

# 基于 PSCAD 的阻抗匹配平衡变压器仿真研究

程 建

(东台市供电公司, 江苏 东台 214200)

**摘 要:** 研究了阻抗匹配平衡变压器的接线和内部“阻抗匹配”特性, 结合多绕组变压器的电磁耦合关系, 以电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中的统一电磁等值电路 (UMEC) 变压器模型为基础, 建立了电气化铁路牵引供电系统的仿真模型。对正常运行、故障状态、励磁涌流等情况进行了仿真和分析, 仿真结果验证了该模型的正确性, 对于阻抗匹配平衡变压器的现场运行具有一定的指导意义。

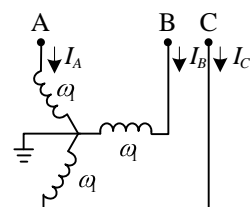
**关键词:** 阻抗匹配平衡变压器; PSCAD/EMTDC 仿真软件; 暂态仿真; 牵引供电系统

## 0 引言

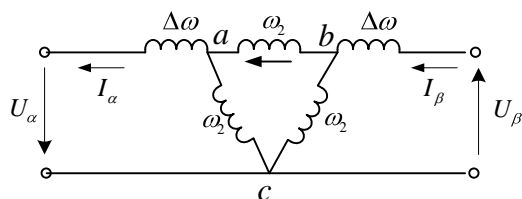
牵引变压器是铁道电气化系统中重要的电气设备, 它的安全运行与否, 直接关系到铁道电气化系统能否连续稳定地工作。阻抗匹配平衡变压器是适应我国电气化铁道发展需要的新型牵引变压器, 它具有较好的抑制负序电流对电力系统影响、容量利用率较高等优点, 已经成为我国电气化铁路牵引变压器的主要接线型式<sup>[1]</sup>。电气化铁路牵引供电系统用阻抗匹配变压器作为一种特殊变压器, 其结构的特殊性和复杂性决定了不能采用普通变压器仿真模型<sup>[2]</sup>。本文利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件建立了基于统一电磁等值电路 (UMEC) 的阻抗匹配平衡变压器模型, 构建了电气化铁路牵引供电系统的仿真模型, 并对其正常运行、故障状态、励磁涌流等情况进行了仿真和特点分析, 仿真结果对阻抗匹配平衡变压器的现场运行具有一定的指导意义。

## 1 阻抗匹配平衡变压器的原理

阻抗匹配平衡变压器是在普通的 YNd11 接线变压器的自由相上增加两个绕组, 并使其次边△内各绕组阻抗满足  $Z_{ab} = K_z Z_{bc} = K_z Z_{ca}$  的匹配原则而达到原边平衡的变压器<sup>[3]</sup>。阻抗匹配平衡变压器的原理接线如图 1 所示。变压器原边接成 Y 联结 (设存在中性点且接地), 次边接成△联结, 并且次边 b 相铁心柱绕组再外延 2 个支臂  $\alpha$  和  $\beta$ , 称为平衡绕组, 且满足次边两相输出电压  $U_\alpha$ 、 $U_\beta$  相位相差  $90^\circ$ 。(  $K_z$  是  $Z_{ab}$  和  $Z_{bc}$  与  $Z_{ca}$  的比例关系)



a) 阻抗匹配变压器原边



b) 阻抗匹配变压器次边

图 1 阻抗匹配平衡变压器接线图

在次边△内, 设  $Z_{bc} = Z_{ca} = Z_2$ ,  $Z_{ab} = K_z Z_2$ ,  $\omega_1 = k\omega_2$ , 应用叠加原理和磁势平衡原理得到原、次边电流映射关系为:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{3}k} \times \begin{bmatrix} A & -B \\ -C & -C \\ -B & A \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:  $A = \frac{K_z + 1}{K_z + 2}$ ,  $B = \frac{1}{K_z + 2}$ ,  $C = \frac{1}{K_z + 2} + \frac{\sqrt{3}-1}{2}$ 。

根据平衡变压器的定义, 无论  $I_\alpha$ 、 $I_\beta$  负荷如何, 原边的中性点电流必须为零, 则  $K_z = \sqrt{3} + 1$ 。

设  $\Delta\omega = m\omega_2$ , 原边三相电压为  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$ , 则次边两相空载输出电压为:

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{k} \begin{bmatrix} 2 & -m & 0 \\ 0 & m & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

假设  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  为三相对称电压，可推出当  $m = 0.366$  时， $U_\alpha$  超前  $U_\beta$   $90^\circ$ ，满足平衡要求。

由以上分析可得阻抗匹配平衡变压器原边与次边输出相的电流变换关系为<sup>[4]</sup>：

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{3}k} \begin{bmatrix} \sqrt{3}+1 & -(\sqrt{3}-1) \\ -2 & -2 \\ -(\sqrt{3}-1) & \sqrt{3}+1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 2 基于 EMTDC 的阻抗匹配平衡变压器模型

由于阻抗匹配平衡变压器 A 相和 C 相铁心柱上绕有 2 个绕组，B 相铁心柱上绕有 4 个绕组，电磁关系比较复杂，用一般的传统变压器模型不能真实地反映绕组间的电磁耦合状态，因此采用 EMTDC 中 UMEC 变压器模型构建阻抗匹配平衡变压器模型。

三相三铁心柱变压器如图 2 所示，以三相三铁心柱的变压器为例，用 UMEC 变压器模型可以反映 6 个绕组间的电磁耦合关系。

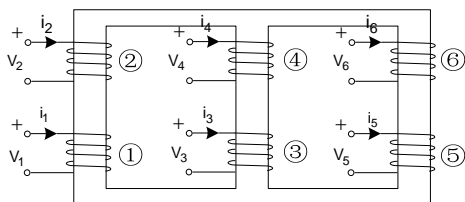


图 2 三相三铁心柱变压器示意图

图 2 中 6 个绕组间的电压和电流关系如公式 (4) 所示：

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & L & 0 \\ 0 & R_2 & L & 0 \\ M & M & 0 & M \\ 0 & 0 & L & R_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & L & M_{16} \\ M_{21} & L_2 & L & M_{26} \\ M & M & 0 & M \\ M_{61} & M_{62} & L & L_6 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中， $R_i$  为线圈的电阻； $L_i$  为线圈的自感； $M_{ij}$  为线圈  $i$ 、 $j$  之间的互感。（ $i=\{1,2,\dots,6\}$ 、 $j=\{1,2,\dots,6\}$ 。）

公式 (4) 中  $L_i$ 、 $M_{ij}$  的大小取决于铁心的大小、铁心材料的电磁特性以及线圈的匝数。

参考文献[5]给出了阻抗匹配平衡变压器的等值电路，并推导出了变压器实现阻抗匹配的条件，根据这些条件，结合某阻抗匹配平衡变压器的参数，

并且令文献公式中的  $Z_{132} = Z_{312} = \frac{1}{2} Z_{213}$ ，就可以计算出仿真模型中各个电感的值，最后运用 UMEC 变压器模型，可以设计出阻抗匹配平衡变压器模型如图 3 所示。

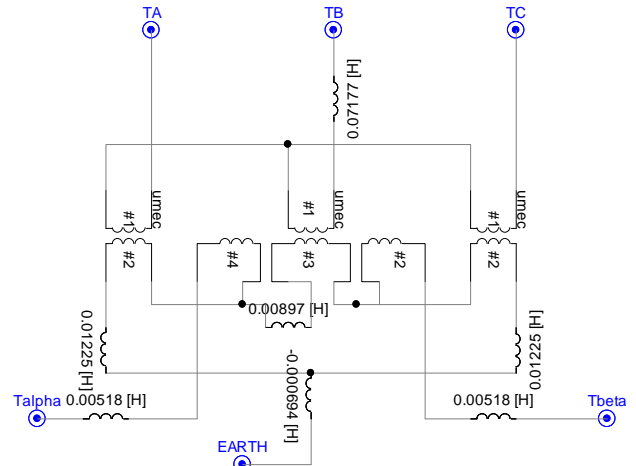


图 3 阻抗匹配平衡变压器的仿真模型

## 3 牵引供电系统的仿真模型

为研究阻抗匹配平衡变压器在正常及故障情况下的运行状态，本文利用 PSCAD 建立了包括牵引变压器在内的牵引供电系统仿真模型，如图 4 所示。

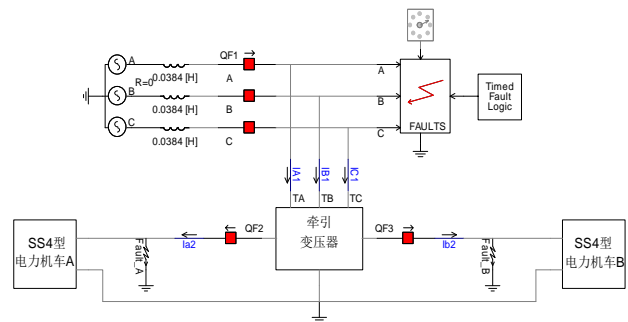


图 4 采用阻抗匹配平衡变压器的牵引供电系统模型

系统采用 110kV 直接供电，牵引变压器采用如图 3 所示的由 3 个不同的“UMEC 变压器”构成的阻抗匹配平衡变压器，系统的运行状态由断路器 QF1、QF2、QF3 控制，通过“FAULTS”及“Fault\_A、Fault\_B”设置高压侧和低压侧的故障状态。

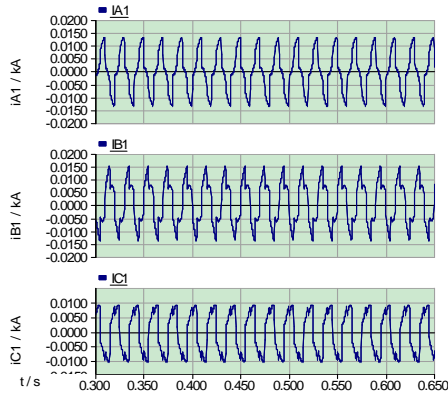
为了模拟实际运行情况，建立了 SS4 型电力机车仿真模型，它采用由三段不等分桥实现四段等分桥控制的整流调压电路供电<sup>[6]</sup>，机车自带的变压器由四绕组 UMEC 变压器组成，机车电机采用 PSCAD 自带的直流电机模型。

## 4 仿真结果及其分析

阻抗匹配平衡变压器的牵引供电系统模型仿真条件：牵引变压器高压侧电压为110 kV，短路容量为1000 MVA，低压侧电压为27.5 kV，直接向电气化铁路供电，牵引变压器为阻抗匹配平衡变压器，额定容量为40 MVA，漏抗为10.5%。

### 4.1 正常运行状态仿真

设置仿真时间为1 s，正常运行时，高、低压侧不设置任何故障，仿真结果如图5所示。



（由于电流 IC1 比较小，为了更清晰地看出 IC1 的波形特点，将 IC1 的纵坐标范围比 IA1 和 IB1 缩小了一半）

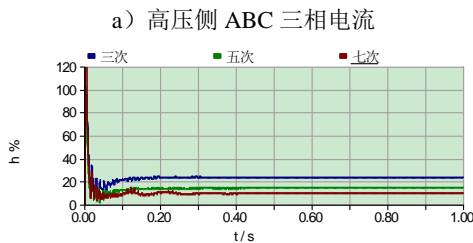


图5 牵引供电系统正常运行仿真波形

由图5可知，牵引供电系统正常运行时，经牵引变压器变换后，注入到电力系统的谐波电流为三相不平衡谐波，且所有谐波电流均由电力机车产生，系统只向电气化铁路提供基波正序电流，电力机车谐波特性如下：

（1）当机车处于牵引状态，整流装置投入运行，产生谐波电流；

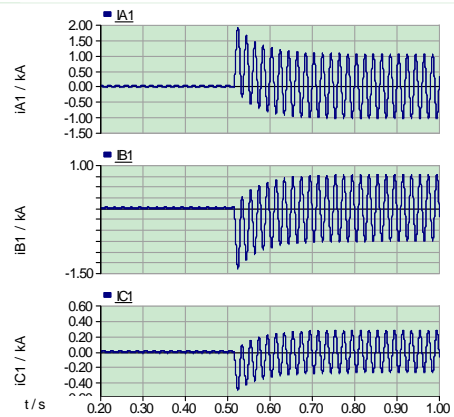
（2）机车的牵引力是取自系统，经整流调压电路后的直流电流产生，该电流不因系统外界条件和运行方式而改变，对应于交流侧电流的波形也相对稳定，因此，电力机车为谐波电流源；

（3）电力机车采用单相全波不控整流或半控整流，产生的特征电流谐波以奇次谐波为主，偶次谐

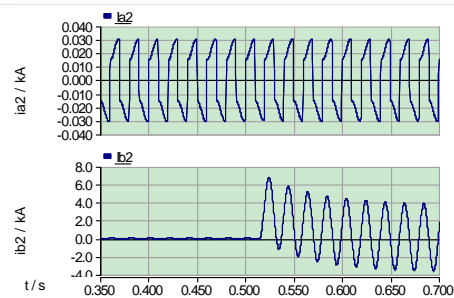
波含量很低。

### 4.2 故障运行时电磁暂态仿真

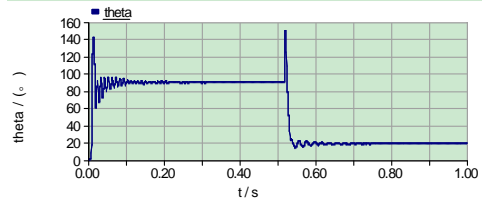
故障运行时，高压侧故障设置元件不设置任何故障，低压侧故障设置元件“Fault\_B”在0.515 s时设置接地故障，运行结果如图6所示。



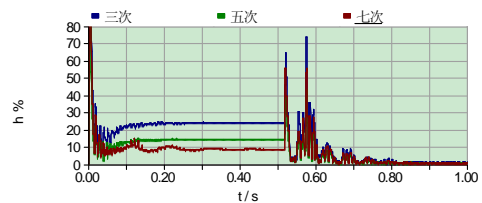
a) 高压侧 ABC 三相电流



b) 低压侧  $\alpha$  和  $\beta$  相电流



c) 低压侧两相相角差



d) 高压侧电流主要谐波含量

图6 牵引供电系统低压侧故障时仿真波形

由图6可知，牵引供电系统低压侧发生单相接地故障时，高压侧和低压侧的电流波形都发生了明显

显的畸变,畸变程度有所不同,其特点如下:

(1) 高压侧 A 相故障电流最大, B 相次之, C 相最小,故障后电流波形接近正弦波,谐波含量明显降低;

(2) 故障后, 低压侧两相电流变化趋势不同,  $\alpha$  相电流没有发生畸变,  $\beta$  相电流畸变明显, 由原来的近似方波变为正弦波, 幅值明显增大;

(3) 故障后低压侧两相电流的相角差发生了明显的变化, 由原来的  $90^\circ$  迅速变化为约  $20^\circ$ 。

#### 4.3 空载合闸时励磁涌流仿真

牵引变压器在稳态时的空载励磁涌流不超过额定电流的  $1\% \sim 2\%$ , 但当变压器空载合闸时, 由于铁心的饱和作用, 其励磁涌流的瞬时值可超过稳态电流的几十倍甚至更高, 会出现明显的涌流。仿真时, 将断路器  $QF_2$ 、 $QF_3$  断开, 相当于低压侧空载, 高压侧断路器  $QF_1$  在  $0.16\text{ s}$  闭合, 仿真结果如图 7 所示, 由图 7 可知, 阻抗匹配平衡变压器空载合闸时, 会产生非常明显的励磁涌流现象。

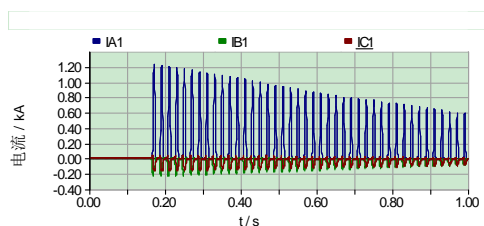


图 7 空载合闸时一次侧励磁涌流

## 5 结束语

### Simulation Research of Impedance-Matched Balancing Transformer Based on PSCAD

CHENG Jian

(Dongtai Power Supply Company, Dongtai 214200, China)

**Abstract:** The connection of IMBT (impedance-matched balancing transformer) and inner impedance-matching were studied. With analyzing the relationship of electromagnetic coupling of multi-winding transformer, a traction power supply system model of electric railway was built based on the UMEC (unified magnetic equivalent circuit) transformer model of EMTDC. Simulation and analysis were carried out under normal condition, faulty condition, magnetizing inrush condition. The simulation results prove that the above model is correct and makes guidance meaning for site operation of IMBT.

**Key words:** impedance-matched balancing transformer; PSCAD/EMTDC; transient simulation; traction power supply system

本文利用仿真软件 PSCAD 建立了阻抗匹配平衡变压器及其牵引供电系统的仿真模型,通过仿真,得到了正常运行、故障状态以及变压器空载合闸时相应的电流波形,并对其谐波含量进行了分析,该仿真模型及仿真结果对研究阻抗匹配平衡变压器以及牵引供电系统的运行状态具有一定的指导作用。

#### 参考文献:

- [1] 李群湛, 连级三, 高仕斌. 高速铁路电气化工程[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.
- [2] 郭蕾, 高仕斌, 陈小川. 阻抗匹配平衡变压器的暂态仿真研究[J]. 变压器, 2005, 42(9): 20-24.
- [3] 谭秀炳. 交流电气化铁道牵引供电系统(第2版)[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
- [4] 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, 15(2): 6-11.
- [5] 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.
- [6] 黄石柱, 李建华, 赵娟, 等. 基于 Matlab 的电力机车数字仿真模型[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 51-55.

#### 作者简介:

程 建(1979—), 男, 江苏东台人, 助理工程师, 学士, 从事变电运行工作。