

# 一种三相三绕组变压器的电磁暂态模型研究

王 彪 甄 威

( 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

**摘要:** 基于变压器的等值电路图,提出一种可模拟变比、联结组、内部故障和相间耦合等特性的三相三绕组变压器电磁暂态仿真模型,并给出详细的计及变比和联结组特性的变压器模型推导公式。计算结果与商业软件 PSCAD 比较,可得所提出的模型准确、可信,能满足实际工程和研究分析的需求。

**关键词:** 电磁暂态; 三相三绕组变压器; 变压器模型

**Abstract:** Based on the equivalent circuit diagram of transformer, a new electromagnetic transient simulation model for three-phase three-winding transformer is proposed which could simulate the characteristics of transformation ratio, connection symbol, internal fault and interphase coupling and so on, and a detailed derivation formula of transformer model is given which considers the characteristics of transformation ratio and connection symbol. The proposed model is accurate and reliable, and satisfied with the actual needs of engineering and research comparing with PSCAD.

**Key words:** electromagnetic transient; three-phase three-winding transformer; transformer model

中图分类号: TM723 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)05-0017-03

## 0 引 言

变压器模型在电磁暂态仿真中是较难模拟的元件之一,完善的变压器模型不仅能够模拟变比、联结组等基本特性,还可模拟相间耦合特性、磁饱和特性、内部故障等复杂特征。诸多学者在该方向开展了大量研究工作,提出多种变压器模型,大致分为两类,一是基于等值电路图,二是基于受控电流源。

对于三绕组变压器模型,文献[1]和文献[2]基于等值电路图,将三绕组变压器的励磁支路独立考虑,但是那样不能有效考虑变压器的联结组方式。

文献[3]介绍了基于等值电路图的三相双绕组变压器模型,文献[4]基于等值电路图,建立自耦变压器模型,但是这两篇文献没有给出详细的推导公式。

文献[5]提出不同暂态阶段仿真的变压器模型,其中的电磁暂态模型是基于受控电流源原理建立的。该模型不便于模拟变压器内部故障等特性。

基于变压器的等值电路图,建立了三相三绕组电磁暂态仿真模型,该模型可有效模拟变比、联结组、内部故障和相间耦合等特性,提出了通过变比矩阵模拟变比特性和拓扑结构图模拟联结组特性的方

法,揭示了通过矩阵关系无法模拟含有三角形接法的联结组特性的原因,给出了详尽的模拟变比和联结组特性的推导公式,并简述模拟内部故障和相间耦合特性的方法。经与 PSCAD 软件计算结果对比,两者误差小于 3%,满足实际工程<sup>[6]</sup>和研究分析的使用需求。

## 1 三相三绕组变压器模型

首先介绍建立三相三绕组变压器模型的思路:当不考虑变比、联结组和相间耦合等特性时的单相三绕组变压器阻抗关系电气图类似于三相输电线路的电气图,建立单相三绕组电压方程,并差分化得到差分方程;再通过理想变压器模拟变比特性,其中理想变压器采用电压电流的关系矩阵(这里亦称为变比矩阵)模拟,带入上述的差分方程中,即可实现计及变比特性的变压器模型;对于变压器的联结组特性的模拟,根据其联结方式绘制三相暂态等值电路图,容易得出不同联结方式下变压器的电导矩阵、节点注入电流与等值电流源的关系,从而实现各种联结方式的模拟,包括对变压器中性点的模拟,并且中性点可连接单相电流互感器、击穿间隙等单相元件。

这样便实现了考虑变比和联结组特性、不计及

相间耦合特性的三相三绕组变压器模型,该模型经稍微修改还可模拟变压器的内部故障和相间耦合等复杂特性。

下面给出计及变比和联结组特性的三相三绕组变压器模型的详细推导公式,以单相变压器为例。

不考虑变比时三绕组变压器的A相阻抗关系电路图如图1所示。(注:各绕组已折算至1绕组侧。)

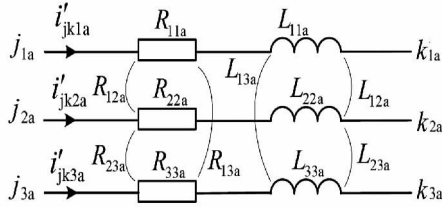


图1 三绕组变压器A相阻抗关系电路图

其中j侧为变压器各绕组的端口侧;k侧为各绕组的中性点侧。A相各绕组的电压方程为

$$L \frac{di'_{jka}(t)}{dt} + Ri'_{jka}(t) = u'_{ja}(t) - u'_{ka}(t) \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} i'_{jka}(t) &= [i'_{jk1a}(t) \quad i'_{jk2a}(t) \quad i'_{jk3a}(t)]^T \\ u'_{ja}(t) &= [u'_{j1a}(t) \quad u'_{j2a}(t) \quad u'_{j3a}(t)]^T \\ u'_{ka}(t) &= [u'_{k1a}(t) \quad u'_{k2a}(t) \quad u'_{k3a}(t)]^T \\ R &= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}^T \quad L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中R和L为A相绕组的电阻和电抗矩阵,可由绕组的漏阻抗和励磁阻抗得到; $i'_{jka}$ 是A相绕组的电流向量; $u'_{ja}$ 和 $u'_{ka}$ 为A相绕组j端和k端的电压向量。

应用隐式梯形法将阻抗支路用等值电流源和纯电阻代替。若电网发生扰动,始终应用隐式梯形法进行数值积分运算,将引起数值振荡。当电网发生扰动时,采用两个半步长的后退欧拉法计算,之后再返回隐式梯形法。因此将给出两种算法的详细推导公式。

对于步长 $t - \Delta t$ 到 $t$ ,应用隐式梯形法和后退欧拉法分别导出式(1)的差分方程、等值电流源及其递推计算公式如式(3)和式(4)所示。

$$\left. \begin{aligned} i'_{jka}(t) &= G_a [u'_{ja}(t) - u'_{ka}(t)] + I_a(t - \Delta t) \\ I_a(t - \Delta t) &= I_{coa} i'_{jka}(t - \Delta t) \\ &+ G_a [u'_{ja}(t - \Delta t) - u'_{ka}(t - \Delta t)] \\ &= I_{coa} I_a(t - 2\Delta t) \\ &+ U_{coa} [u'_{ja}(t - \Delta t) - u'_{ka}(t - \Delta t)] \\ i'_{jka}(t) &= G_a [u'_{ja}(t) - u'_{ka}(t)] + I_{ao}(t - \Delta t) \\ I_{ao}(t - \Delta t) &= G_a \frac{2L}{\Delta t} i'_{jka}(t - \Delta t) \\ &= G_a \frac{2L}{\Delta t} I_{ao}(t - 2\Delta t) \\ &+ G_a \frac{2L}{\Delta t} G_a [u'_{ja}(t - \Delta t) - u'_{ka}(t - \Delta t)] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中,

$$G_a = \left[ \frac{2L}{\Delta t} + R \right]^{-1} I_{coa} = [E - 2G_a R]$$

$$U_{coa} = 2 [G_a - G_a R G_a]$$

其中E为单位矩阵; $G_a$ 为用隐式梯形法推导阻抗支路的对应电导矩阵; $I_{coa}$ 为隐式梯形法等值电流源的电流系数矩阵; $U_{coa}$ 为隐式梯形法等值电流源的电压系数矩阵。

A相绕组的暂态等值计算电路图如图2所示。

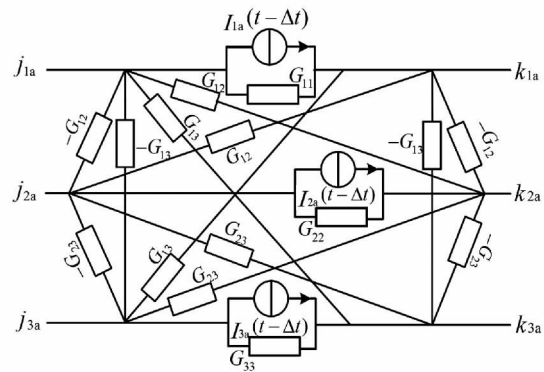


图2 三绕组变压器A相暂态等值计算电路图

对于变压器的变比,利用绕组电压/电流与端点电压电流的关系矩阵模拟。因为变压器参数已折算至绕组1侧,则有电压电流关系矩阵为

$$\left. \begin{aligned} u_{j1a} - u_{k1a} &= u'_{j1a} - u'_{k1a} \\ u_{j2a} - u_{k2a} &= (u'_{j2a} - u'_{k2a}) / k_{12} \\ u_{j3a} - u_{k3a} &= (u'_{j3a} - u'_{k3a}) / k_{13} \\ i'_{ij1a} &= i'_{ij1a} \\ i'_{ij2a} &= k_{12} i'_{ij2a} \\ i'_{ij3a} &= k_{13} i'_{ij3a} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 $k_{12}$ 为1侧绕组电压与2侧的比值; $k_{13}$ 为1侧绕组电压与3侧的比值; $u_{ja}$ 和 $u_{ka}$ 为考虑变比后的变

压器 A 相的端口侧和中性点侧的电压向量  $i_{jka}$  为流过变压器 A 相端口的电流向量。将式(5)代入式(3)中,可以得到考虑变比的变压器模型计算公式为

$$\begin{aligned} i_{jka}(t) &= G_T [u_{ja}(t) - u_{ka}(t)] + I_{Ta}(t - \Delta t) \\ I_{Ta}(t - \Delta t) &= I_{Tcoa} i_{jka}(t - \Delta t) \\ &+ G_{Ta} [u_{ja}(t - \Delta t) - u_{ka}(t - \Delta t)] \\ &= I_{Tcoa} I_{Ta}(t - 2\Delta t) \\ &+ U_{Tcoa} [u_{ja}(t - \Delta t) - u_{ka}(t - \Delta t)] \quad (6) \end{aligned}$$

$$G_{Ta} = T G_a T^{-1} I_{Tcoa} = T(E - 2G_a R) T^{-1}$$

$$U_{Tcoa} = 2T[G_a - G_a R G_a]T^{-1} T = \text{diag}(1 \ k_{12} \ k_{13})$$

相应地,将式(5)代入式(4)后,容易得到考虑变比的后退欧拉法变压器模型计算公式,在此省略。

这样可以方便地实现变压器变比的模拟。B相和C相的模型及公式与A相一致。

对于变压器的联结组模拟,根据其联结方式绘制三相暂态等值电路图,容易得出不同联结方式下变压器的电导矩阵、节点注入电流与等值电流源的关系,从而实现各种联结方式的模拟,包括对变压器中性点的模拟,并且中性点可连接单相电流互感器、击穿间隙等单相元件。值得注意的是,联结组不能用类似于变比矩阵的方法模拟,是因为当存在三角形联结方式时,联结组的关系矩阵不可逆,不能参与计算。

所提出的变压器模型也适用于两绕组变压器的模拟,只需要将每相等值电路图省去一个绕组即可。基于这里的三绕组变压器模型稍作修改也可模拟自耦变压器和变压器内部故障。将三绕组变压器中的两个绕组首末段相连,另一个绕组作为第三绕组,即可模拟自耦变压器。利用变压器匝间短路和相间短路的电气特征,基于阻抗关系电气图,可方便地构建多种变压器内部故障的阻抗关系电气图,再列出电压方程,从而实现变压器内部故障的模拟仿真。

## 2 模型验证

下面利用 PSCAD 和本程序仿真四川 220 kV 绵阳东智能变电站的绵阳东—宝珠寺线路 0.2 s 时发生 A 相接地故障,0.32 s 时切除故障。两者的绵阳东高压侧 I 母电压仿真曲线图分别如图 3 和图 4 所示,1 号主变压器高压侧中性点的电压曲线分别如图 5 和图 6 所示。这 4 幅图的对比结果如表 1 所示。

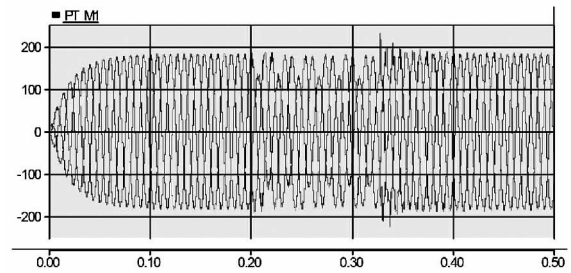


图3 PSCAD 仿真的 I 母电压曲线图

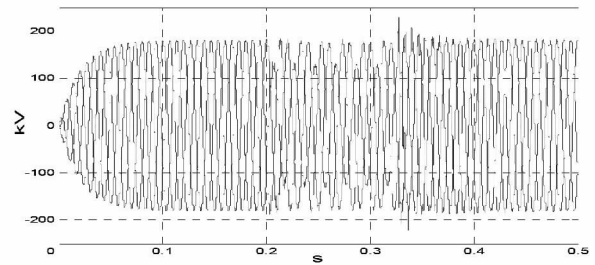


图4 本程序仿真的 I 母电压曲线图

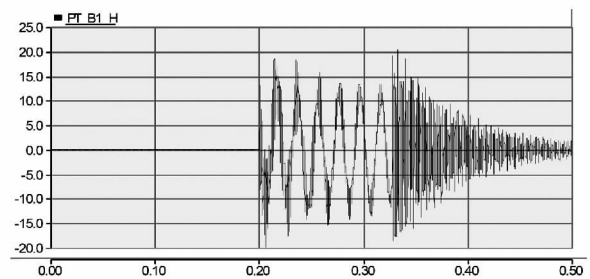


图5 PSCAD 仿真的 1 号主变压器高压侧中性点电压曲线图

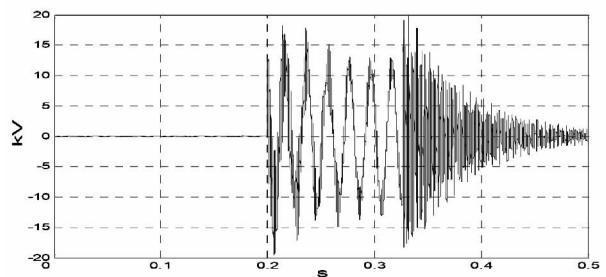


图6 本程序仿真的 1 号主变压器高压侧中性点电压曲线图

表 1 本程序与 PSCAD 计算结果对比

	PSCAD /kV	本程序 /kV	误差 /%
I 母 A 相暂态过电压	228.71	228.31	-0.17
1 号主变压器高压 故障时	-19.80	-19.55	-1.28
侧中性点最大电压 故障后	20.42	19.84	-2.92%

注: 误差 = (|本程序| - |PSCAD|) / |PSCAD|。

(下转第 54 页)

系统接地点定位系统。通过在试验变电站的实际应用,验证了该系统的有效性。对未来发电厂、变电站直流系统绝缘监测及接地点查找和故障的快速排除均具有一定的参考意义和推广价值。

参考文献

[1] 张永生,胡旭东,王伟,等. 变电站直流系统接地故障分析[J]. 电力安全技术, 2012, 14(1): 49-50.

[2] 蔡勇,严屏,夏勇军,等. 绝缘监测装置在直流系统中的应用分析[J]. 湖北电力, 2012, 36(1): 37-39.

[3] 李冬辉,史临潼. 发电厂和变电站直流系统接地故障检测总体方案[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 57-60.

[4] 李冬辉,任晓栋. 基于复值小波变换的直流系统接地故障检测[J]. 中国电力, 2003, 36(11): 12-14.

[5] 季涛,谭思园,徐丙垠,等. 基于波形分析的直流系统接地故障检测新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 69-71.

[6] 李冬辉,史临潼. 小波理论在直流系统接地故障检测中的应用[J]. 继电器, 2004, 32(21): 29-33.

[7] 李冬辉,王金凤,史临潼. 分形在直流系统故障检测中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 53-56.

[8] 张济忠. 分形[D]. 北京:清华大学出版社, 2011.

[9] 史临潼. 分形和小波在直流系统接地故障检测中应用

的研究[D]. 天津:天津大学, 2004.

[10] 胡君,尹华杰. 基于数字滤波器的直流系统接地故障检测法[J]. 继电器, 2006, 34(17): 13-17.

[11] 王洪涛,刘辉军. 基于 Duffing 振子的直流系统接地故障检测新方法[J]. 厦门理工学院学报, 2011, 19(1): 52-56.

[12] 王洪涛,刘辉军. Duffing 振子检测直流系统接地应用研究[C]. 工程学会第十届青年学术会议, 2008.

[13] 尚秋峰,尹成群,李士林,等. 基于 Duffing 振子的微弱正弦信号检测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 67-70.

[14] 刘海波,吴德伟,戴传金,等. 基于 Duffing 振子的弱正弦信号检测方法研究[J]. 电子学报, 2013, 41(1): 8-12.

作者简介:

戴平(1962),男,高级工程师,研究方向为电力系统保护与控制;

吴健(1973),男,工程师,研究方向为电力系统保护与控制;

龙涛(1987),男,初级工程师,研究方向为电力系统运行与规划。

(收稿日期:2013-07-24)

(上接第19页)

由表1可知,本程序与PSCAD结果相比,最大误差不超过3%,说明本程序的变压器模型是准确、可靠的,满足工程调试所需的试验场景模拟和相关研究分析。

3 结论

提出了一种可模拟变比、联结组、内部故障和相间耦合等特性的三相三绕组变压器电磁暂态仿真模型,并给出详细的计及变比和联结组特性的变压器模型推导公式。模型准确、可靠,易于编程实现,仿真精度满足工程调试需求,也适用于研究分析。

参考文献

[1] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 李永庄,林集明,曾昭华,译. 北京:水利电力出版社, 1991: 14-26.

[2] 夏道止. 电力系统分析(下册)[M]. 北京:中国电力出版社, 1995: 48-93.

[3] 王晓彤,牛晓明,施围. 电磁暂态计算中新的变压器模型[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(4): 9-12.

[4] 曾麟钧,林湘宁,黄景光,等. 特高压自耦变压器的建模和电磁暂态仿真[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 91-97.

[5] 王庆平,董新洲,周双喜,等. 基于自适应模型的变压器暂态全过程数值计算[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 54-58.

[6] 王彪,甄威,张华,等. 智能变电站二次系统实验方法综述[J]. 四川电力技术, 2012, 35(2): 4-8.

作者简介:

王彪(1985),男,工程师,从事电力系统仿真分析研究工作;

甄威(1956),男,教授级高工,从事电力系统仿真、继电保护技术研究工作。

(收稿日期:2013-06-19)