

# 基于等效单匝电感矩阵的多绕组变压器 复合短路阻抗及环流计算

许加柱<sup>1</sup>, 梁湘湘<sup>2</sup>, 姚新丽<sup>1</sup>, 廖闻迪<sup>1</sup>

- (1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410082;
2. 南车株洲电机有限公司, 湖南省株洲市 412001)

## Calculation of the Composite Short-circuit Impedance and Circulating Current Based on the Equivalent Single-turn Inductance Matrix

XU Jiazhu<sup>1</sup>, LIANG Xiangxiang<sup>2</sup>, YAO Xinli<sup>1</sup>, LIAO Wendi<sup>1</sup>

- (1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China;
2. CSR Electric Motor Co. Ltd., Zhuzhou 412001, Hunan Province, China)

**ABSTRACT:** In order to solve the engineering problems, such as complex establishment of the multi-winding transformer model, long calculation time of composite short-circuit impedance and difficulties in calculation of the circulating current for parallel windings, a solution method for composite short-circuit impedance and circulating current in the parallel windings was proposed based on the equivalent single-turn inductance matrix and the equivalent circuit model of the transformer described by self-inductance and mutual inductance. In this method, all the short-circuit impedance between any two windings were computed by the equivalent single-turn inductance matrix. Combining the definition of composite short-circuit impedance with the ports' conditions, all concerned composite short-circuit impedance and the circulating currents could be calculated only once through compiling the corresponding general calculation procedure in Matlab. Finally, taking a twelve-winding transformer as an example, the results calculated by the proposed new method were compared with the testing ones, which indicates that the calculation results of composite short-circuit impedance can meet the engineering requirements.

**KEY WORDS:** multi-winding transformer; equivalent single-turn inductance matrix; composite short-circuit impedance; magnetic field energy method; circulating current

**摘要:** 为了有效地解决多绕组变压器建模复杂、复合短路阻抗计算时间长及多并联绕组间环流计算难等问题, 结合由自感和互感描述的变压器等效电路模型, 提出了一种基于等效单匝电感矩阵的多绕组变压器复合短路阻抗及多并联绕组间环流的求解方法。该方法通过等效单匝电感矩阵求解出所有两两绕组间的短路阻抗, 并结合复合短路阻抗的定义和端口条件, 在 Matlab 软件中编写相应的通用计算程序, 可一次性求解出任一所需的复合短路阻抗及多并联绕组间的环流大小。最后, 以某一实际 12 绕组变压器为例, 采用所提方法对复合短路阻抗和环流进行了计算, 并与试验结果进行了对比分析, 结果表明, 该方法能够准确地计算出各种短路工况条件下的复合短路阻抗及多并联绕组间的环流情况, 可以满足工程设计的要求。

**关键词:** 多绕组变压器; 等效单匝电感矩阵; 复合短路阻抗; 磁场能量法; 环流

## 0 引言

多绕组变压器广泛应用于电力机车牵引供电、变流及电力系统中, 其结构和接线方式种类繁多<sup>[1-6]</sup>。由于多绕组变压器属于多电气端口电路网络, 它的复合短路阻抗的计算一直是设计和制造人员最为关心的技术参数之一; 特别是当多绕组变压器的多个绕组以并联方式供电时, 由于多绕组之间的耦合度各不相同, 使得多并联绕组的电流分配无法预知, 给多绕组变压器的复合短路阻抗计算带来了困难。

在复合短路阻抗计算方面, 文献[7]中给出了复合短路阻抗的定义, 并基于磁场能量法计算出变压

基金项目: 国家自然科学基金项目(50907018)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50907018).

器所有绕组两两之间的短路阻抗，提出了一种多绕组变压器复合短路阻抗的计算方法，具有较高的实用价值；但对于具有 14 个绕组的多绕组变压器则需要计算出 91 组短路阻抗，耗时且计算量大。文献[8]提出了一种基于组合式场路耦合的多绕组变压器复合短路阻抗的计算方法，该方法需要多次求解，计算出电感矩阵，再结合多绕组变压器的动态特性方程，在 Matlab 环境下，通过受控源模型求解出复合短路阻抗。它的缺点一方面是当绕组个数较多时，受控源数目多，增加了建模的难度和计算量；另一方面由于自感和互感受变压器铁心的饱和程度影响而呈非线性，易受到工况变化的影响。

在环流计算方面，文献[9-10]提出了磁场计算与电路分析相结合的方法，但计算过程仍未摆脱重复计算，且当绕组较多时，过程繁琐。文献[11-13]提出了一种基于“场-路耦合”的环流计算方法，求解思路清晰，但需考虑铁磁材料的非线性而编写相应的处理程序，增加了计算的难度。

为了有效解决上述 2 方面的问题，本文结合由自感和互感描述的变压器等效电路模型，提出了一种基于等效单匝电感矩阵的多绕组变压器复合短路阻抗及多并联绕组间环流求解的新方法。首先采用 ANSOFT 有限元仿真软件，计算出多绕组变压器的单匝电感矩阵，结合变压器的等效电路模型，求得两两绕组间短路阻抗与自感和互感之间的关系，依据求得的短路阻抗，并根据复合短路阻抗的定义和不同短路工况的端口条件，通过编写简单的计算程序，即可一次性求解出不同短路工况条件下的复合短路阻抗及多并联绕组间的环流大小，且该计算程序不受绕组个数的限制；其中求解复合短路阻抗和并联绕组环流的计算式只与两两绕组间的短路阻抗相关，由于两两绕组间的短路阻抗并不受铁磁材料非线性影响；因此，铁磁材料的非线性对电感矩阵的影响并不会传递给短路阻抗，从而有效地保证了计算结果的精确度；最后，以某一实际多绕组变压器为例，通过该方法的计算结果，与试验数据进行对比，验证了所提出的方法具有较高的计算精度，且计算过程简单，易于工程设计人员使用。

### 1 两两绕组间的短路阻抗与等效单匝电感矩阵的关系

图 1 为两绕组变压器的耦合电路示意图。

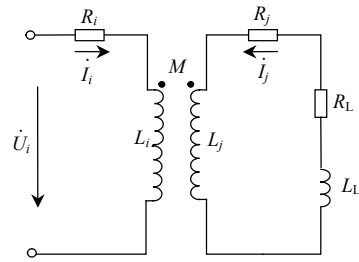


图 1 变压器的等效耦合电路

Fig. 1 Equivalent coupled circuit of transformer

图 1 中：\$L\_i\$、\$L\_j\$ 为 \$i\$、\$j\$ 绕组的自感；\$M\$ 为 \$i\$、\$j\$ 绕组间的互感；\$R\_i\$、\$R\_j\$ 为 \$i\$、\$j\$ 绕组的电阻；\$R\_L\$、\$L\_L\$ 为 \$j\$ 绕组侧的负载电阻和负载电感。根据自感、互感的定义<sup>[14]</sup>可得：

$$\begin{cases} L_i = W_i \Phi_{ii} / I_i = W_i (\Phi_{i\sigma} + \Phi_{ji}) / I_i \\ L_j = W_j \Phi_{jj} / I_j = W_j (\Phi_{j\sigma} + \Phi_{ij}) / I_j \end{cases} \quad (1)$$

$$M = W_i \Phi_{ij} / I_j = W_j \Phi_{ji} / I_i \quad (2)$$

式中：\$W\_i\$、\$W\_j\$ 为 \$i\$、\$j\$ 绕组的匝数；\$\Phi\_{ii}\$、\$\Phi\_{jj}\$ 为自感磁通；\$\Phi\_{i\sigma}\$、\$\Phi\_{j\sigma}\$ 为漏磁通；\$\Phi\_{ij}\$ 为 \$j\$ 绕组中电流 \$I\_j\$ 在 \$i\$ 绕组中产生的磁通；\$\Phi\_{ji}\$ 为 \$i\$ 绕组中电流 \$I\_i\$ 在 \$j\$ 绕组中产生的磁通。

图 2(a)、2(b)分别为 \$W\_i\$ 匝绕组和单匝绕组通过相同电流 \$I\_i\$ 时的磁场分布图。

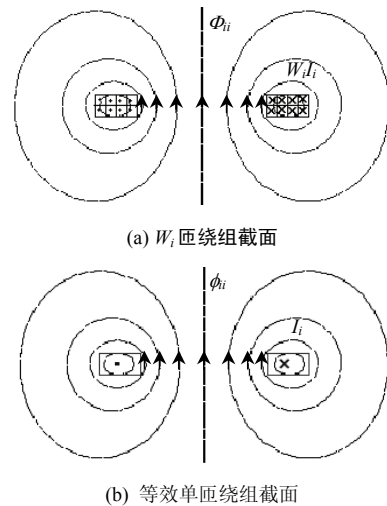


图 2 绕组截面和磁通分布图

Fig. 2 Cross section of winding and the distribution of magnetic flux

当将 \$W\_i\$ 匝绕组等效成形状、尺寸及周围媒介不变的单匝绕组时，可得：

$$\Phi_{ii} = W_i \phi_{ii} \quad (3)$$

式中 \$\phi\_{ii}\$ 为 \$W\_i\$ 等效成单匝时的自感磁通。

若将 \$W\_j\$ 匝绕组等效成形状、尺寸及周围媒介

不变的单匝绕组时，可得：

$$\Phi_{jj} = W_j \phi_{jj} \quad (4)$$

式中  $\phi_{jj}$  为  $W_j$  等效成单匝时的自感磁通。

若将匝数分别为  $W_i$ 、 $W_j$  的 2 绕组同时等效成形状、尺寸及周围媒介不变的单匝绕组时，可得：

$$\begin{cases} \Phi_{ij} = W_j \phi_{ij} \\ \Phi_{ji} = W_i \phi_{ji} \end{cases} \quad (5)$$

将式(3)、(4)代入式(1)可得：

$$\begin{cases} L_i = W_i W_i \phi_{ii} / I_i = W_i^2 l_{ii} \\ L_j = W_j W_j \phi_{jj} / I_j = W_j^2 l_{jj} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $l_{ii} = \phi_{ii} / I_i$ 、 $l_{jj} = \phi_{jj} / I_j$  为等效单匝自电感。

将式(5)代入式(1)可得：

$$\begin{cases} L_i = L_{i\sigma} + W_i^2 \phi_{ji} / I_i = L_{i\sigma} + W_i^2 m_{ji} \\ L_j = L_{j\sigma} + W_j^2 \phi_{ij} / I_j = L_{j\sigma} + W_j^2 m_{ij} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $m_{ji} = \phi_{ji} / I_i$ 、 $m_{ij} = \phi_{ij} / I_j$  为等效单匝互电感。

根据变压器短路阻抗的定义，不计绕组电阻，将二次侧漏电感折算到一次侧，可得：

$$X_{kij} = j\omega(L_{i\sigma} + L_{j\sigma} W_i^2 / W_j^2) \quad (8)$$

式中  $L_{i\sigma}$ 、 $L_{j\sigma}$  分别为  $i$ 、 $j$  绕组的漏电感。

结合式(6)–(8)，可求得两两绕组的短路阻抗与电感矩阵之间的关系：

$$X_{kij} = j\omega W_i^2 (l_{ii} + l_{jj} - 2m_{ij}) \quad (9)$$

基于 ANSOFT 有限元仿真软件，求得等效单匝电感矩阵，在已知各绕组匝数的条件下，通过后台计算程序处理，一次性求得所有两两绕组间的短路阻抗。

## 2 复合短路阻抗及环流电流的计算

### 2.1 导纳矩阵的推导

多绕组变压器一般具有多个绕组并联构成一次侧绕组及多个二次侧绕组的特点，如图 3 所示，各绕组匝数分别为  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $\dots$ 、 $W_n$ 。根据图 3 中标示的电压和电流相量正方向，不计绕组铜耗，可列出电压平衡方程组<sup>[7,15-16]</sup>，如下：

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{E}_1 + j\dot{I}_1 X_{\sigma 11} + j\dot{I}_2 X_{\sigma 12} + \dots + j\dot{I}_n X_{\sigma 1n} \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 + j\dot{I}_1 X_{\sigma 21} + j\dot{I}_2 X_{\sigma 22} + \dots + j\dot{I}_n X_{\sigma 2n} \\ \vdots \\ \dot{U}_n = \dot{E}_n + j\dot{I}_1 X_{\sigma n1} + j\dot{I}_2 X_{\sigma n2} + \dots + j\dot{I}_n X_{\sigma nn} \end{cases} \quad (10)$$

式中：当  $i=j$  时， $X_{\sigma ij}$  为绕组的自漏电抗；当  $i \neq j$  时，

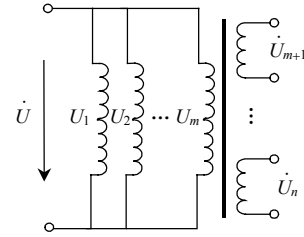


图 3 多绕组变压器的绕组接线方案

**Fig. 3 Connecting scheme of multi-winding transformer**  
 $X_{\sigma ij}$  为  $i$ 、 $j$  两绕组间的互漏电抗； $\dot{E}_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) 为  $i$  绕组的感应电动势，满足： $E_1/E_n=W_1/W_n$ ； $E_2/E_n=W_2/W_n$ ； $\dots$ ； $E_{n-1}/E_n=W_{n-1}/W_n$ 。

不计励磁电流，可列出磁动势平衡方程：

$$I_1 W_1 + I_2 W_2 + \dots + I_n W_n = 0 \quad (11)$$

对式(10)进行变换，可得：

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 - \frac{W_1}{W_n} \dot{U}_n \\ \dot{U}_2 - \frac{W_2}{W_n} \dot{U}_n \\ \vdots \\ \dot{U}_{n-1} - \frac{W_{n-1}}{W_n} \dot{U}_n \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{n-11} & X_{n-12} & \dots & X_{n-1n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_{n-1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中： $X_{ii} = X_{kin}$ ； $X_{ij} = X_{ji} = \frac{1}{2} \left( \frac{W_j}{W_i} X_{kin} + \frac{W_i}{W_j} X_{kjn} - \frac{W_j}{W_i} X_{kij} \right)$ ； $X_{kij}$  即为  $i$ 、 $j$  两绕组间的短路电抗。

令  $X^*$  满足：

$$X^* = j \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{n-11} & X_{n-12} & \dots & X_{n-1n-1} \end{bmatrix}$$

对式(12)进行矩阵逆变换，再结合式(11)，整理可得  $n$  阶线性方程组：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_{n-1} \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11}^* & y_{12}^* & \dots & y_{1n-1}^* & y_{1n}^* \\ y_{21}^* & y_{22}^* & \dots & y_{2n-1}^* & y_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n-11}^* & y_{n-12}^* & \dots & y_{n-1n-1}^* & y_{n-1n}^* \\ y_{n1}^* & y_{n2}^* & \dots & y_{nn-1}^* & y_{nn}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_{n-1} \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = Y \dot{U} \quad (13)$$

其中

$$\begin{bmatrix} y_{11}^* & y_{12}^* & \dots & y_{1n-1}^* \\ y_{21}^* & y_{22}^* & \dots & y_{2n-1}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n-11}^* & y_{n-12}^* & \dots & y_{n-1n-1}^* \end{bmatrix} = X^{*-1}$$

$Y$  即为多绕组变压器的导纳矩阵,  $Y$  矩阵中的  $y_{in}(i=1,2,\dots,n-1)$  和  $y_{nn}$  计算如下:

$$\begin{cases} y_{in} = y_{ni} = -\frac{1}{W_n} \sum_{k=1}^{n-1} W_k y_{ik} \\ y_{nn} = \frac{1}{W_n^2} \sum_{l=1}^{n-1} W_l \sum_{k=1}^{n-1} W_k y_{lk} \end{cases} \quad (14)$$

## 2.2 边界条件

结合图3所示的绕组接线方案, 复合短路阻抗的计算主要分2种工况。

1) 高压绕组( $W_1-W_m$ )并联供电, 任一低压绕组( $W_i$ )短路, 其它低压绕组( $W_{m+1}, W_{m+2}, \dots, W_{i-1}, W_{i+1}, \dots, W_n$ )开路, 边界条件满足:

$$\begin{cases} U_1 = U_2 = \dots = U_m = U_k \\ U_i = 0, \quad m < i \leq n \\ I_i = I_{iN} \\ I_{m+1} = I_{m+2} = \dots = I_{i-1} = I_{i+1} = \dots = I_n = 0 \end{cases} \quad (15)$$

2) 高压绕组( $W_1-W_m$ ) 并联, 某一低压绕组( $W_i$ ) 供电, 某一低压绕组( $W_j, j \neq i$ )短路, 其余低压绕组( $W_{m+1}, \dots, W_{i-1}, W_{i+1}, \dots, W_{j-1}, W_{j+1}, \dots, W_n$ ) 开路, 边界条件满足:

$$\begin{cases} U_1 = U_2 = \dots = U_m \\ U_i = U_k, \quad m < i \leq n \\ I_j = I_{jN} \\ I_1 + I_2 + \dots + I_m = 0 \end{cases} \quad (16)$$

## 2.3 计算流程

根据本文的分析与推导, 多绕组变压器的复合短路阻抗及多并联绕组间环流的计算流程如下:

1) 根据多绕组变压器的设计模型或实体模型, 在 ANSOFT 软件中建立等效单匝有限元模型, 计算出  $n$  阶等效单匝电感矩阵;

2) 对各绕组的额定容量、额定电压及匝数进行编号排列;

3) 根据式(9)计算求得  $n \times (n-1)/2$  两两绕组间短路阻抗, 并结合  $X^*$  和式(13)、(14)可求得多绕组变压器的导纳矩阵  $Y$ ;

4) 结合式(15)、(16), 根据不同短路工况, 列出对应的短路边界条件, 并将边界条件和求得导纳矩阵代入式(13), 即可求得供电电压  $U_k$  及并联高压绕组中的环流情况;

5) 以供电绕组的额定电压为电压基准, 由  $U_k$

即可求得对应的复合短路阻抗百分比。

## 3 实例研究

本文以某一 12 绕组变压器为例, 其中 HV1—HV4 为并联高压绕组; TR1—TR4 为低压牵引绕组; AUX1—AUX4 为辅助供电绕组, 并相串联构成一个 AUX 绕组。结合多绕组变压器的设计结构参数, 在 ANSOFT 软件中建立了相应的等效单匝有限元仿真模型, 如图4所示。在有限元仿真模型中加载相应的平衡电流, 计算出的 12 阶等效单匝电感矩阵  $L$ , 见附录 A; 根据复合短路阻抗与环流的计算流程, 在 Matlab 软件中编写出相应的计算程序, 并结合实际工程要求, 列写出不同的边界条件, 可一次性输出所关心的复合短路阻抗值和并联绕组间的环流情况, 中间计算矩阵  $X^*$  及  $Y$  矩阵见附录 A。

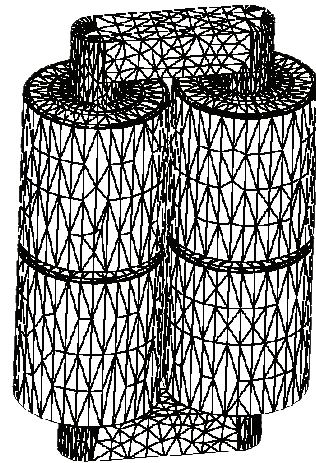


图4 12绕组变压器的有限元模型

Fig. 4 Finite element model of twelve-winding transformer

表1给出了该12绕组变压器的复合短路阻抗的计算结果、试验测试结果和并联绕组间的环流情况。由表1可知:

1) 高压绕组并联供电、某一低压牵引绕组短路时, 与短路绕组相对应的高压绕组中的电流最大, 其他3个高压绕组也有电流流通, 与短路绕组在同一心柱的另一高压绕组中的电流较小, 在另外一心柱上的2个高压绕组中的电流最小, 可忽略不计; 如 HV—TR1 短路工况条件下, 与 TR1 在同一心柱的 HV2 中的电流为 0.9A, 与 TR1 不在同一心柱的 HV3 和 HV4 中的电流分别为 0.16 和 0.08A。

2) 高压绕组并联供电、低压牵引绕组并联供电时, 各绕组中的电流存在分配不均的现象, 这主

表 1 复合短路阻抗及各绕组电流

Tab. 1 Composite short-circuit impedance and the currents in all windings

短路工况(供电绕组/短路绕组)	绕组电流/A									复合短路阻抗/%	
	HV1	HV2	HV3	HV4	AUX	TR1	TR2	TR3	TR4	计算值	测试值
HV-TR1	71.46	0.90	0.16	0.08	0	-1 210	0	0	0	36.83	38.29
HV-TR2	1.59	70.89	0.12	-0.01	0	0	-1 210	0	0	36.69	38.30
HV-TR3	0.69	-0.45	70.93	1.43	0	0	0	-1 210	0	36.86	38.06
HV-TR4	0.20	-0.20	1.26	71.34	0	0	0	0	-1 210	36.77	37.86
HV-TR	80.73	63.24	70.15	76.27	0	-1 328	-1 074	-1 169	-1 269	38.96	39.70
HV-AUX	12.77	10.87	9.98	14.38	-400	0	0	0	0	6.71	6.88
TR1-TR2	-69.88	70.00	-0.04	-0.08	0	1 210	-1 210	0	0	70.28	72.39
TR1-TR3	-70.78	-1.35	70.78	1.35	0	1 210	0	-1 210	0	73.76	75.83
TR1-TR4	-71.27	-1.10	1.10	-71.27	0	1 210	0	0	-1 210	74.33	76.86
TR2-TR3	-0.90	-71.36	70.83	1.43	0	0	1 210	-1 210	0	74.48	75.97
TR2-TR4	-1.39	-71.10	1.14	71.35	0	0	1 210	0	-1 210	73.63	76.20
TR3-TR4	-0.49	0.25	-69.68	69.92	0	0	0	1 210	-1 210	70.28	72.46

注：HV 代表 HV1/HV2/HV3/HV4 并联；TR 代表 TR1/TR2/TR3/TR4 并联；AUX 代表 AUX1/AUX2/AUX3/AUX4 串联。

要由各绕组本身漏抗的不均造成的。

3) 当某一低压牵引绕组供电、另一低压牵引绕组短路时，并联高压绕组中存在环流，且与供电和短路绕组相对应的高压绕组中电流最大，如 TR1-TR2 短路工况条件下，HV1 和 HV2 中环流分别高达 69.88 和 70 A。

4) 通过对比复合短路阻抗的计算结果和试验结果可知，复合短路阻抗的计算值较测试值偏小，主要是由于在求解复合短路阻抗过程中，忽略了各绕组的电阻；同时在进行单匝等效时，忽略了多匝绕组间的绝缘间隙对漏阻抗的影响；但在所有短路工况条件下，复合短路阻抗的最大计算误差均小于 5%。

## 4 结论

本文结合由自感和互感描述的变压器等效电路模型，提出了一种基于等效单匝电感矩阵的多绕组变压器的复合短路阻抗及多并联绕组间环流的求解方法。该方法利用 ANSOFT 软件得到的等效单匝电感矩阵，求解出所有两两绕组间的短路阻抗；并联合复合短路阻抗的定义和端口条件，编写相应的通用计算程序，可一次性求解出任一所需的复合短路阻抗及多并联绕组间的环流大小。最后以某 12 绕组变压器为研究对象，通过对比计算结果和试验结果，表明本文提出的复合短路阻抗和多并联绕组间环流的求解方法具有较高的计算精度，可满足工程

计算的要求，对多绕组变压器电磁参数的优化设计具有一定的工程应用价值。

## 致谢

本文中实验方案的制定和实验数据的测量记录工作是在南车株洲电机有限公司龙谷宗、黄登威、胡贵、周健等工作人员的大力支持下完成的，在此向他们表示衷心的感谢。

## 参考文献

- [1] 张志文. 星形-双梯形接线三相变四相或三相变两相平衡变压器原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 78-84.  
Zhang Zhiwen. Three-phase to four-phase or two-phase balance transformer connected in Y and Double trapezoids [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3): 78-84(in Chinese).
- [2] 田铭兴, 励庆孚. 变压器式可控电抗器的谐波分析和功率级数计算[J]. 中国电机工程学报, 2008, 23(8): 168-171.  
Tian Mingxing, Li Qingfu. Harmonic current and power-step number of controllable shunting reactors of transformer type[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 23(8): 168-171(in Chinese).
- [3] Zhang Zhiwen, Wu Bin, Kang Jinsong, et al. A multi-purpose balanced transformer for railway traction applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,

- 2009, 24(2): 711-718.
- [4] Xie Dexin, Yan Xiuke, Yao Yingying, et al. Circulating current computation and transposition design for large current winding of transformer with multi-section strategy and hybrid optimal method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(4): 1014-1017.
- [5] 张秀峰, 连级三, 高仕斌. 基于三相变四相变压器的新型同相牵引供电系统[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 19-23.  
Zhang Xiufeng, Lian Jisan, Gao Shibin. A new cophase traction power supply system based on three-phase to four-phase transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(15): 19-23(in Chinese).
- [6] 吴命利, 黄足平, 楚振宇, 等. 适用于AT供电系统的二次侧中点抽出式Scott接线牵引变压器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 95-100.  
Wu Mingli, Huang Zuping, Chu Zhenyu, et al. The scott traction transformer with secondary midpoint drawn-out applicable to AT feeding systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 95-100(in Chinese).
- [7] 罗隆福, 张志文, 邓建国, 等. 多绕组变压器复合短路阻抗的求解方法[J]. 电工技术学报, 2002, 17(3): 146-152.  
Luo Longfu, Zhang Zhiwen, Deng Jianguo, et al. The method solving composite short-circuit impedance of multi-winding transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(3): 146-152(in Chinese).
- [8] 谢冰若, 陈乔夫, 康崇皓, 等. 基于组合式场路耦合法的多绕组变压器建模与阻抗参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(9): 104-111.  
Xie Bingruo, Chen Qiaofu, Kang Chonghao, et al. Modeling and impedance parameter design for Multi-winding transformer based on combined field-circuit coupled method[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(9): 104-111(in Chinese).
- [9] 李锦彪, 王健, 任玉民, 等. 干式空心电抗器阻抗参数计算的能量法[J]. 变压器, 1998, 35(6): 1-5.  
Li Jinbiao, Wang Jian, Ren Yumin, et al. Energy approach for impedance parameter calculation of dry-type reactor with air core[J]. Transformer, 1998, 35(6): 1-5(in Chinese).
- [10] 李晓松, 陈乔夫, 龙谷宗, 等. 超导变压器几种不同绕组形式的环流分析[J]. 电工技术学报, 2005, 20(7): 28-33.  
Li Xiaosong, Chen Qiaofu, Long Guzong, et al. Study of circulating current distributions for different types of HTS transformer windings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(7): 28-33(in Chinese).
- [11] 李晓松, 胡贵, 陈乔夫. 基于“场-路耦合”分析的超导变压器绕组环流计算[J]. 电气应用, 2006, 25(10): 21-24.  
Li Xiaosong, Hu Gui, Chen Qiaofu. Calculation of circulating currents of HTS power transformer by coupling magnetic field with electric circuit[J]. Electrical Application, 2006, 25(10): 21-24(in Chinese).
- [12] 阎秀格, 李晓玉, 谢德馨, 等. 变压器连续式绕组的环流计算与换位研究[J]. 变压器, 2008, 45(5): 1-4.  
Yan Xiuke, Li Xiaoyu, Xie Dexin, et al. Circulating current calculation and transposition research of continuous winding in transformer[J]. Transformer, 2008, 45(5): 1-4(in Chinese).
- [13] 许加柱, 罗隆福, 李季. 基于场路耦合法的大电流互感器屏蔽绕组分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 167-172.  
Xu Jiazhu, Luo Longfu, Li Ji. Shielding windings analysis of large current transformers based on coupled field-circuit method[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 167-172(in Chinese).
- [14] 汤蕴璆, 史乃. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 29-36.  
Tang Yunqiu, Shi Nai. Electrical machinery[M]. Beijing: China Machine Press, 2001: 29-36(in Chinese).
- [15] 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(in Chinese).
- [16] 崔立君. 特种变压器理论与设计[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1995: 20-23.  
Cui Lijun. The theory and design of special transformer [M]. Beijing: Science and Technology Document Press, 1995: 20-23(in Chinese).

## 附录 A

12 阶的等效单匝电感矩阵  $I$  (单位为  $10^{-4} \text{H}$ ) 如下:

5.041 0	5.030 1	5.022 4	5.018 3	5.040 5	5.030 0	5.022 1	5.018 1	5.040 7	5.030 1	5.022 7	5.018 5
5.030 1	5.040 9	5.018 3	5.022 2	5.029 9	5.040 3	5.018 0	5.021 8	5.030 1	5.040 5	5.018 4	5.022 5
5.022 4	5.018 3	5.040 9	5.030 0	5.022 1	5.018 1	5.040 3	5.029 9	5.022 7	5.018 4	5.040 5	5.030 0
5.183 0	5.022 2	5.030 0	5.040 8	5.018 1	5.021 8	5.029 8	5.040 3	5.018 5	5.022 5	5.030 0	5.040 5
5.040 5	5.029 9	5.022 1	5.018 1	5.041 4	5.029 8	5.021 7	5.017 8	5.039 8	5.022 9	5.022 4	5.018 3
5.030 0	5.040 3	5.018 1	5.021 8	5.029 8	5.041 1	5.017 8	5.021 5	5.029 9	5.039 7	5.018 2	5.022 1
5.022 1	5.018 0	5.040 3	5.029 8	5.021 7	5.017 8	5.041 2	5.029 7	5.022 4	5.018 2	5.039 7	5.029 8
5.018 1	5.021 8	5.029 9	5.040 3	5.017 8	5.021 5	5.029 7	5.041 1	5.018 3	5.022 1	5.029 8	5.039 6
5.040 7	5.030 1	5.022 7	5.018 5	5.039 8	5.029 9	5.022 4	5.018 3	5.041 8	5.030 1	5.023 1	5.018 6
5.030 1	5.040 5	5.018 4	5.022 5	5.022 9	5.039 7	5.018 2	5.022 1	5.030 1	5.041 6	5.018 6	5.022 8
5.022 7	5.018 4	5.040 5	5.030 0	5.022 4	5.018 2	5.039 7	5.029 8	5.023 1	5.018 6	5.041 6	5.030 0
5.018 5	5.022 5	5.030 0	5.040 5	5.018 3	5.022 1	5.029 8	5.039 6	5.018 6	5.022 8	5.030 0	5.041 5

矩阵  $X^*$  (单位为  $\Omega$ ) 如下:

4 293.0	2 887.1	1 453.0	75.5	259.9	175	86.6	8.5	127.7	85.8	44.4
2 887.1	3 528.7	688.8	66.0	173.3	210.6	40.8	6.8	86.3	103.9	20.9
1 453.0	688.8	2 113.5	94.4	86.6	42.5	124.6	10.2	44.2	20.1	62.3
75.5	66.0	94.4	122.7	4.5	4.0	5.7	9.6	2.5	2.0	2.8
255.9	173.3	86.6	4.5	15.7	10.5	5.1	0.5	7.5	4.0	2.7
175.0	210.6	42.5	4.0	10.5	13.0	2.5	0.4	5.2	6.2	1.3
86.6	40.8	124.6	5.7	5.1	2.5	7.8	0.6	2.6	1.2	3.6
8.5	6.8	10.2	9.6	0.5	0.1	0.6	1.2	0.3	0.2	0.3
127.7	86.3	44.2	2.5	7.5	5.2	2.6	0.3	3.9	2.6	1.4
85.8	103.9	20.1	2.0	4.0	6.2	1.2	0.2	2.6	3.2	0.6
44.4	20.9	62.3	2.8	2.7	1.3	3.6	0.3	1.4	0.6	2.0

矩阵  $Y$  (单位为  $\text{S}$ ) 如下:

0.007 4	-0.00 2	-0.000 3	0.000 8	0.007 7	-0.005 9	-0.001 6	-0.002 4	-0.246 8	0.067 2	0.007 9	-0.020 0
-0.002 0	0.007 6	-0.000 1	-0.01 1	0.029 5	-0.124 4	0.002 6	0.012 4	-0.002 6	0.011 9	0.003 8	0.003 1
-0.000 3	-0.000 1	0.016 5	0.000 8	-0.003 8	0.001 1	-0.135 3	-0.013 1	0.016 2	0.001 7	-0.272 5	-0.00 8
0.000 8	-0.001 1	0.000 8	0.023 9	0.000 3	0.013 7	-0.002 8	-0.197 9	-0.023 1	0.007 1	-0.027 8	-0.393 7
0.007 7	0.029 5	-0.003 8	0.000 3	-0.089 7	-0.067 8	0.026 5	0.002 1	-0.064 4	-0.874 3	0.067 7	0.005 2
-0.005 9	-0.124 4	0.001 1	0.013 7	-0.067 8	2.138 2	-0.005 8	-0.179 4	0.244 7	-0.320 0	-0.030 1	-0.102 2
-0.001 6	0.002 6	-0.135 3	-0.002 8	0.026 5	-0.005 8	2.018 3	0.010 0	-0.051 1	-0.043 8	0.584 2	-0.017 4
-0.002 4	0.012 4	-0.012 1	-0.197 9	0.002 1	-0.179 4	0.010 0	2.554 4	0.070 3	-0.074 9	0.319 6	1.611 7
-0.246 8	-0.002 6	0.016 2	-0.023 1	-0.064 4	0.244 7	-0.051 1	0.070 3	8.580 7	-0.523 6	-0.630 5	0.716 4
0.067 2	0.011 9	0.001 7	0.007 1	-0.874 3	-0.032 0	-0.043 8	-0.074 9	-0.523 6	-0.315 2	0.043 1	-0.084 4
0.007 9	0.003 8	-0.272 5	-0.027 8	0.677 0	-0.030 1	0.584 2	0.319 6	-0.630 5	0.043 1	8.201 2	0.120 0
-0.020 0	0.003 1	-0.008 0	-0.393 7	0.005 2	-0.102 2	-0.017 4	1.611 7	0.716 4	-0.084 4	0.120 0	10.207 9



许加柱

收稿日期: 2011-04-11。

作者简介:

许加柱(1980), 男, 博士, 副教授, 主要从事现代电器设备的设计优化及仿真、交直流电能变换系统与新技术等研究及相关教学工作, xujiazhu@126.com。

(编辑 胡琳琳)