44 \angle 121.73^\circ$	$0.44 \angle 121.73^\circ$	$0.22 \angle -58.27^\circ$	$0.22 \angle -58.27^\circ$
	$\alpha$ 、 $\beta$ 相间短 路接地	$0.44 \angle -118.27^\circ$	$0.44 \angle -118.27^\circ$	$0.44 \angle 121.73^\circ$	$0.44 \angle 121.73^\circ$	$0.44 \angle 1.73^\circ$	$0.44 \angle 1.73^\circ$

系统、并更简便通用地实现计及牵引变压器的电网短路计算方法。

### 5 结论

本文对计及牵引变压器的电网短路计算通用方法进行了研究,提出了基于牵引变压器通用故障模型、利用故障修改节点导纳矩阵实现全网短路计算的方法,对常见牵引变压器低压侧故障时的过程进行了详细的分析与推导,并将该方法与仿真结果及现有方法进行了对比验证。具体贡献如下:

1) 提出了适用于不同牵引变压器、不同故障场景的通用故障模型以及统一求解方法,该方法更易于整合到现有故障计算软件程序中。

2) 该方法通过求解网络方程,可以直接得到全网短路电压、电流,能够更准确、高效地实现计及牵引变压器的电网短路计算。

3) 由于导纳矩阵具有可叠加性,该方法还可以实现计及牵引变压器的电网多重故障计算。

目前,基于本文所提方法开发的软件程序包已成功运用于湖北电网的故障计算工作中。

### 参考文献

[1] 刘国胜,李泽文,夏翊翔,等.基于电流行波高频能量比值的全并联 AT 牵引网单端故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(6):99-108.  
LIU Guosheng, LI Zewen, XIA Yixiang, et al. Single-end fault localization method for an all-parallel AT traction network based on high-frequency energy ratio of current traveling waves[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 99-108.

[2] 罗忠游,赵普志,段玉,等.电气化铁路接入风电汇集地区电网的负序优化补偿策略研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(19):124-134.  
LUO Zhongyou, ZHAO Puzhi, DUAN Yu, et al. A negative sequence optimization compensation strategy for an electrified railway connected to wind power integration areas[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 124-134.

[3] JIANG Xiaofeng, HAN Xiaoyan, LIU Lei, et al. Transient stability analysis of power system considering traction load[C]//2023 IEEE International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, October 8-12, 2023, Xuchang, China: 339-344.

[4] CHEN Richeng, YANG Yaxi, JIN Tao. A hierarchical coordinated control strategy based on multi-port energy router of urban rail transit[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(2): 1-12.

[5] 刘国胜,李泽文,夏翊翔,等.基于电流行波高频能量比值的全并联 AT 牵引网单端故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(6):99-108.

LIU Guosheng, LI Zewen, XIA Yixiang, et al. Single-end fault localization method for an all-parallel AT traction network based on high-frequency energy ratio of current traveling waves[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 99-108.

[6] ZHU Jun, LI Zhaoyang, XIE Yu, et al. Real-time detection of low-frequency oscillations in traction power supply systems based on optimized atomic decomposition[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(6): 49-62.

[7] BENSLIMANE A, BOUCHNAIF J, ESSOUFI M, et al. Comparative study of semiconductor power losses between CSI-based STATCOM and VSI-based STATCOM, both used for unbalance compensation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-14.

[8] 吴游龙,韩正庆,刘淑萍.基于 GA-PSO 的牵引供电系统自愈重构策略研究[J].电力系统保护与控制,2025,53(14):80-89.  
WU Youlong, HAN Zhengqing, LIU Shuping. Research on self-healing reconfiguration strategy for traction power supply systems based on GA-PSO[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(14): 80-89.

[9] ZHANG Liyan, LIANG Shiwen, LI Xin, et al. Modelling on novel cable traction power supply system and power distribution analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(2): 745-754.

[10] FIGURNOV E P, ZHARKOV Y I, GERMAN L A, et al. Parameters of equivalent circuits for external and traction power supply systems during short circuits in a contact network[J]. Power Technology and Engineering, 2022, 55(6): 960-966.

[11] 车玉龙,吕晓琴,王晓茹.考虑相关性的牵引负荷功率对电网影响概率分析[J].中国电机工程学报,2022,42(9):3250-3261.  
CHE Yulong, LÜ Xiaoqin, WANG Xiaoru. Probabilistic analysis of impact of traction load power on power grid considering correlation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3250-3261.

[12] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.牵引站供电线路的继电保护配置及整定计算原则:GB/T 38435—2019[S].北京:中国标准出版社,2019.  
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Specification for protection configuration and setting for transmission line of electrified railway traction station: GB/T 38435—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

[13] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.220 kV~750 kV 电网继电保护装置运行整定规程:DL/T 559—2007[S].北京:中国电力出版社,2007.  
National Development and Reform Commission. Setting guide for 220 kV~750 kV power system protection equipment: DL/T 559—2007[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.

- [14] OGHORADA O J K, ZHANG Li, HAN Huang, et al. Inter-cluster voltage balancing control of a delta connected modular multilevel cascaded converter under unbalanced grid voltage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(3): 1-11.
- [15] 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.  
WANG Jingjun, ZHANG Yu'e, LIU Hua, et al. Analysis on the equivalent impedances based on respective phase method in traction power supply system for electrified railway and the checkback for line distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 141-144.
- [16] 王勋, 刘润田. 电牵引供电系统故障的对称分量统一解析法[J]. 华东交通大学学报, 1994, 11(1): 25-34.  
WANG Xun, LIU Runtian. Unified analysis method of symmetrical components of electric traction power supply system faults[J]. Journal of East China Jiaotong University, 1994, 11(1): 25-34.
- [17] 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 power grid considering unsymmetrical two-phase railway power supply system[J]. Relay, 2007, 35(8): 21-26.
- [18] 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.
- [19] 侯瑞鹏, 张永浩, 周庆捷, 等. 计及 Scott 牵引变压器的短路计算方法研究[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(4): 102-105.  
HOU Ruipeng, ZHANG Yonghao, ZHOU Qingjie, et al. Study on short-circuit calculation methods of Scott traction transformers[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(4): 102-105.
- [20] 陈博, 石东源, 罗深增, 等. 计及阻抗匹配平衡牵引变压器的电网短路计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 33-39.  
CHEN Bo, SHI Dongyuan, LUO Shenzeng, et al. Short-circuit calculation methods for the grid considering impedance-matching balance traction transformers[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 33-39.
- [21] 陈亚民. 电力系统计算程序及其实现[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [22] 陈博. 计及牵引供电系统不对称性的电力系统故障计算及整定计算研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- CHEN Bo. Research on fault analysis and relay coordination for unsymmetrical power system with railway power supply system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [23] 邱关源. 电路[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [24] 刘巍. V/V 接线变压器差动保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 130-134.  
LIU Wei. Study on differential protection scheme for V/V connection transformer[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 130-134.
- [25] 汤大海, 严国平, 易新. 220kV 线路距离保护在 V/X 接线牵引变压器短路时的测量阻抗分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 160-165.  
TANG Dahai, YAN Guoping, YI Xin. Measurement impedance analysis of 220kV line distance protection during short circuit of traction transformer in V/X connection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 160-165.
- [26] 吴命利, 范瑜, 辛成山. Scott 接线牵引变压器运行特性与等值模型研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18(4): 75-80.  
WU Mingli, FAN Yu, XIN Chengshan. Study on operation characteristics and equivalent model of Scott connection traction transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(4): 75-80.
- [27] 吴命利, 范瑜. 星形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.
- [28] 安德逊 P M, 佛阿德 A A. 电力系统的控制与稳定[M]. 北京: 水利电力出版社, 1979.
- [29] 逢燕. 电铁对电网电能质量影响的评估及治理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.  
PANG Yan. Research on evaluation and mitigation of the power quality affected by electrified railways on the power grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [30] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(上)[M]. 4 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016.

收稿日期: 2025-03-06; 修回日期: 2025-07-20

作者简介:

余梦琪(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为计及牵引变压器的电网短路计算; E-mail: 1452390090@qq.com

杨增力(1982—), 男, 工学博士, 正高级工程师, 从事电力系统继电保护研究和管理相关工作。E-mail: yangzl\_bh@163.com

(编辑 魏小丽)