

# 阻抗匹配平衡变压器差动保护技术及应用

马水生<sup>1</sup>, 张亮<sup>1</sup>, 李延军<sup>2</sup>, 徐冰<sup>2</sup>

(1. 许继电气公司, 河南 许昌 461000; 2 北京铁路局石家庄供电段, 河北 石家庄 050000)

**摘要:** 介绍了电气化铁道阻抗匹配平衡变压器的平衡匹配机制原理, 并进一步就平衡匹配关系数学模型的搭建和变压器高低压侧电流变化的规律进行了推理分析。解析了差动保护在阻抗匹配平衡变压器中如何实现以及铁路电气化差动保护在实现过程中为防止误动作所增加的一些判据。阻抗匹配平衡变压器在电气化铁路建设中广泛应用, 其差动保护逻辑和判据已完全由微机来实现, 所提的计算方法和理论研究对于阻抗匹配平衡变压器保护设备的开发和应用具有较高的实用价值。

**关键词:** 差动保护; 阻抗匹配; 平衡; 负载; 励磁涌流; 比率制动特性

## Technology and application of impedance matching balance transformer differential protection

MA Shui-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Liang<sup>1</sup>, LI Yan-jun<sup>2</sup>, XU Bing<sup>2</sup>

(1. XJ Electric Corporation, Xuchang 461000, China;

2. Shijiazhuang Supply Section, Beijing Railroad Bureau, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** This paper introduces the principle of balance matching mechanism of the electric railway impedance matching balance transformer, and for further, the building of the mathematical model of balance matching relations and the law of current change between high and low pressure side, how to achieve differential protection in impedance matching balance transformer and some criterion added in the realization of railway electrification process in order to prevent malfunction are analyzed. Impedance matching balance transformer is widely used in electrification of railway construction, and its logic and criteria of differential protection has been achieved entirely by computer. The proposed calculation method and theoretical study have high practical value for the development and application of impedance matching balance transformer protection equipment.

**Key words:** differential protection; impedance matching; balance; load; inrush current; percentage restraint characteristic

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)06-0140-04

## 0 引言

在牵引变电所中, 过去主要采用常规的 Y/Δ-11 变压器, 将电能从电力网输入牵引接触网中, 实现铁路牵引供电。在这种情况下, 由于牵引负载不平衡会将负序和零序等不对称量传输到电力网。对于电力网来说, 不对称量是电力垃圾, 很难消除。阻抗匹配平衡变压器的推出, 经过近几年的实践应用和不断完善, 很好地解决了不对称量对电力网影响的大难题, 在我国电气化铁道牵引供电中得到大量应用。

平衡变压器低压侧接电气化铁道上行线和下行线两相负载, 两相负荷的电流随列车的运行情况变化而变化; 高压侧接三相电力系统。其最大优点是: 在低压侧两相不对称负荷的各种运行方式下, 变压器高压侧三相电流具有较好的对称性, 即

$$3\dot{I}_0 = \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C}{3} = 0, \text{ 减小了不对称量对电力系统}$$

的影响, 提高了系统的电能质量。

平衡变压器虽然解决了不对称量对电力网影响问题, 由于其在结构性能上与 Y/Δ-11 电力变压器有很大的不同, 变压器低压侧两相电流相位差为 90°, 高压侧电流与低压侧电流相位差随列车运行方式的变化在 0°~90°之间变化。以上这些特点, 给设计平衡变压器的差动保护带来了困难; 同时与传统电力变压器差动保护实现方式迥异, 保护原理不容易理解。

## 1 阻抗匹配平衡变压器数学模型分析

首先, 我们对阻抗匹配平衡变压器进行数学模型分析。

不妨设  $Z_{ab} = \lambda \cdot Z_{ac} = \lambda \cdot Z_{bc}$ ,  $W_1/W_2 = K$ ,

$$W_{ad}=W_{bc}=\delta \cdot W_2$$

$$\text{即: } W_1/W_{ad}=W_1/W_{bc}=W_1/(\delta \cdot W_2)=K/\delta$$

当只有  $\dot{I}_\alpha$  电流时, 以流出节点  $a$  电流为正向,

$$\text{有 } \dot{I}_\alpha + \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{ab} = 0$$

图 1 为平衡变压器高低压侧绕组关系。

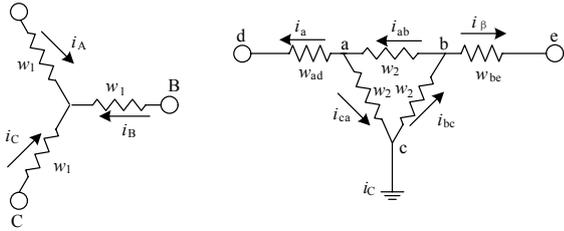


图 1 阻抗匹配平衡变压器高低压侧绕组关系图

Fig.1 High voltage winding diagram of matching balance transformer

图中:  $W_1$  为变压器原边相绕组匝数;  $W_2$  为副边相绕组匝数;  $\Delta W$  为支臂匝数。

变压器副边三角形电流分配关系为:

$$\dot{U}_{ca} = Z_{ca} \cdot \dot{I}_{ca} = Z_{bc} \cdot \dot{I}_{bc} + Z_{ab} \cdot \dot{I}_{ab} =$$

$$Z_{bc} \cdot \dot{I}_{bc} + \lambda \cdot Z_{bc} \cdot \dot{I}_{ab} = (1 + \lambda) \cdot Z_{bc} \cdot \dot{I}_{bc}$$

则低压侧绕组电流分别为:

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\lambda + 1}{\lambda + 2} \dot{I}_\alpha \quad \dot{I}_{bc} = -\frac{1}{\lambda + 2} \dot{I}_\alpha$$

$$\dot{I}_{ab} = -\frac{1}{\lambda + 2} \dot{I}_\alpha$$

当只有  $\dot{I}_\beta$  电流时, 以流出节点  $b$  电流为正向,

低压侧绕组电流分别为:

$$\dot{I}_{ca} = \frac{1}{\lambda + 2} \dot{I}_\beta$$

$$\dot{I}_{bc} = -\frac{\lambda + 1}{\lambda + 2} \dot{I}_\beta \quad \dot{I}_{ab} = \frac{1}{\lambda + 2} \dot{I}_\beta$$

因此, 当分别有  $\dot{I}_\alpha$  和  $\dot{I}_\beta$  电流时, 低压侧绕组

电流分别为:

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\lambda + 1}{\lambda + 2} \dot{I}_\alpha + \frac{1}{\lambda + 2} \dot{I}_\beta$$

$$\dot{I}_{ab} = -\frac{1}{\lambda + 2} \dot{I}_\alpha + \frac{1}{\lambda + 2} \dot{I}_\beta$$

$$\dot{I}_{bc} = -\frac{1}{\lambda + 2} \dot{I}_\alpha - \frac{\lambda + 1}{\lambda + 2} \dot{I}_\beta$$

而平衡臂绕组线圈与高压侧  $B$  相绕在一起, 则  
有下面公式:

$$\dot{I}_A = \frac{1}{k} \left( \frac{\lambda + 1}{\lambda + 2} \dot{I}_\alpha + \frac{1}{\lambda + 2} \dot{I}_\beta \right)$$

$$\dot{I}_B = \frac{1}{K} \left( -\frac{1}{\lambda + 2} \dot{I}_\alpha + \frac{1}{\lambda + 2} \dot{I}_\beta \right) + \frac{\delta}{K} (-\dot{I}_\alpha + \dot{I}_\beta)$$

$$\dot{I}_C = \frac{1}{K} \left( -\frac{1}{\lambda + 2} \dot{I}_\alpha - \frac{\lambda + 1}{\lambda + 2} \dot{I}_\beta \right)$$

用行列式表示为:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{K(\lambda + 2)} \begin{bmatrix} \lambda + 1 & 1 \\ -1 - \delta(\lambda + 2) & 1 + \delta(\lambda + 2) \\ -1 & -(\lambda + 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据平衡变压器高压侧零序电流为 0 的原则有  
公式 (2):

$$3 \dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \quad (2)$$

即  $\frac{1}{K} \left[ \left( \frac{\lambda + 1}{\lambda + 2} - \frac{2}{\lambda + 2} - \delta \right) \dot{I}_\alpha - \left( \frac{\lambda + 1}{\lambda + 2} - \frac{2}{\lambda + 2} - \delta \right) \dot{I}_\beta \right] = 0$  简化公

式即得:  $\delta = \frac{\lambda - 1}{\lambda + 2}$

根据低压侧电压向量关系可得图 2。

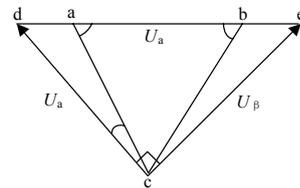


图 2 阻抗匹配平衡变压器低压侧电压向量关系

Fig.2 Low voltage side of voltage vector relationship of matching balance transformer

$$\frac{U_{ad}}{U_B} = \frac{W_{ad}}{W_1}$$

$$\frac{U_{ac}}{U_A} = \frac{U_{ab}}{U_B} = \frac{U_{bc}}{U_C} = \frac{W_2}{W_1}$$

根据三角正弦定理可得:

$$\frac{U_{ad}}{\sin 15^\circ} = \frac{U_{ac}}{\sin 45^\circ}, \text{ 即 } \delta = \frac{W_{ad}}{W_2} = \frac{\sin 15^\circ}{\sin 45^\circ} = \frac{\sqrt{3} - 1}{2}$$

$$\delta = \frac{\lambda - 1}{\lambda + 2} = \frac{\sqrt{3} - 1}{2}, \text{ 从而可得: } \lambda = \sqrt{3} + 1.$$

把  $\lambda$  和  $\delta$  代入行列式便得:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{6K} \begin{bmatrix} \sqrt{3}+1 & \sqrt{3}-1 \\ -2 & 2 \\ -(\sqrt{3}-1) & -(\sqrt{3}+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

公式(3)为平衡变压器高低压侧绕组之间的电流矩阵关系。

若变压器高压侧为 110 kV 等级

$$\text{系数: } K = \frac{W_1}{W_2} = \frac{110/\sqrt{3}}{U_{ac}}$$

$$\text{而: } \frac{27.5}{\sin 120^\circ} = \frac{U_{ac}}{\sin 45^\circ}$$

则

$$K = \frac{W_1}{W_2} = \frac{110/\sqrt{3}}{U_{ac}} = \frac{110/\sqrt{3}}{(27.5 \sin 45^\circ / \sin 120^\circ)} = \frac{4}{\sqrt{2}}$$

若高压侧电压等级为 220 kV, 则  $K = 8/\sqrt{2}$ 。

由公式(3)可推出高压侧绕组线电流与低压侧绕组的矩阵关系:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{AB} \\ \dot{I}_{BC} \\ \dot{I}_{CA} \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} 1.366 & -0.366 \\ -0.366 & 1.366 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

## 2 差动保护的应用

阻抗匹配变压器差动保护接线如图 3。

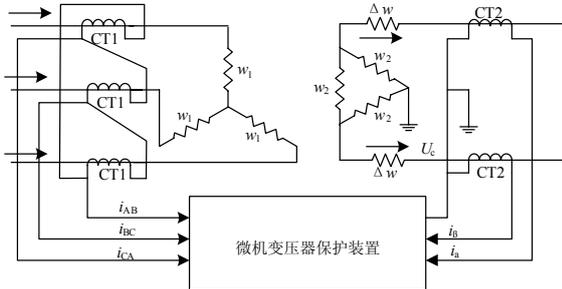


图 3 阻抗匹配平衡变压器差动保护接线图

Fig.3 Differential protection wiring diagram of matching balance transformer

变压器两侧电流平衡关系 (CT 二次侧) 如式 (5)。

$$\begin{bmatrix} i_A - i_B \\ i_B - i_C \\ i_C - i_A \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \frac{nT_2}{nT_1} \begin{bmatrix} 1.366 & -0.366 \\ -0.366 & 1.366 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式 (5) 中:  $K_{ph} = K \frac{nT_1}{nT_2}$

AB 相差动电流

$$i_{dz} = \left| i_A - i_B - 1.366 \frac{nT_2}{KnT_1} i_\alpha + 0.366 \frac{nT_2}{KnT_1} i_\beta \right| \quad (6)$$

AB 相制动电流

$$i_{zd} = \frac{1}{2} \left| i_A - i_B + 1.366 \frac{nT_2}{KnT_1} i_\alpha - 0.366 \frac{nT_2}{KnT_1} i_\beta \right| \quad (7)$$

BC 相、CA 相差动电流、制动电流计算类似。

为躲避区外故障时保护误动, 需引入比率制动特性判据。阻抗匹配平衡变压器比率差动动作特性如图 4。

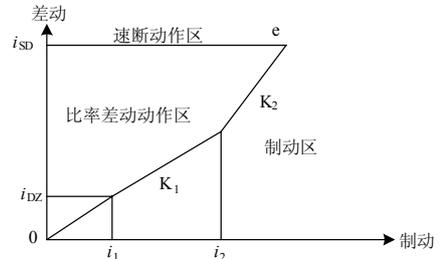


图 4 阻抗匹配平衡变压器比率差动动作特性

Fig 4 Ratio differential operating characteristics of matching balance transformer

比率差动保护判据为:

$$\begin{cases} i_{CD} \geq i_{DZ} & i_{DZ} \leq i_1 & (8) \\ i_{CD} - K_1(i_{DZ} - i_1) \geq i_{DZ} & i_1 < i_{DZ} \leq i_2 & (9) \\ i_{CD} - K_1(i_2 - i_1) + K_{2i} - K_{2iDZ} \geq i_{DZ} & i_{DZ} > i_2 & (10) \end{cases}$$

式中:  $i_{CD}$  为差动电流, 按式(6)计算;  $i_{DZ}$  为制动电流, 按式(7)计算;  $i_{DZ}$  为差动电流整定值;  $i_1$  为制动电流 I 段整定值;  $i_2$  为制动电流 II 段整定值;  $K_1$  为 I 段比率制动系数;  $K_2$  为 II 段比率制动系数。

为防止变压器空投时产生的励磁涌流影响, 增加二次谐波闭锁判据:

$$\begin{cases} i_{2A} \geq K i_{CDA} \\ i_{2B} \geq K i_{CDB} \\ i_{2C} \geq K i_{CDC} \end{cases} \quad (11)$$

## 3 小结

阻抗匹配平衡牵引变压器的差动保护方案跟电力变压器迥异, 用常规差动继电器实现该变压器差动保护时非常麻烦, 必须配备辅助变流器和复杂

的电子逻辑电路, 安装调试、运行维护时十分困难。随着微机变压器保护的成熟和完善, 现在平衡牵引变压器主要采用微机型变压器保护, 其差动保护省去了辅助变流器, 复杂的保护逻辑和判据完全由装置内部软件完成, 运行维护方便、可靠性高, 在电气化铁道中得到了广泛采用。本文通过对阻抗匹配平衡变压器差动保护实现技术的推理和分析, 希望能够使相关技术人员对该类变压器差动保护原理的理解具有一定的指导帮助作用。

### 参考文献

- [1] 高仕斌. 高速铁路牵引供电系统新型保护原理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [2] 王守平, 佟舟, 陈永富. 阻抗匹配平衡变压器变比测试方法的探讨[J]. 电气化铁道, 2003 (5): 34-35, 37.
- [3] 张志文, 刘福生, 熊芝耀, 等. 阻抗匹配平衡变压器的电量变换和运行计算[J]. 电工技术学报, 2000(2): 6-11, 53.  
ZHANG Zhi-wen, LIU Fu-sheng, XIONG Zhi-yao, et al. Electrical transformations and operating calculations on the impedance matching balance transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000 (2): 6-11, 53.
- [4] 贺家李. 电力系统继电保护原理[M]. 增订版. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [5] 高然. 电气化铁路负序电流对发电机负序过流保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 41-45.

(上接第 139 页 continued from page 139)

- [10] 郑斌毅, 吴元熙. 交、直流滤波器中电力电容器的运行和改造[J]. 电力电容器, 2006 (2) :30-34.  
ZHENG Bin-yi, WU Yuan-xi. Operation and improvement of power capacitors in AC/ DC filters[J]. Power Capacitors, 2006(2):30-34.
- [11] 张望, 郝俊芳, 曹森, 等. 直流输电换流站无功功率控制功能设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 72-76.  
ZHANG Wang, HAO Jun-fang, CAO Sen, et al. Design of reactive power control for HVDC converter station[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 72-76.
- [12] 钟庆, 张尧, 杨金明, 等. 现代控制技术在高压直流输电系统中的应用及其发展[J]. 继电器, 2006, 34(9): 80-86.  
ZHONG Qing, ZHANG Yao, YANG Jin-ming, et al. Review on application and development of modern control technologies in HVDC systems[J]. Relay, 2006, 34(9): 80-86.
- [13] 赵曙光, 赵明英, 王军宁, 等. 混合滤波系统中无源滤波器的均匀设计多目标优化方法[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(10): 7-11.  
ZHAO Shu-guang, ZHAO Ming-ying, WANG Jun-ning, et al. Uniform design based multi-objective evolutionary design approach for passive power filters in hybrid power

filter system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(10): 7-11.

- [6] 郭东, 杨健维, 赵静. 一种基于牛顿法的交流高速铁路牵引供电潮流计算方法的研究[J]. 继电器, 2007, 35(18): 16-20, 29.  
GUO Dong, YANG Jian-wei, ZHAO Jing. Research on a flow analysis method of power supply system for AC high speed railway based on Newton method[J]. Relay, 2007, 35(18): 16-20, 29.
- [7] 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 Dong-yuan, YANG Xiong-ping. Comparison of fault calculation methods for transmission network considering unsymmetrical two-phase railway power supply system[J]. Relay, 2007, 35(8): 21-26.

收稿日期: 2010-03-01; 修回日期: 2010-12-06

作者简介:

马水生 (1974-), 男, 工程师, 本科, 从事电气化铁道继电保护产品设计、调试; E-mail: mashsh2008@163.com

张亮 (1980-), 男, 工程师, 本科, 从事电气化铁道继电保护产品设计、调试及应用;

李延军 (1963-), 男, 工程师, 大专, 从事电气化铁道设备运行管理。

filter system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(10): 7-11.

- [14] 吴娅妮, 吕鹏飞, 等. 交流滤波器高压电容器不平衡保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 56-59.  
WU Ya-ni, Lü Peng-fei, et al. The new theory about the unbalance current protection of AC filter HV capacitor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 56-59.
- [15] 缙新科, 牟英, 汪昶江, 等. 并联混合型有源电力滤波器仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 13-15.  
GOU Xin-ke, MOU Ying, WANG Chang-jiang, et al. Simulation of shunt hybrid active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 13-15.

收稿日期: 2010-03-29; 修回日期: 2010-05-25

作者简介:

段涛 (1981-), 男, 硕士, 从事超(特)高压运检工作; E-mail: tower1981@126.com

张智勇 (1979-), 男, 工程师, 从事超(特)高压运检工作;

李德建 (1980-), 男, 高级工, 从事超(特)高压运检工作。