

DOI: 10.7667/PSPC171761

## 一种新的三绕组自耦变压器的非线性建模

张也<sup>1</sup>, 曹楠<sup>1</sup>, 章彬<sup>2</sup>, 伍国兴<sup>2</sup>, 黄炜昭<sup>2</sup>

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院), 北京 102200; 2. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 自耦变压器的精确建模在分析变压器运行于磁饱和区域的特性时至关重要。从单相三绕组自耦变压器的电磁关系入手, 推导出折算到高压侧的三绕组自耦变压器的等效电路。给出模型中的线性绕组漏阻抗参数和非线性激磁阻抗参数的计算方法, 并详细介绍了利用磁等值回路图得到激磁电抗非线性电感的方法。然后给出了利用 JA 磁滞模型编程实现非线性电感的方法。最后通过 FORTRAN 语言在 PSCAD 中搭建三绕组自耦变压器模型。仿真结果验证了所建模型能够准确地反映自耦变压器的非线性特性。

**关键词:** 三绕组自耦变压器; 非线性建模; 等效电路; 非线性电感

### A new nonlinear model of three-winding autotransformer

ZHANG Ye<sup>1</sup>, CAO Nan<sup>1</sup>, ZHANG Bin<sup>2</sup>, WU Guoxing<sup>2</sup>, HUANG Weizhao<sup>2</sup>

(1. NARI Group Co., Ltd., (State Grid Electric Power Research Institute, Beijing 102200, China;

2. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** The precise autotransformer model is crucial to analyze the characteristics of the transformer in the magnetic saturation region. In this paper, starting from the electromagnetic relationship of the single-phase three-winding autotransformer, the equivalent circuit of three-winding autotransformer converted to the high voltage side is derived. Then, the calculation method of linear winding leakage impedance parameter and nonlinear excitation impedance parameter is given. And the method of obtaining the nonlinear inductance of magnetizing reactance by using the magnetic equivalent circuit is introduced in detail. Then the method of using JA hysteresis model to realize the nonlinear inductance is given. Finally, a three-winding autotransformer model is built in PSCAD by FORTRAN language. The simulation results verify that the proposed model can accurately reflect the nonlinear characteristics of the autotransformer.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677068).

**Key words:** three-winding autotransformer; nonlinear modeling; equivalent circuit; nonlinear inductance

## 0 引言

自耦变压器由于效率高、造价低的优点, 在 220 kV 及以上电压等级的电网中应用越来越广泛, 截止 2002 年底在华东 500 kV 电网中自耦变压器的数目已经占到 80% 以上<sup>[1]</sup>。尤其是在交流特高压中的应用, 如 1 000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程就采用由三台单相三绕组自耦变压器构成的三相三绕组自耦变压器<sup>[2]</sup>。由铁磁材料构成的自耦变压器在电网轻载、电压较高时, 很可能成为一种谐波源; 在中性点接地受到地电位升的影响产生直流侵入绕组的直流偏磁情况下, 变压器运

行在磁饱和区域, 激磁电流严重畸变<sup>[3-6]</sup>。所以在研究自耦变压器的谐波特性和直流偏磁特性时以及电网的故障暂态仿真中, 精确地建立自耦变压器的模型至关重要。

在研究自耦变压器电磁暂态特性时, 需应用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件进行建模, 可 PSCAD 只提供两绕组的自耦变压器模型, 没有三绕组自耦变压器的模型, 所以需要研究并搭建三绕组非线性自耦变压器。文献[7]仅给出了单相两绕组自耦变压器的等效电路, 但应用更多是三绕组自耦变压器; 文献[2]提出了一种适用于谐波分析的单相三绕组自耦变压器的非线性模型, 通过引入  $i_t-u$  和  $i_1-u$  瞬时特性曲线来求解激磁阻抗, 而瞬时特性曲线的数值模拟无论采用插值法还是函数拟合法都存

在一定误差, 甚至存在在曲线的某些区域误差较大的情况。文献[8-14]都是普通三相三绕组变压器的电磁模型的建立方法, 但可以为单相三绕组自耦变压器的非线性建模提供参考。从这些文献中可以知道变压器铁芯的电磁模型的建立包含两部分, 即铁芯磁化特性的描述和磁路到电路的转换, 磁化特性的描述通常采用 JA(Jiles-Atherton)磁滞模型; 铁芯磁路到电路的转换有统一磁路模型 UMEC(Unified Magnetic Equivalent Circuit)法、对偶原理法等<sup>[15-20]</sup>。

综上所述, 本文首先从单相三绕组自耦变压器的电磁关系入手得到基本方程式, 推导出变压器的等效电路, 给出等效电路中参数的计算方法; 然后着重研究了励磁支路非线性激磁电抗的电感  $L$  的实现方法, 即利用 JA 磁滞模型得到磁导率  $\mu$ 、利用磁等值回路得到  $L$  与磁导率  $\mu$  的关系。最后在 PSCAD 中搭建一个额定电压为 525 kV 的单相三绕组自耦变压器的非线性模型, 仿真得出该变压器在直流偏磁情况下的电磁特性, 验证了所建模型能够较准确地表征自耦变压器的非线性特性。

## 1 单相三绕组自耦变压器基本方程式的推导

图 1 为单相自耦变压器的绕组结构和磁路。图中给出了各物理量的正方向。 $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 、 $\dot{U}_3$  是高压侧、中压侧、低压侧电压;  $\dot{E}_1$ 、 $\dot{I}_1$ 、 $N_1$  是串联绕组 Aa 的电动势、电流和匝数;  $\dot{E}_2$ 、 $\dot{I}$ 、 $N_2$  是公共绕组 ax 的电动势、电流和匝数;  $\dot{I}_2$  是中压侧负载的电流;  $\dot{E}_3$ 、 $\dot{I}_3$ 、 $N_3$  是低压侧绕组的电动势、电流和匝数。下面分析自耦变压器的基本方程式。

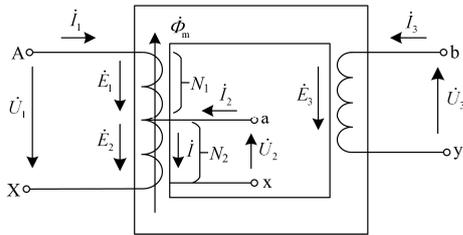


图 1 自耦变压器绕组联接与磁路

Fig. 1 Winding connection and magnetic circuit of the autotransformer

高压侧回路电压方程式为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_2 + \dot{I}_1 Z_{Aa} + \dot{I} Z_{ax} \quad (1)$$

中压侧回路电压方程式为

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I} Z_{ax} \quad (2)$$

低压侧回路电压方程式为

$$\dot{U}_3 = \dot{E}_3 - \dot{I}_3 Z_{by} \quad (3)$$

式中:  $Z_{Aa}$  是串联绕组 Aa 的漏阻抗;  $Z_{ax}$  是公共绕组 ax 的漏阻抗;  $Z_{by}$  是低压绕组的漏阻抗。

在图中的节点 a 处的电流关系为  $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}$ 。按照全电流定律, 自耦变压器串联绕组磁动势  $\dot{I}_1 N_1$ 、公共绕组磁动势  $\dot{I} N_2$  和低压侧绕组磁动势  $\dot{I}_3 N_3$  之和为励磁磁动势  $\dot{I}_0 (N_1 + N_2)$ , 即

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I} N_2 + \dot{I}_3 N_3 = \dot{I}_0 (N_1 + N_2) \quad (4)$$

把  $-(\dot{E}_1 + \dot{E}_2)$  用励磁电流  $\dot{I}_0$  在励磁阻抗  $Z_m$  上的压降表示, 即

$$-(\dot{E}_1 + \dot{E}_2) = \dot{I}_0 Z_m \quad (5)$$

令高压侧和中压侧绕组的变比为  $k_A$ , 高压侧和低压侧绕组的变比为  $k_B$ , 有

$$k_A = \frac{E_1 + E_2}{E_2} = \frac{N_1 + N_2}{N_2}, k_B = \frac{E_1 + E_2}{E_3} = \frac{N_1 + N_2}{N_3} \quad (6)$$

利用折合算法, 把自耦变压器中压侧和低压侧的量折合到高压侧, 把式(4)等式两边同时除以  $(N_1 + N_2)$ , 得

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1 + N_2} + \dot{I}_3 \frac{N_3}{N_1 + N_2} = \dot{I}_0 \\ \dot{I}'_2 = \dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1 + N_2} = \dot{I}_2 \frac{1}{k_A} \\ \dot{I}'_3 = \dot{I}_3 \frac{N_3}{N_1 + N_2} = \dot{I}_3 \frac{1}{k_B} \end{array} \right\} \Rightarrow \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 = \dot{I}_0 \quad (7)$$

把式(2)等号两边同乘以  $k_A$ , 得:

$$\dot{U}_2 k_A = \dot{E}_2 k_A - \dot{I} k_A Z_{ax} \Rightarrow \dot{U}'_2 = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 - \dot{I} k_A Z_{ax} \quad (8)$$

把式(1)与式(8)相加得:

$$\dot{U}_1 + \dot{U}'_2 = \dot{I}_1 [Z_{Aa} + (1 - k_A) Z_{ax}] + \dot{I}'_2 k_A (1 - k_A) Z_{ax} \quad (9)$$

把式(3)等号两边同乘以  $k_B$ , 得

$$\dot{U}_3 k_B = \dot{E}_3 k_B - \dot{I}_3 k_B Z_{by} \Rightarrow \dot{U}'_3 = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 - \dot{I}_3 k_B Z_{by} \quad (10)$$

把式(1)与式(10)相加得:

$$\dot{U}_1 + \dot{U}'_3 = \dot{I}_1 [Z_{Aa} + (1 - k_A) Z_{ax}] + (\dot{I}_1 + \dot{I}'_2) k_A Z_{ax} - k_B^2 Z_{by} \dot{I}'_3 \quad (11)$$

## 2 等效电路图

根据推导出的式(1)、式(5)、式(7)、式(9)和式(11)可以画出折算到高压侧的自耦变压器的等效电路图, 如图 2 所示,  $k_A : 1$  和  $k_B : 1$  所代表的变压器为理想变压器。从图中可以看出, 高压绕组和中压绕组并联后串联一个与公共绕组漏阻抗相关的绕组再与低压绕组并联, 再与激磁绕组串联。

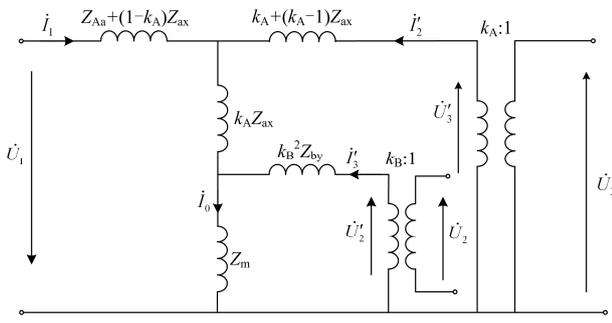


图2 单相自耦变压器的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of a single-phase autotransformer

### 3 绕组漏抗和非线性激磁阻抗的参数

自耦变压器模型的建立, 除了建立等效电路拓扑图, 还需得到图中各绕组的参数。

#### 3.1 线性绕组漏抗

令  $Z_{GZ} = R_{GZ} + jX_{GZ}$ 、 $Z_{GD} = R_{GD} + jX_{GD}$ 、 $Z_{ZD} = R_{ZD} + jX_{ZD}$  分别为高中、高低、中低绕组的短路阻抗。由图2的等效电路可以得到高中绕组加电压、低压绕组开路的短路阻抗; 高低绕组加电压、中压绕组开路的短路阻抗; 中低绕组加电压、高压绕组开路的短路阻抗。可以求出公共绕组、串联绕组、低压绕组漏阻抗与自耦变压器高中、高低、中低绕组短路阻抗的关系为

$$\begin{cases} Z_{ax} = \frac{Z_{GZ} + Z_{ZD} - Z_{GD}}{2k_A^2 - 2k_A} \\ Z_{Aa} = Z_{GZ} - (k_A - 1)^2 Z_{ax} \\ Z_{by} = \frac{Z_{ZD}}{k_B^2} - \left(\frac{k_A}{k_B}\right)^2 Z_{ax} \end{cases} \quad (12)$$

#### 3.2 非线性激磁阻抗的电感 L

非线性激磁阻抗  $Z_m$  的确立对自耦变压器模型的建立至关重要。基于磁等值回路得到变压器铁芯磁路到电路的转换模型, 可以反映变压器铁芯的结构对变压器励磁电流的影响, 在计算变压器运行于磁饱和区域的直流偏磁工况时具有较高的准确度。已提出的有统一磁路模型 UMEC(Unified Magnetic Equivalent Circuit)法、对偶原理法和笔者提出的基于电流分解和绕组等效的变压器铁芯电磁转换方法。考虑了铁芯结构的励磁支路模型不再是一个非线性电感, 而是根据铁芯结构的不同, 由多个非线性电感串联和并联构成。

由图1的自耦变压器的绕组联接和磁路结构图, 可以得到如图3所示的磁等值回路图, 图中  $p_1$  是左铁芯柱的磁导,  $p_2$  是右铁芯柱的磁导,  $p_3$  是

上铁轭的磁导。

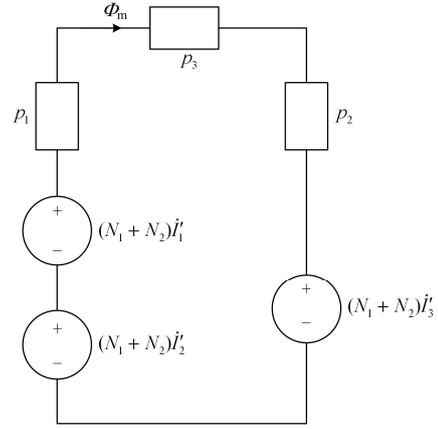


图3 单相自耦变压器的磁等值回路

Fig. 3 Magnetic equivalent circuit of a single-phase autotransformer

磁等值电路中有一个独立的回路, 根据安培环路定律有:

$$(N_1 + N_2) \left( i_1 \frac{N_1}{N_1 + N_2} + i_2 \frac{N_2}{N_1 + N_2} + i_3 \frac{N_3}{N_1 + N_2} \right) = \frac{\phi}{p_1} + \frac{\phi}{p_2} + \frac{\phi}{p_3} \quad (13)$$

把式(13)左侧的电流进行变换可得:

$$(N_1 + N_2) (i_1 + i'_2 + i'_3) = \phi \left( \frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} + \frac{1}{p_3} \right) \quad (14)$$

图3所示磁等值回路中的磁通为

$$\phi = (N_1 + N_2) (i_1 + i'_2 + i'_3) / \left( \frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} + \frac{1}{p_3} \right) = \int \frac{e}{N_1 + N_2} dt \quad (15)$$

又因为  $e = (N_1 + N_2) \frac{d\phi}{dt}$ , 可得:

$$e = (N_1 + N_2)^2 \left( \frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} + \frac{1}{p_3} \right) \left( \frac{di_1}{dt} + \frac{di'_2}{dt} + \frac{di'_3}{dt} \right) = L \left( \frac{di_1}{dt} + \frac{di'_2}{dt} + \frac{di'_3}{dt} \right) \quad (16)$$

所以激磁电抗的等效电感  $L$  为

$$L = (N_1 + N_2)^2 / \left( \frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} + \frac{1}{p_3} \right) \quad (17)$$

从式(17)可以看出激磁电抗相当于是电感分别为  $L_1 = (N_1 + N_2)^2 p_1$ 、 $L_2 = (N_1 + N_2)^2 p_2$ 、

$L_3 = (N_1 + N_2)^2 p_3$  的三个电感支路的并联, 三个电感与三个磁导相对应, 三个支路的电流分别为  $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$ 。由于磁等值电路图中只有一个磁通回路所以应用电流分解和绕组等效的方法得到非线性电感的过程得到简化, 可以直接得到等效出的一个等效电感的表达式, 但其实是三个非线性电感  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  的并联。

磁导和磁导率的关系为

$$p_k = \frac{\mu S_k}{l_k} = \frac{dB}{dH} \frac{S_k}{l_k} (k=1 \sim 3) \quad (18)$$

式中:  $k$  表示与三个磁导对应的等效出的三个支路的编号;  $\mu = \frac{dB}{dH}$  为磁导率, 由 B-H 曲线决定, 可根据 JA 模型计算得到。磁导率非线性变化时, 磁导也非线性变化,  $S_k$  为对应位置铁芯或铁轭的截面积,  $l_k$  为对应铁芯或铁轭的等效磁路长度。式(18)激磁电抗的等效电感可变换为

$$L = (N_1 + N_2)^2 \left[ \frac{1}{\mu} \left( \frac{l_1}{S_1} + \frac{l_2}{S_2} + \frac{l_3}{S_3} \right) \right] \quad (19)$$

激磁阻抗由电阻  $R$  和非线性电感  $L$  串联而成, 从式(19)可以看出  $L$  由非线性变化的磁导率  $\mu$  决定,  $\mu$  随着磁场强度  $H$  的变化而变化, 可以根据 JA (Jiles-Atherton) 磁滞模型计算得到。

JA 模型描绘的是 M-H 磁滞回线, 输入上一时刻的磁场强度  $h_i$ 、磁化强度  $M_i$ 、下一时刻的磁场强度  $h_{i+1}$  以及 5 个参数  $M_s, a, \alpha, c, k$ , 通过 JA 模型就可以得到下一时刻的磁化强度  $M_{i+1}$ , 这是一个循环。得到的输出再作为下一次循环的输入, 进行循环计算就可以得到各个时刻的磁场强度和磁化强度, 由此可画出 M-H 曲线, 最后再根据公式  $B_i = \mu_0 (M_i + h_i)$  可以得到 B-H 曲线。

JA 模型的 5 个输入参数  $M_s, a, \alpha, c, k$  分别决定了磁滞回线的饱和特性和损耗特性, 当变压器工作在磁饱和和区域时, 要准确仿真直流偏磁时变压器的励磁电流波形, JA 模型 5 个参数的取值至关重要。 $M_s$  表示铁磁物质的饱和磁化强度,  $a$  表征非磁滞磁化曲线形状的参数, 具有磁场的量纲,  $\alpha$  为平均场参数, 反映磁畴间的耦合, 由实验测得,  $c$  表征磁畴可逆运动的参数, 等于正常与非磁滞磁化曲线的初始微分磁化率之比,  $k$  反映对磁畴运动牵制作用的参数, 代表磁滞特性。

### 3.3 非线性电感 L 支路的实现

非线性电感支路可以写成  $u_{km} = ri + Ldi/dt$ , 根据梯形公式把该式进行离散化, 写为

$$\frac{u_{km}(t) + u_{km}(t - \Delta t)}{2} = r \frac{i_{km}(t) + i_{km}(t - \Delta t)}{2} + L \frac{i_{km}(t) - i_{km}(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (20)$$

化简整理可得:

$$i_{km}(t) = \frac{2L - r\Delta t}{2L + r\Delta t} i_{km}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L + r\Delta t} (u_{km}(t) + u_{km}(t - \Delta t)) = \frac{h}{2L + rh} u_{km}(t) + \frac{2L - rh}{2L + rh} i_{km}(t - \Delta t) + \frac{h}{2L + rh} u_{km}(t - \Delta t) = G \cdot u_{km}(n) + I(n-1) \quad (21)$$

式中,  $\Delta t = h$  为仿真步长。上式表明非线性电感可以由一个注入的电流源和一个变化的电导构成, 等效电路如图 4 所示。非线性电感支路的电流由上一时刻的支路电流和电压以及该时刻的支路电压计算得到。

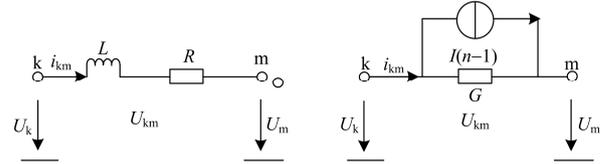


图 4 非线性电感等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of nonlinear inductance

在 PSCAD 中自定义元件实现基于 JA 理论的非线性电感, 利用 FORTRAN 与 C 语言进行编程, 编程计算的流程为: 把上一时刻的磁场强度  $h_{i-1}$ 、上一时刻的磁化强度  $M_{i-1}$ 、该时刻的磁场强度  $h_i$  和 5 个参数  $M_s, a, \alpha, c, k$  输入到 JA 模型; 计算得到该时刻的磁化强度  $M_i$ 、磁通密度  $B_i$ , 由公式  $\mu_i = dB_i/dH_i$  计算非线性磁导率, 再由式(19)计算得到非线性电感  $L_i$ ; 由式(21)根据线路中获得的上一时刻电流  $i_{km}(t - \Delta t)$ 、电压  $u_{km}(t - \Delta t)$  和该时刻的电压  $u_{km}(t)$ , 计算得到该时刻的电流  $i_{km}(t)$ ; 根据安培环路定律  $h_{i+1}l = (N_1 + N_2)i_{km}(t)$  计算得到下一时刻的磁场强度  $h_{i+1}$ , 其中  $l$  是整个磁通回路的长度。至此完成一个计算循环, 该方法在逻辑上面比较严密, 非线性电感的实现过程如图 5 所示。

## 4 仿真算例

### 4.1 仿真参数

根据图 2 搭建单相自耦变压器的等效电路, 其中激磁电抗按照图 5 所示的流程图在 PSCAD 中自定义元件利用 FORTRAN 语言编程实现。变压器的参数如表 1 所示。

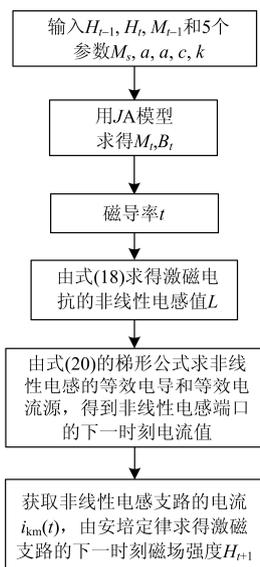


图 5 非线性电感的实现流程图

Fig. 5 Realization flow chart of nonlinear inductance

表 1 变压器的参数

Table 1 Parameters of the transformer

参数名称	参数值	参数名称	参数值
容量高/MVA	750	串联绕组匝数 $N_1$	673
容量中/MVA	750	公共绕组匝数 $N_2$	524
容量低/MVA	240	低压绕组匝数 $N_3$	82
高压额定电压/kV	525	$\Delta P_k$ 高中/kW	1 044.3
中压额定电压/kV	230	$\Delta P_k$ 高低/kW	374.7
低压额定电压/kV	36	$\Delta P_k$ 中低/kW	345.9
$U_k$ 高中/%	17.2	$U_k$ 中低/%	29.3
$U_k$ 高低/%	50.2	—	—

根据串联绕组匝数、公共绕组匝数和低压绕组匝数可以求得变比  $k_A$ 、 $k_B$ ；由变压器的短路损耗值  $\Delta P_k$  和短路电压百分值  $U_k(\%)$  可以求得高中、高低、中低绕组的电阻  $R_{GZ}$ 、 $R_{GD}$ 、 $R_{ZD}$  和电抗  $X_{GZ}$ 、 $X_{GD}$ 、 $X_{ZD}$ ；根据式(12)可求得等效电路图中的串联绕组阻抗  $R_{Aa}$  和  $X_{Aa}$ 、公共绕组阻抗  $R_{ax}$  和  $X_{ax}$ 、低压侧绕组阻抗  $R_{by}$  和  $X_{by}$ 。计算得到的参数如表 2 所示。

根据表 1 变压器的参数和表 2 计算得到的参数按照图 2 在 PSCAD 中搭建单相自耦变压器。JA 模型构造的磁滞回线如图 6 所示。

#### 4.2 变压器空载无直流入侵运行工况

图 7 分别是空载无直流入侵时励磁支路的磁通密度、磁场强度、励磁电流和励磁电压的波形图，从图中可以看出各电磁量呈正负半轴对称的正弦波，变压器铁芯运行在磁化曲线的线性区，此时没有谐波产生。

表 2 由变压器的参数计算得到的阻抗值

Table 2 Impedance values calculated by the parameters of the transformer

参数名称	参数值	参数名称	参数值
变比 $k_A$	2.28	公共绕组电阻 $R_{Aa}/\Omega$	0.403
变比 $k_B$	15	串联绕组电阻 $R_{ax}/\Omega$	0.065
高中绕组电阻 $R_{GZ}/\Omega$	0.51	低压绕组电阻 $R_{by}/\Omega$	0.005 8
高低绕组电阻 $R_{GD}/\Omega$	1.79	公共绕组电抗 $X_{Aa}/\Omega$	67.025
中低绕组电阻 $R_{ZD}/\Omega$	1.66	串联绕组电抗 $X_{ax}/\Omega$	-2.328
高中绕组电抗 $X_{GZ}/\Omega$	63.21	低压绕组电抗 $X_{by}/\Omega$	0.532
高低绕组电抗 $X_{GD}/\Omega$	184.5	中低绕组电抗 $X_{ZD}/\Omega$	107.7

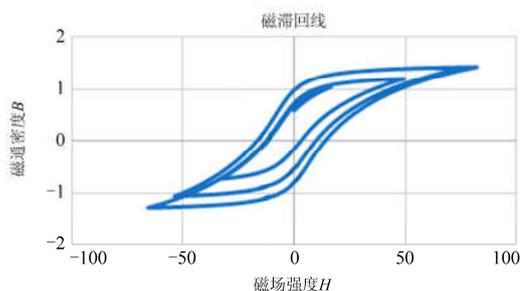
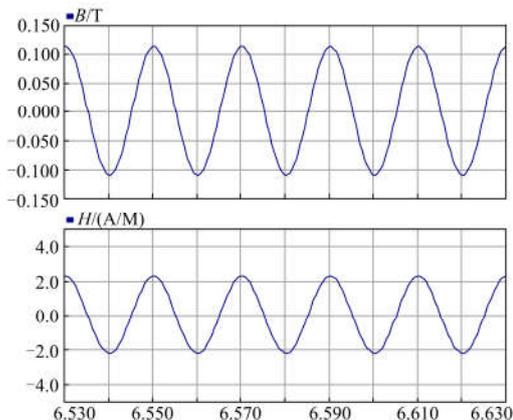


图 6 BH 磁滞回线

Fig. 6 BH hysteresis loop

#### 4.3 变压器空载有直流入侵运行工况

图 8 是变压器空载中性点有直流入侵时励磁支路的磁通密度、磁场强度、励磁电流、励磁电压，从图中可以看出磁通严重饱和，变压器的交流磁通上会叠加直流磁通，磁场强度  $H$  和励磁电流的波形严重偏向正半轴，波形发生严重畸变。



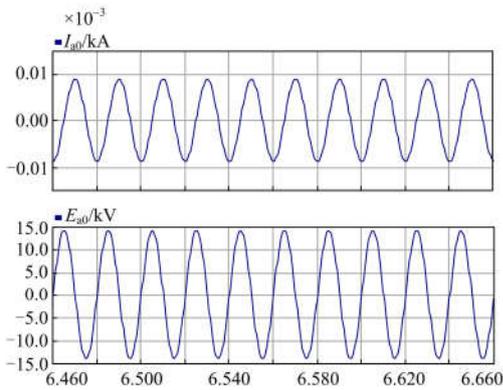


图 7 空载运行工况下的各电磁量

Fig. 7 Electromagnetic quantities under no-load operating conditions

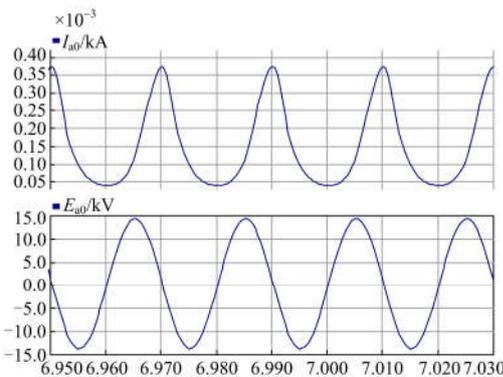
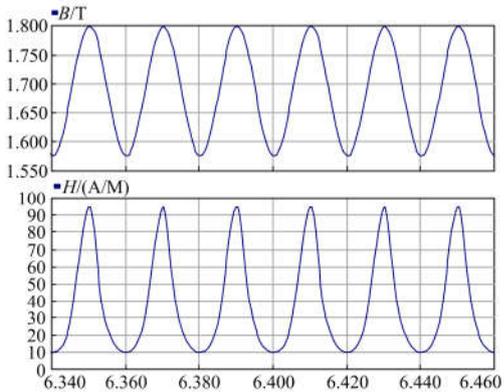


图 8 直流偏磁运行工况下的各电磁量

Fig. 8 Electromagnetic quantities under no-load DC bias operation

图 9 为直流偏磁运行工况下各电磁量的含量分析, 从图中可看出, 偏磁工况下自耦变励磁电流中含有大量低次谐波, 尤其是直流量和较高的二次谐波分量。从仿真结果可以看出本文提出的基于磁等值回路的单相三绕组自耦变压器的非线性建模方法可以较精确的表征变压器的铁磁特性。

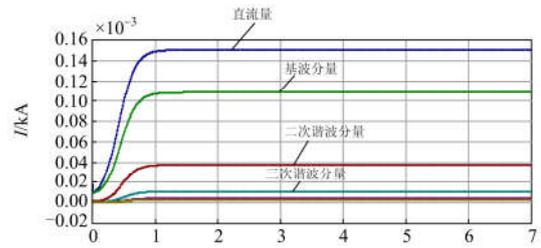


图 9 直流偏磁运行工况下的谐波含量分析

Fig. 9 Analysis of harmonic content under no-load DC bias operation

### 5 结论

鉴于自耦变压器在高压交流系统研究中精确建模的必要性, 本文给出了由变比、串联绕组阻抗、公共绕组阻抗和低压侧绕组阻抗构成的单相三绕组自耦变压器的等效电路图, 然后基于磁等值回路给出了表征铁芯电磁特性的非线性电感的表达式, 基于 JA 磁滞模型给出了非线性电感的实现方法, 从而得到了单相自耦变压器的完整建模方法, 所建的模型可用于交流系统暂态特性的仿真分析、变压器直流偏磁特性的分析、变压器谐波特性的分析, 具有实际应用价值。

### 参考文献

- [1] 赵亮亮, 陈超英. 电力系统暂态仿真中自耦变压器模型的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(1): 83-88. ZHAO Liangliang, CHEN Chaoying. Study of model of three-phases autotransformer in electric system transient simulation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2004, 16(1): 83-88.
- [2] 岳昊, 徐永海, 刘颖英, 等. 特高压交流系统三绕组自耦变压器非线性模型的研究[J]. 电工电能新技术, 2010, 29(3): 44-48, 53. YUE Hao, XU Yonghai, LIU Yingying, et al. Study of nonlinear model of three-winding autotransformer in ultra high voltage AC transmission system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2010, 29(3): 44-48, 53.
- [3] 全江涛, 谢志成, 陈科基, 等. 特/超高压直流输电系统单极大地回线运行下变压器中性点直流电流分布规律仿真分析[J]. 高压技术, 2015, 41(3): 787-793. QUAN Jiangtao, XIE Zhicheng, CHEN Keji, et al. Mechanism analysis and simulation of DC current distribution along transformer neutral point under the condition of UHVDC/HVDC single-pole operation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 787-793.
- [4] 陈志伟, 白保东, 陈德志, 等. 电力变压器直流偏磁现象形成机理及一种抑制措施的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 208-214. CHEN Zhiwei, BAI Baodong, CHEN Dezhi, et al. Research on the formation mechanism and suppression method of

- transformer DC bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 208-214.
- [5] 童莉. 500 kV 自耦变压器直流偏磁的仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 9-15.  
DONG Li. Research of DC magnetic bias on 500 kV auto-transformer[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008: 9-15.
- [6] 曹楠, 王天正, 王冬青, 等. 变压器直流偏磁治理站点选择优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 117-122.  
CAO Nan, WANG Tianzheng, WANG Dongqing, et al. Study on configuration optimization method of transformer magnetic bias treatment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 117-122.
- [7] 李发海, 朱东起. 电机学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 83-85.
- [8] 白保东, 赵晓旋, 陈德志, 等. 基于 J-A 模型对直流偏磁条件下变压器励磁电流的模拟及实验研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊 2): 162-166.  
BAI Baodong, ZHAO Xiaoxuan, CHEN Dezhi, et al. Simulation and experiment research on transformer excitation current under DC magnetic bias based on J-A model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 162-166.
- [9] 李晓萍, 文习山, 樊亚东, 等. 直流入侵三相三柱变压器励磁电流及谐波计算[J]. 高电压技术, 2006, 32(5): 69-72.  
LI Xiaoping, WEN Xishan, FAN Yadong, et al. Computation of exciting current and harmonic for three-phase and three limbs transformer under DC inrushing[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5): 69-72.
- [10] 王燕, 皇甫成, 赵淑珍, 等. 考虑铁磁磁滞的变压器励磁涌流仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 78-83.  
WANG Yan, HUANGFU Cheng, ZHAO Shuzhen, et al. A simulation study for magnetizing inrush current of transformers on account of ferromagnetic hysteresis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 78-83.
- [11] 王洋, 刘志珍. 基于 Jiles-Atherton 磁滞理论的直流偏磁下铁心损耗预测[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 313-323.  
WANG Yang, LIU Zhizhen. The forecasting method of core loss under DC bias based on the Jiles Atherton hysteresis theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 313-323.
- [12] 索南加乐, 许立强, 焦在滨. 三相多芯柱变压器暂态仿真新模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 57-62.  
SUONAN Jiale, XU Liqiang, JIAO Zaibin. New transient simulation model of three-phase multi-legged transformer[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 57-62.
- [13] 章彬, 伍国兴, 黄炜昭, 等. 一种新的变压器磁路到电路的转换模型及多种方法的统一[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 128-135.  
ZHANG Bin, WU Guoxing, HUANG Weizhao, et al. A new conversion model of transformer from magnetic circuit to electric circuit and the unification of various methods[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 128-135.
- [14] 刘海军, 李刚, 王志凯, 等. 面向中高压智能配电网的电力电子变压器建模方法与控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 85-93.  
LIU Haijun, LI Gang, WANG Zhikai, et al. Research on medium and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer modeling and control strategies[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 85-93.
- [15] 林济铿, 王超, 吕晓艳, 等. 采用统一磁路及空载试验的变压器饱和模型[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 422-428.  
LIN Jikeng, WANG Chao, LÜ Xiaoyan, et al. Saturation model of transformer using unified magnetic equivalent circuit model and no-load experiment[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 422-428.
- [16] WU Yahui, DONG Xinzhou, MIRSÆIDI S. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on Preisach Theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 111-121. DOI: 10.1186/s41601-017-0046-0.
- [17] 郑涛, 韩东伟, 朱先启, 等. 直流偏磁条件下变压器的建模及励磁特性研究[J]. 现代电力, 2013, 30(1): 36-41.  
ZHENG Tao, HAN Dongwei, ZHU Xianqi, et al. Research on the modeling and excitation on characteristics of the transformer under DC bias[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(1): 36-41.
- [18] 戴魏, 郑玉平, 白亮亮, 等. 保护用电流互感器传变特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 46-54.  
DAI Wei, ZHENG Yuping, BAI Liangliang, et al. Analysis of protective current transformer transient response[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 46-54.
- [19] 皇甫成, 魏远航, 钟连宏, 等. 基于对偶性原理的三相多芯柱变压器暂态模型[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 83-88.  
HUANG Fucheng, WEI Yuanhang, ZHONG Lianhong, et al. A transient model of three phase multi-legged transformer based on duality theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3): 83-88.
- [20] 杨晓辉, 王丰华, 段若晨, 等. 500 kV 电力变压器直流偏磁耐受性能的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 60-66.  
YANG Xiaohui, WANG Fenghua, DUAN Ruochen, et al. Simulation study of DC bias enduring ability of 500 kV power transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 60-66.

收稿日期: 2017-12-28; 修回日期: 2018-04-11

作者简介:

张也(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事变压器直流偏磁计算和微网逆变器控制的研究。E-mail: zhangyenumber@163.com

(编辑 姜新丽)