

基于耦合漏感的四绕组变压器暂态模型及短路计算

段振锋¹, 付鹏武¹, 吴佳芳², 贺智¹, 邹婷¹, 周念成²

(1. 国网湖南省电力公司娄底供电公司, 湖南 娄底 417000;

2. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:为确保含四绕组变压器的变电站保护整定可靠性,需研究精细化的四绕组变压器暂态模型及其短路计算等值电路。分析常规变压器等值电路的不足,推导了修正的耦合漏感等值电路,根据三相三柱式四绕组变压器的拓扑结构,运用对偶性原理建立了基于耦合漏感的四绕组变压器电路-磁路暂态模型;利用漏磁路的互阻抗远小于漏阻抗的特点,推导了用于短路计算的四绕组变压器简化等值电路以及零序阻抗。根据某地220 kV变电站实例进行仿真计算,结果表明所提出的四绕组变压器暂态模型及短路计算方法能够更准确地计算含四绕组变压器变电站的短路电流。

关键词:四绕组变压器;耦合漏感;暂态模型;短路电流;计算

中图分类号:TM 411⁺.2; TM 714

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.04.016

0 引言

钢铁、化工等工业中整流机组的大量应用,给电网带来了不可避免的谐波污染^[1]。在三绕组变压器的基础上,利用安匝平衡原理引入一个消谐绕组形成四绕组变压器^[2-3],通过该绕组上滤波器对铁芯谐波磁通进行感应滤波,可达到消除并网谐波、改善电能质量的目的。当补偿电流的谐波和直流分量通过消谐绕组注入后,四绕组变压器的电磁暂态过程将变得更加复杂。特别是,附加的消谐绕组会改变短路计算时四绕组变压器的正、负和零序等值电路。因此,需研究更精细的四绕组变压器暂态模型及其等值电路,为电力设备选型和继电保护整定提供理论依据。

变压器模型的精确度直接影响电力系统暂态仿真及计算的有效性。用于表征变压器电磁暂态过程的模型主要有矩阵模型^[4](BCTRAN)、饱和特性模型^[5](STC)、统一磁路模型^[6](UMEC)和基于对偶性原理的模型^[3,7]。其中,BCTRAN模型用回路阻抗矩阵或导纳矩阵表征变压器端口的耦合特性;STC模型采用饱和和电感的方式考虑铁芯的饱和及磁滞特性;UMEC模型则通过多端口诺顿等效电路,将变压器统一磁路方程引入其端口的节点导纳矩阵中。但是这3种模型均忽略了变压器铁芯结构差异,无法充分表现变压器励磁特征。基于对偶性原理的模型采用电路与磁路对偶的方法,考虑铁芯几何结构建立变压器的综合电路模型,能刻画磁通在铁芯和绕组的分布特性,有利于精细化地模拟变压器的电磁暂态行为。文献[7-8]根据铁芯和绕组空间几何结

构,建立了两绕组变压器直流偏磁的电路-磁路模型;文献[3]将对偶性原理应用于换流变压器,建立了三绕组变压器的电路-磁路模型;文献[9]把谐波平衡法引入不同结构变压器的电路-磁路模型,提出直流偏磁下变压器模型的频域求解法。但是,还没有文献对四绕组变压器的电路-磁路模型进行研究,现有的模型均无法精细地模拟四绕组变压器的低频暂态行为。

短路计算是变压器暂态分析和设备选型的重要内容。文献[10]推导了三绕组变压器内部匝间短路的等值电路;文献[11]在单相四绕组变压器端口自感和互感构成的阻抗模型基础上,推导了一种简化的等值电路,但是其从BCTRAN模型出发,无法将电路与变压器的磁路结构对应,因而该等值电路可用于稳态计算,却不能用于三相四绕组变压器的不对称短路计算。本文分析变压器绕组间的漏磁路分布,推导了漏磁路的耦合漏感等值电路,根据三相三柱式四绕组变压器的拓扑结构,运用对偶性原理建立了基于耦合漏感的四绕组变压器电路-磁路暂态模型。在此基础上,利用漏磁路的互阻抗远小于漏阻抗的特点,推导了用于短路计算的四绕组变压器简化等值电路及其零序阻抗。利用某地220 kV四绕组变压器实例,通过MATLAB/Simulink仿真验证了本文方法的有效性。

1 基于耦合漏感的四绕组变压器电路-磁路暂态模型

1.1 变压器绕组间耦合漏电感推导

变压器绕组产生的部分磁场会脱离铁芯的主磁路,经漏磁路流通并在绕组中产生压降,其对应的漏阻抗可通过短路试验测试得到^[3-7]。图1(a)为三绕组变压器(三相三柱式的左侧)的几何结构和绕组间的漏磁路分布,其中 d_{12} 和 d_{23} 分别为第1、2绕组

收稿日期:2017-01-12;修回日期:2018-01-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577018)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577018)

间和第2、3绕组间的距离, a_1 、 a_2 和 a_3 为3个绕组的宽度。当在绕组1上施加电压、绕组2和3分别短路和开路时,可测得漏磁路 ϕ_{12} 对应的漏感 L_{s12} ,同理可测得漏磁路 ϕ_{23} 对应的漏感 L_{s23} 。

设图1(a)中磁场强度近似梯形分布,绕组间的漏感也可根据变压器的几何尺寸进行计算^[12],为此可得漏感 L_{s12} 和 L_{s23} 为:

$$\begin{cases} L_{s12} = \frac{\mu_0 N^2 l}{h} \left(\frac{a_1}{3} + d_{12} + \frac{a_2}{3} \right) \\ L_{s23} = \frac{\mu_0 N^2 l}{h} \left(\frac{a_2}{3} + d_{23} + \frac{a_3}{3} \right) \end{cases} \quad (1)$$

其中, μ_0 为真空磁导率; N 为绕组匝数; l 为两绕组的平均周长; h 为两绕组的平均高度。由对偶性原理将变压器绕组与铁芯间的励磁磁通采用非线性电感 L_m 、 L_{m1} 和 L_{m2} 表征,而绕组间的漏磁通采用2个线性电感 $L_{12}=L_{s12}$ 、 $L_{23}=L_{s23}$ 表征,可得常规的三绕组变压器等值电路,如图1(b)所示,为便于分析,图中未给出铁芯和绕组的损耗电阻, V_1 、 V_2 、 V_3 为3个绕组的端口电压。

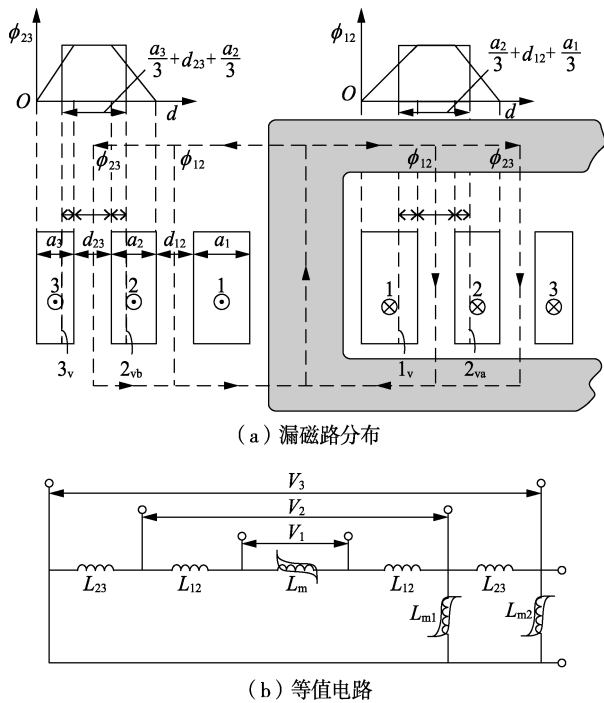


图1 常规的三绕组变压器等值电路

Fig.1 Traditional equivalent circuit of three-winding transformer

此时,第1、3绕组之间的漏感为:

$$L_{13} = L_{12} + L_{23} = \frac{\mu_0 N^2 l}{h} \left(\frac{a_1}{3} + d_{12} + \frac{2a_2}{3} + d_{23} + \frac{a_3}{3} \right) \quad (2)$$

但在绕组1上加压、绕组2和3分别开路和短路时,测得漏磁路 ϕ_{13} 对应的漏感 L_{s13} 如式(3)所示,与上式的漏感不相等,可见常规变压器等值电路并不能精确表征3个绕组间的漏磁路。

$$L_{s13} = \frac{\mu_0 N^2 l}{h} \left(\frac{a_1}{3} + d_{12} + a_2 + d_{23} + \frac{a_3}{3} \right) \quad (3)$$

由图1(a)可知,在计算漏感时两侧的第1、3绕组分别等值成位于自身绕组靠近中间绕组1/3宽度的虚拟集中绕组 1_v 和 3_v ;而对漏感 L_{12} 和 L_{23} 的计算,中间第2绕组分别等值为 2_{va} 和 2_{vb} 的虚拟绕组。中间绕组被等值成2个位置不同且不连续的虚拟绕组,是导致常规等值电路的漏感 L_{13} 与短路测试漏感 L_{s13} 不匹配的原因。为了克服常规等值电路的不足,第2绕组对应的虚拟绕组应位于自身绕组1/2宽度的位置,即图2(a)中的 2_v 虚拟绕组。由此可得修正后的漏感 L'_{12} 和 L'_{23} 为:

$$\begin{cases} L'_{12} = \frac{\mu_0 N^2 l}{h} \left(\frac{a_1}{3} + d_{12} + \frac{a_2}{2} \right) = \\ \quad \frac{\mu_0 N^2 l}{h} \left(\frac{a_1}{3} + d_{12} + \frac{a_2}{3} \right) + \frac{\mu_0 N^2 l}{h} \frac{a_2}{6} = L_{12} + L_{p2} \\ L'_{23} = \frac{\mu_0 N^2 l}{h} \left(\frac{a_2}{2} + d_{23} + \frac{a_3}{3} \right) = \\ \quad \frac{\mu_0 N^2 l}{h} \left(\frac{a_2}{3} + d_{23} + \frac{a_3}{3} \right) + \frac{\mu_0 N^2 l}{h} \frac{a_2}{6} = L_{23} + L_{p2} \end{cases} \quad (4)$$

修正的漏感 L'_{12} 和 L'_{23} 在原有 L_{12} 和 L_{23} 的基础上,增加 L_{p2} ,使第1、3绕组之间的漏感 $L'_{12} + L'_{23} = L_{12} + L_{23} + 2L_{p2} = L_{s13}$ 。同时,为确保第1、2绕组和第2、3绕组间的漏感仍与短路测试的漏感 L_{s12} 、 L_{s23} 相吻合,还需在第2绕组的等值电路端口中,引入一个负的漏感 $-L_{p2}$,进而形成如图2(b)所示的修正后变压器的等值电路。

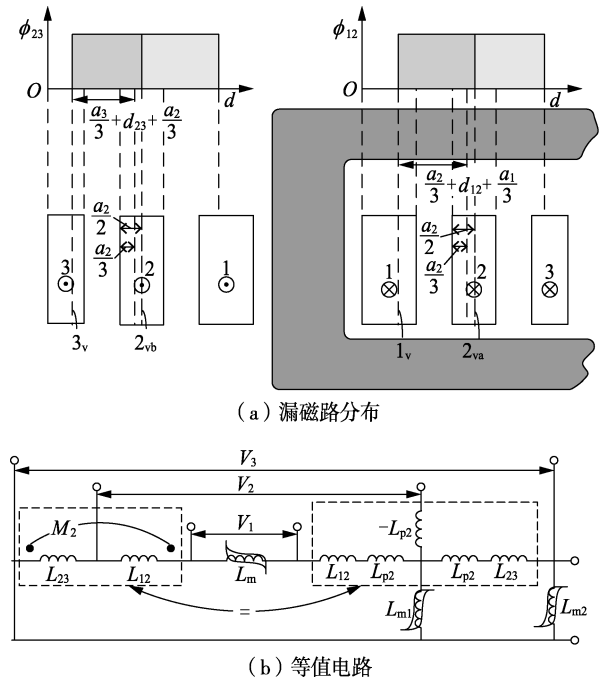


图2 修正的三绕组变压器等值电路

Fig.2 Modified equivalent circuit of three-winding transformer

图2(b)的漏感等值电路可由2个互耦合的漏电感等价,其中2个漏感的自感为 $L_{12}=L_{s12}$ 、 $L_{23}=L_{s23}$,而互感 M_2 即为:

$$M_2 = \frac{\mu_0 N^2 l a_2}{h} \frac{L_{s13} - (L_{s12} + L_{s23})}{2} \quad (5)$$

在变压器参数设计时通常有 $L_{s13} > L_{s12} + L_{s23}$,即互感 M_2 为正。这表明考虑了变压器漏磁场沿着各个绕组宽度的分布变化后,不同绕组间的漏磁路会存在一定的耦合关系。

1.2 基于耦合漏感的四绕组变压器暂态模型

采用考虑漏磁路耦合的漏感等值电路,建立四绕组变压器的暂态等值电路见图3。图3(a)给出了变压器主磁路、漏磁路分布情况,由于变压器绕组和铁芯几何结构对称,其三三相的漏感及互感参数相同,包含3个漏感 L_{12} 、 L_{23} 、 L_{34} 和2个互感 M_2 、 M_3 。其中漏感参数可由短路测试得到, $L_{12}=L_{s12}$ 和 $L_{23}=L_{s23}$ 的几何尺寸计算式为式(1),而漏感 $L_{34}=L_{s34}$ 则为:

$$L_{s34} = \frac{\mu_0 N^2 l}{h} \left(\frac{a_3}{3} + d_{34} + \frac{a_4}{3} \right) \quad (6)$$

其中, a_4 为第4个绕组的宽度; d_{34} 为第3、4绕组间的距离。为确保变压器各端口之间的漏抗与短路测试的短路电抗一致,漏磁路间互感 M_2 和 M_3 为:

$$\begin{cases} M_2 = \frac{\mu_0 N^2 l a_2}{h} \frac{L_{s13} - (L_{s12} + L_{s23})}{2} = \frac{L_{s14} - (L_{s12} + L_{s24})}{2} \\ M_3 = \frac{\mu_0 N^2 l a_3}{h} \frac{L_{s24} - (L_{s23} + L_{s34})}{2} = \frac{L_{s14} - (L_{s13} + L_{s34})}{2} \end{cases} \quad (7)$$

图3(b)中 V 代表端口电压,下标字母和数字分别代表相数及绕组序列,根据图3(b)的四绕组变压器等值电路,可得各个端口间的漏感为:

$$\begin{bmatrix} L_{13} \\ L_{14} \\ L_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{12} \\ L_{23} \\ L_{34} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 2 & 2 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

不同端口间漏感对应的短路测试漏感 L_{s12} 、 L_{s14} 和 L_{s24} 关于四绕组变压器几何尺寸计算式,与其等值电路得到的式(8)一致。

$$\begin{cases} L_{s13} = \frac{\mu_0 N^2 l}{h} \left(\frac{a_1}{3} + d_{12} + a_2 + d_{23} + \frac{a_3}{3} \right) = L_{13} \\ L_{s14} = \frac{\mu_0 N^2 l}{h} \left(\frac{a_1}{3} + d_{12} + a_2 + d_{23} + a_3 + d_{34} + \frac{a_4}{3} \right) = L_{14} \\ L_{s24} = \frac{\mu_0 N^2 l}{h} \left(\frac{a_2}{3} + d_{23} + a_3 + d_{34} + \frac{a_4}{3} \right) = L_{24} \end{cases} \quad (9)$$

根据变压器铁芯结构的对称性,图3中三相芯柱的励磁电感 $L_{mA}=L_{mB}=L_{mC}$,对应的芯柱磁路长度为 h_c ;铁轭的励磁电感 $L_{m1}=L_{m2}=L_{m4}=L_{m5}$ 、 L_{m3} 对应

磁路长度分别为 $l_y/6$ 、 $l_y/3$,其中 l_y 为上下铁轭的长度。则铁芯的励磁电感与变压器参数的关系式为:

$$\begin{cases} L_{m1}=L_{m2}=L_{m4}=L_{m5}=2L_{m3}=\frac{6\mu N^2 A}{l_y} \\ L_{mA}=L_{mB}=L_{mC}=\frac{\mu N^2 A}{h_c} \end{cases} \quad (10)$$

其中, μ 为铁芯磁导率; A 为铁芯截面的面积。变压器励磁电感由开路测试得到,由图3(b)等值电路可知,开路测试的励磁电感 L_{0m} 等于芯柱和铁轭所有励磁电感并联后的等效电感。再根据式(10)各励磁电感的可得:

$$L_{0m} = \frac{1}{2\left(\frac{1}{L_{m1}} + \frac{1}{L_{m2}} + \frac{1}{L_{m3}} + \frac{1}{L_{m4}} + \frac{1}{L_{m5}}\right) + \frac{1}{L_{mA}} + \frac{1}{L_{mB}} + \frac{1}{L_{mC}}} = \frac{L_{m3}L_{mA}}{3L_{m3}+6L_{mA}} \quad (11)$$

再由式(10)得 $L_{m3}/L_{mA}=3h_c/l_y$,代入式(11)可由开路励磁电感 L_{0m} 计算四绕组变压器等值电路的各个励磁电感为:

$$\begin{cases} L_{m1}=L_{m2}=L_{m4}=L_{m5}=2L_{m3}=\left(12+\frac{18h_c}{l_y}\right)L_{0m} \\ L_{mA}=L_{mB}=L_{mC}=\left(2+\frac{2l_y}{h_c}\right)L_{0m} \end{cases} \quad (12)$$

图3(b)中每一个励磁电感都对应一个铁芯损耗电阻,与励磁电感不同,铁芯损耗电阻与磁路的长度成正比,即 $R_{m3}/R_{mA}=l_y/(3h_c)$ 。同理,代入开路测试的损耗电阻 R_{0m} 与各个铁芯损耗电阻的并联关系式后,可得各铁芯损耗电阻为:

$$\begin{cases} R_{m1}=R_{m2}=R_{m4}=R_{m5}=\frac{R_{m3}}{2}=\left(9+\frac{l_y}{2h_c}\right)R_{0m} \\ R_{mA}=R_{mB}=R_{mC}=\left(3+\frac{54h_c}{l_y}\right)R_{0m} \end{cases} \quad (13)$$

其中, R_{m1} 、 R_{m2} 、 R_{m3} 、 R_{m4} 和 R_{m5} 为铁轭磁路的铁芯损耗电阻; R_{mA} 、 R_{mB} 和 R_{mC} 为芯柱磁路的铁芯损耗电阻。根据变压器短路和开路测试的短路阻抗和开路阻抗,由前述方法计算四绕组变压器等值电路的漏感、励磁电感和损耗电阻,并在励磁电感中引入动态磁滞环节^[13],由此建立四绕组变压器暂态模型。

2 四绕组变压器短路计算的等值电路分析

2.1 变压器绕组间耦合漏电感推导

图4给出了四绕组变压器暂态等值电路的单线图,其中漏感、励磁电感与各自的损耗电阻分别串联、并联。将暂态等值电路的励磁回路合并至第1绕组上,合并后的励磁阻抗为 Z_m ;漏阻抗和漏磁路互阻抗分别用 Z_{12} 、 Z_{23} 、 Z_{34} 和 Z_{M2} 、 Z_{M3} 表示。由此推

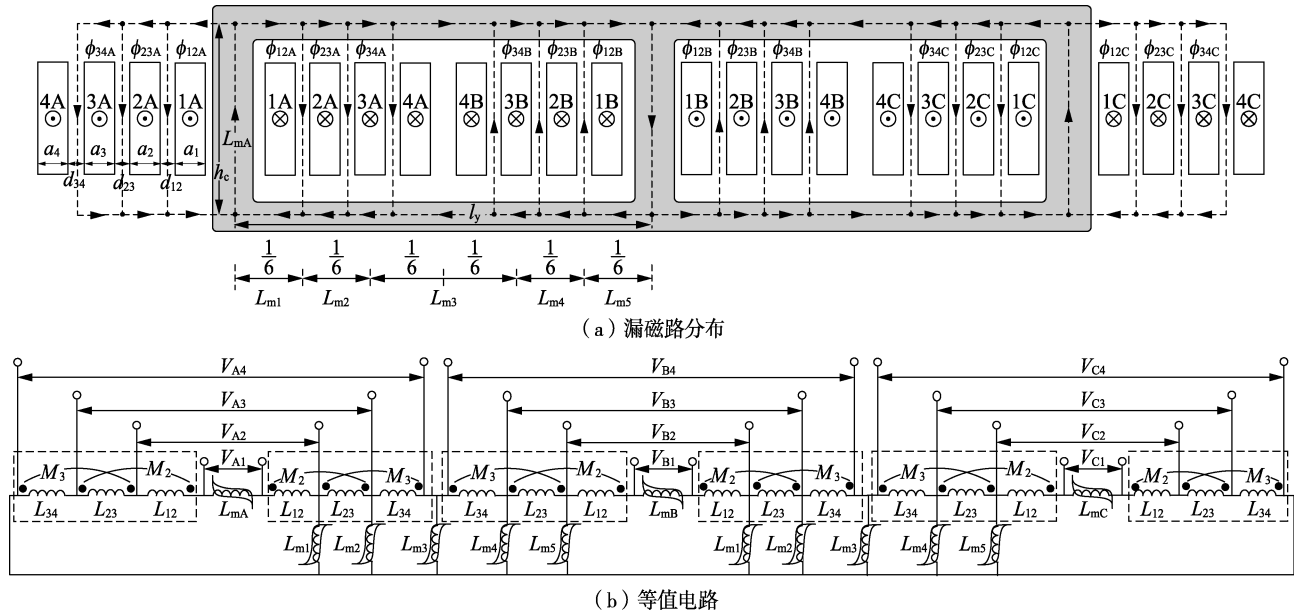


图3 基于耦合漏感的四绕组变压器暂态等值电路

Fig.3 Transient equivalent circuit of four-winding transformer based on coupling leakage inductance

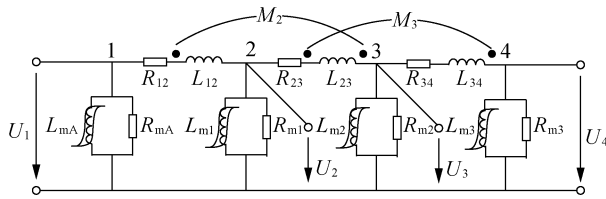


图4 四绕组变压器等值电路的单线图

Fig.4 Single-line diagram of equivalent circuit of four-winding transformer

导四绕组变压器的端口电流方程为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & \frac{Z_{M2}}{Z_{12}+Z_{M2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 & I_2 \end{bmatrix}^T = \frac{U_{12}}{Z_{12}+Z_{M2}} + \frac{U_1}{Z_m} \\ \begin{bmatrix} \frac{Z_{12}}{Z_{12}+Z_{M2}} - \frac{Z_{M2}}{Z_{23}+Z_{M2}+Z_{M3}} & \frac{Z_{M3}}{Z_{23}+Z_{M2}+Z_{M3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 & I_3 \end{bmatrix}^T = \\ \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{12}+Z_{M2}} & \frac{1}{Z_{23}+Z_{M2}+Z_{M3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{12} & U_{23} \end{bmatrix}^T \\ \begin{bmatrix} \frac{Z_{M2}}{Z_{23}+Z_{M2}+Z_{M3}} & \frac{Z_{23}+Z_{M2}}{Z_{23}+Z_{M2}+Z_{M3}} - \frac{Z_{M3}}{Z_{34}+Z_{M3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 & I_3 \end{bmatrix}^T = \\ \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{23}+Z_{M2}+Z_{M3}} & \frac{1}{Z_{34}+Z_{M3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{23} & U_{34} \end{bmatrix}^T \\ \begin{bmatrix} \frac{Z_{M3}}{Z_{34}+Z_{M3}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_3 & I_4 \end{bmatrix}^T = \frac{-U_{34}}{Z_{34}+Z_{M3}} \end{cases} \quad (14)$$

其中, U_1, U_2, U_3, U_4 和 I_1, I_2, I_3, I_4 分别为4个绕组的端口电压和电流; $U_{ij} = U_i - U_j$ ($i, j=1, 2, 3, 4$) 为端口电压差。

将式(14)写成矩阵形式为 $\mathbf{AI}_n = \mathbf{Y}_d \Delta \mathbf{U} + \mathbf{I}_m$, 再推导端口电流的表达式 $\mathbf{I}_n = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{Y}_d \Delta \mathbf{U} + \mathbf{A}^{-1} \mathbf{I}_m$, 则可将端口电流方程变换为:

$$\begin{cases} I_1 = \lambda [Z_{23}Z_{34} + Z_{34}Z_{M2} - Z_{M3}^2 & -Z_{M2}(Z_{34} + Z_{M3}) & Z_{M2}Z_{M3}] \times \\ [U_{12} & U_{13} & U_{14}]^T + U_1/Z_m \\ I_2 = \lambda [Z_{23}Z_{34} + Z_{34}Z_{M2} - Z_{M3}^2 & (Z_{12} + Z_{M2})(Z_{34} + Z_{M3}) \\ -Z_{M3}(Z_{12} + Z_{M2})] [U_{21} & U_{23} & U_{24}]^T \\ I_3 = \lambda [-Z_{M2}(Z_{34} + Z_{M3}) & (Z_{12} + Z_{M2})(Z_{34} + Z_{M3}) \\ Z_{12}Z_{23} + Z_{12}Z_{M3} - Z_{M2}^2] [U_{31} & U_{32} & U_{34}]^T \\ I_4 = \lambda [Z_{M2}Z_{M3} & -Z_{M3}(Z_{12} + Z_{M2}) & Z_{12}Z_{23} + Z_{12}Z_{M3} - Z_{M2}^2] \times \\ [U_{41} & U_{42} & U_{43}]^T \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\lambda = 1/(Z_{12}Z_{23}Z_{34} - Z_{12}Z_{M3}^2 - Z_{34}Z_{M2}^2)$ 。对比式(1)、(6)和(7)可知,漏阻抗 Z_{12}, Z_{23}, Z_{34} 远大于漏磁路间的互阻抗 Z_{M2}, Z_{M3} , 通常为互阻抗的7~15倍, 由耦合漏感的该特点可对其端口电流方程进行化简。

将式(15)中关于 $Z_{M2}^2, Z_{M2}Z_{M3}$ 和 Z_{M3}^2 的平方项部分忽略, 可得简化后的端口电流方程为:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{U_{12}}{Z_{12}Z_{23}Z_{34}} + \frac{U_{13}}{-Z_{12}Z_{23}} + \frac{U_1}{Z_m} \\ I_2 = \frac{U_{21}}{Z_{12}Z_{23}Z_{34}} + \frac{U_{24}}{-Z_{23}Z_{34}} + \frac{U_{23}}{Z_{12}Z_{23}Z_{34}} \\ I_3 = \frac{U_{31}}{-Z_{12}Z_{23}} + \frac{U_{34}}{Z_{12}Z_{23}Z_{34}} + \frac{U_{32}}{Z_{12}Z_{23}Z_{34}} \\ I_4 = \frac{U_{42}}{-Z_{23}Z_{34}} + \frac{U_{43}}{Z_{12}Z_{23}Z_{34}} \end{cases} \quad (16)$$

其中,端口电压差的分母项为 2 个端口间的连接阻抗,仅在端口 1、4 之间没有阻抗连接。需注意的是,简化方程中只是忽略了互阻抗的平方项,但仍然保留与互阻抗相关的一次方项。由此可得用于四绕组变压器短路计算的简化等值电路见图 5,该简化电路基本呈树状结构,但在端口 1、3 之间有 Z_{e5} 连接形成单个环形。由式(16)得到各个等效阻抗的计算式为:

$$\begin{cases} Z_{e1} = \frac{Z_{12}Z_{23}Z_{34}}{Z_{23}Z_{34}+Z_{34}Z_{M2}} \\ Z_{e2} \approx \frac{-Z_{12}Z_{23}Z_{M3}}{Z_{12}Z_{34}+Z_{12}Z_{M3}+2Z_{34}Z_{M2}} \\ Z_{e3} \approx \frac{-Z_{12}Z_{M3}}{Z_{12}+Z_{M2}} \\ Z_{e4} \approx \frac{Z_{12}Z_{34}+Z_{12}Z_{M3}+Z_{34}Z_{M2}}{Z_{12}+Z_{M2}} \\ Z_{e5} = -Z_{12}Z_{23}/Z_{M2} \end{cases} \quad (17)$$

其中, Z_{e2} 、 Z_{e3} 和 Z_{e4} 为式(16)端口 2、3 和 4 间的阻抗通过星三角变换得到,并忽略互阻抗 Z_{M2} 、 Z_{M3} 的平方项。由式(17)还发现, Z_{e5} 的分母项仅有互阻抗 Z_{M2} , 而其余阻抗 Z_{e1} 至 Z_{e4} 的分母项均含有漏阻抗项,为此阻抗 Z_{e5} 大小将高于其他阻抗。

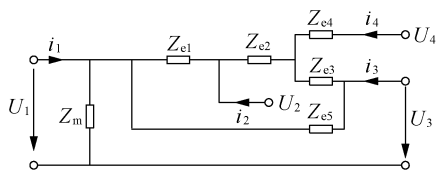


图 5 四绕组变压器短路计算的等值电路

Fig.5 Equivalent circuit of four-winding transformer for short circuit current calculation

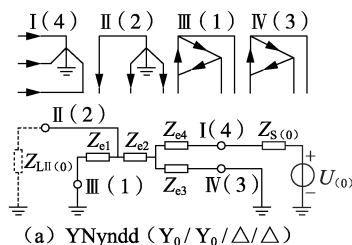
若将 Z_{e5} 近似为开路,可将图 5 的等值电路进一步简化。经大量实际短路测试得到,漏阻抗 Z_{12} 为互阻抗 Z_{M2} 的 12 倍以上时,将 Z_{e5} 作开路简化前后的短路计算相对误差小于 5%。本文仍以图 5 四绕组变压器等值电路作为其短路计算的正、负序等值电路,再根据变压器各个绕组的接线方式,推导四绕组变压器的零序阻抗。对于 Z_{e5} 近似开路的等值电路,仅需令零序阻抗计算式中 $Z_{e5} = \infty$,即可得进一步简化后等值电路对应的零序阻抗。

2.2 四绕组变压器的零序阻抗及等值电路

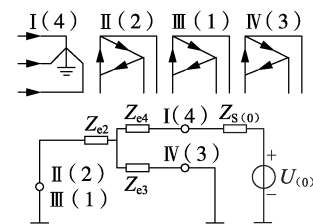
由于四绕组变压器是在高、中、低压 3 个绕组的基础上,增加 1 个低压绕组用于平衡或滤波的作用,该附加绕组一般采用三角形接线方式,且布置在高压绕组和中压绕组之间^[14]。因此,变压器高压(I)、中压(II)、低压(III)、附加(IV)绕组分别对应于图 5 短路计算等值电路的第 4、2、1 和 3 端口。图 6 为四绕组变压器用 YNyddd ($Y_0/Y_0/\Delta/\Delta$)、YNddd ($Y_0/\Delta/\Delta/\Delta$) 和 YNynynd ($Y_0/Y_0/Y_0/\Delta$)

等常用接线方式时的零序等值电路。图 6(a) 中变压器绕组 III、IV 都可通过零序电流,而绕组 II 能否有零序电流取决于外部电路有无接地点。若外部无接地点即端口开路,则变压器的零序阻抗为:

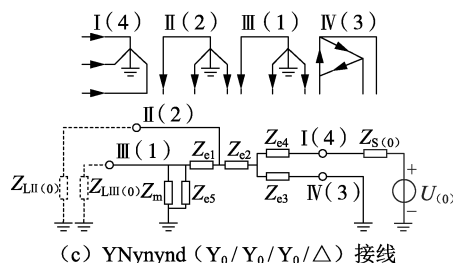
$$Z_{(0)} = Z_{e4} + \frac{Z_{e3}(Z_{e1}+Z_{e2})}{Z_{e1}+Z_{e2}+Z_{e3}} \quad (18)$$



(a) YNyddd ($Y_0/Y_0/\Delta/\Delta$)



(b) YNddd ($Y_0/\Delta/\Delta/\Delta$) 接线



(c) YNynynd ($Y_0/Y_0/Y_0/\Delta$) 接线

图 6 四绕组变压器零序等值电路

Fig.6 Zero-sequence equivalent circuit of four-winding transformer

而当图 6(a) 中绕组 II 外部有接地点,并且外部负荷零序阻抗为 $Z_{LII(0)}$ 以及高压绕组的系统零序阻抗为 $Z_{S(0)}$ 时,可得短路接地故障发生在绕组 I 和 II 外部的零序阻抗为:

$$\begin{cases} Z_{I(0)} = Z_{e4} + \frac{Z_{e3}[Z_{e1}Z_{LII(0)} + Z_{e2}(Z_{e1}+Z_{LII(0)})]}{Z_{e1}Z_{LII(0)} + (Z_{e2}+Z_{e3})(Z_{e1}+Z_{LII(0)})} \\ Z_{II(0)} = \frac{Z_{e1}(Z_{e2}+Z_{e3})(Z_{e4}+Z_{S(0)}) + Z_{e1}Z_{e2}Z_{e3}}{(Z_{e1}+Z_{e2}+Z_{e3})(Z_{e4}+Z_{S(0)}) + Z_{e3}(Z_{e1}+Z_{e2})} \end{cases} \quad (19)$$

在图 6(b) 的 YNddd 接线方式中,四绕组变压器绕组 II、III、IV 各自形成零序电流的闭合回路。此时变压器端口 1 并入端口 2,同时绕组 II、IV 的电压降相同,等于变压器的感应电动势,为此零序等值电路中两绕组的等效阻抗 Z_{e2} 和 Z_{e3} 并联,则变压器的零序阻抗为:

$$Z_{(0)} = Z_{e4} + \frac{Z_{e3}Z_{e2}}{Z_{e2}+Z_{e3}} \quad (20)$$

在图 6(c) 的 YNynnd 接线方式中,第 1、2 绕组是否流通零序电流均由外部电路决定。若 2 个端口外部均无接地点,则变压器的零序阻抗为:

$$Z_{(0)} = Z_{e4} + \frac{Z_{e3}[(Z_{e1} + Z_{e2})(Z_{e5} + Z_m) + Z_{e5}Z_m]}{(Z_{e1} + Z_{e2} + Z_{e3})(Z_{e5} + Z_m) + Z_{e5}Z_m} \quad (21)$$

而当四绕组变压器第 II、III 绕组的外部负荷零序阻抗为 $Z_{LII(0)}$ 、 $Z_{LIII(0)}$ 时,可得短路接地故障发生在绕组 I、II 和 III 外部的零序阻抗为:

$$\begin{cases} Z_{I(0)} = Z_{e4} + \frac{(Z_{e1} + D)(Z_{e2}Z_{e3} + Z_{e3}Z_{LII(0)}) + Z_{e2}Z_{e3}Z_{LII(0)}}{(Z_{e1} + D)(Z_{e2} + Z_{e3} + Z_{LII(0)}) + Z_{LII(0)}(Z_{e2} + Z_{e3})} \\ Z_{II(0)} = \frac{(Z_{e1} + D)(Z_{e2} + B)}{Z_{e1} + Z_{e2} + D + B} \\ Z_{III(0)} = \frac{Z_{LII(0)}(Z_{e2} + B)[Z_{e1}(Z_{e5} + Z_m) + Z_{e5}Z_m]}{(Z_{e5} + Z_m)C + Z_{e5}Z_m(Z_{e2} + Z_{LII(0)} + B)} \end{cases} \quad (22)$$

其中, $D = Z_{e5}Z_mZ_{LIII(0)}/[Z_{e5}(Z_m + Z_{LIII(0)}) + Z_mZ_{LIII(0)}]$; $B = Z_{e3}(Z_{e4} + Z_{S(0)})/(Z_{e3} + Z_{e4} + Z_{S(0)})$; $C = (Z_{e1} + Z_{LII(0)})(Z_{e2} + B) + Z_{e1}Z_{LII(0)}$ 。

在计算含四绕组变压器电网不对称短路电流时,首先需根据厂家提供的变压器短路和开路测试阻抗,按前述推导计算变压器漏阻抗(Z_{12} 、 Z_{23} 和 Z_{34})、漏磁路互阻抗(Z_{M2} 和 Z_{M3})、励磁阻抗 Z_m ,代入式(17)计算四绕组变压器短路计算等值电路的各等效阻抗,再根据故障类型和四绕组变压器的正序、负序和零序等值电路形成复合序网,以计算含四绕组变压器电网在不同类型故障下的短路电流。

3 仿真分析

根据某地 220 kV 变电站实例,在 MATLAB/Simulink 中搭建了仿真模型(见附录中图 A1),结合故障录波、仿真和计算结果,验证所提出的四绕组变压器暂态模型及短路计算方法。系统参数如附录中表 A1 所示,220 kV 电网的正序和零序阻抗分别为 $Z_{S(1)} = j5.8806 \Omega$ 和 $Z_{S(0)} = j8.9056 \Omega$ 。四绕组变压器的额定电压为高压 $U_{In} = 230$ kV、中压 $U_{II n} = 121$ kV、低压 $U_{III n} = 38.5$ kV 和附加绕组 $U_{IV n} = 38.5$ kV,接线方式为 YNyndd,由短路电压得变压器漏阻抗 $Z_{12} = j0.0504$ p.u.、 $Z_{23} = j0.0522$ p.u. 和 $Z_{34} = j0.0949$ p.u.,以及互阻抗 $Z_{M2} = j0.008$ p.u. 和 $Z_{M3} = j0.011$ p.u.,变压器采用图 3(b) 的暂态模型模拟内部电磁暂态过程,之后各个端口再经理想变压器转换至各自的额定电压。

四绕组变压器的中压和低压侧有 45 MV·A 和 30 MV·A 的相控整流工业负荷,均采用 2 个三相整流桥直流侧串联的 12 脉波整流装置^[15];附加绕组安装 32 Mvar 的感应滤波设备,含 5、7、11 和 13 次滤波器^[14]。110 kV 线路的正序和零序单位阻抗分别

为 $Z_{L110(1)} = 0.068 + j0.4115 \Omega$ 和 $Z_{L110(0)} = 0.284 + j1.2629 \Omega$,而 35 kV 线路的正序和零序单位阻抗分别为 $Z_{L35(1)} = 0.1153 + j0.3292 \Omega$ 和 $Z_{L35(0)} = 0.3963 + j0.8577 \Omega$ 。设置 110 kV 出线的故障位置和类型,对不同故障下变电站的短路电流进行测试。

在 110 kV 线路 L3=10.5 km 的 F 处发生三相短路故障录波数据和仿真结果,如表 1 所示。表中给出四绕组变压器故障前、后的端电压,故障后中压侧电压下降最大,而其余端口电压跌落幅度标么值基本相同,由于附加绕组装有补偿设备,其故障后电压略高于高压和低压侧的电压。由表 1 中暂态仿真与录波数据的相对误差可知,本文模型在故障前稳态情况的仿真误差较小,对故障后电压的仿真误差有所增加,但最大误差仍小于 15%。本文的暂态模型仿真准确度在可接受范围内,仿真误差可能来自于负荷模型简化、线路和变压器参数与实际电网的差异。其中,变压器高压绕组与其他绕组的短路阻抗均与高压侧分接头位置有关,本文根据录波数据对应分接头位置,选择相应短路阻抗的试验测量参数。

表 1 三相短路故障前后的四绕组变压器端电压

Table 1 Terminal voltages of four-winding transformer before and after three-phase short circuit fault

绕组		故障前电压			故障后电压		
		录波/ kV	仿真/ kV	误差/ %	录波/ kV	仿真/ kV	误差/ %
高压	A	125.2	131.9	5.35	104.9	108.6	3.53
	B	119.8	131.8	10.02	105.2	112.3	6.75
	C	124	131.9	6.37	95.4	106.4	11.53
中压	A	68.7	72	4.80	36.7	38.5	4.90
	B	69.4	71.8	3.46	39.1	41.9	7.16
	C	68.1	71.9	5.58	34.8	39.2	12.64
低压	A	24.4	22.8	-6.56	13.3	13.8	3.76
	B	21	22.9	9.05	15.3	14.5	-5.23
	C	22.7	22.9	0.88	11.8	12.8	8.47
附加	A	21.6	23	6.48	15.7	14.3	-8.92
	B	21.8	23.1	5.96	16.2	17.2	6.17
	C	23.5	23.2	-1.28	12.9	14.8	14.73

图 7 为 110 kV 线路发生三相短路故障时,四绕组变压器 220 kV 侧和 110 kV 侧的短路电流。用本文等值电路和文献[11]等值电路计算时,认为低压和附加绕组的外部负荷开路,得到变压器 220 kV 侧和 110 kV 侧短路电流的标么值相同。为量化计算结果与录波数据的接近度,图中还给出不同方法的短路电流相对误差,比较发现本文暂态模型仿真和等值电路计算的短路电流均与录波数据较接近,相对误差小于 8%;文献[11]计算的短路电流相对误差在 20%左右,与之相比本文方法的准确度更优。

当 110 kV 线路 F 处发生 A 相短路接地故障时,四绕组变压器的 220 kV 侧电压和 4 个端口的短路电流仿真结果如图 8 所示,其中电压和电流均为标么值,基准容量为 180 MV·A。在 $t=0.04$ s 时 F 处发

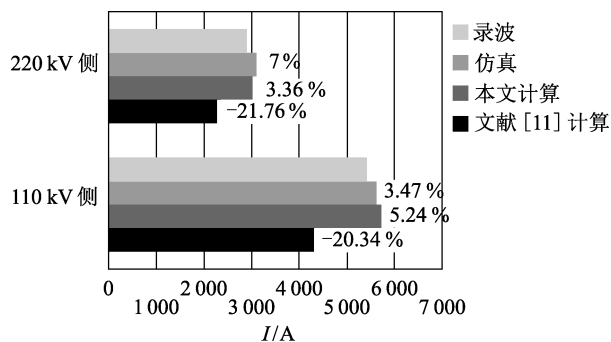


图 7 不同方法的三相短路电流对比

Fig.7 Comparison of three-phase short circuit currents between different methods

生短路接地故障,此时四绕组变压器的 220 kV 侧和 110 kV 侧电流大幅上升,而低压绕组仅 A 相电流出现小幅下降;附加的滤波绕组由于系统电压扰动增加,使其注入补偿电流的谐波含量也有所上升。仿真结果中 110 kV 线路的 A、B 和 C 相短路电流的周期分量分别为 3 359 A、349 A 和 732 A,故障相的短路电流最大,其余两相短路电流主要由 110 kV 线路正序、零序分流比例不一致产生的部分故障分量和非故障相的正常分量共同组成。

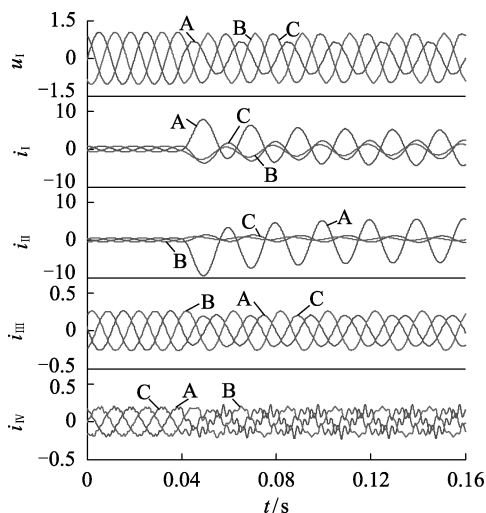


图 8 单相短路接地故障时四绕组变压器仿真结果

Fig.8 Simulative results of four-winding transformer during single-phase short circuit fault

图 9 给出了四绕组变压器 220 kV 侧和 110 kV 侧的单相接地短路电流,由于文献[12]未给出四绕组变压器的零序等值电路,本文根据其基本等值电路,结合变压器接线推导了零序等值电路,以形成复合序网计算不对称短路电流。对比本文方法和文献[11]方法的计算结果可知,2 种方法对于非故障相短路电流的计算误差相差不大,但对故障相短路电流文献[11]的误差都超过了 10%,高于本文方法的相对误差。本文方法在基于耦合漏感的变压器暂态模型的基础上,推导的正序、负序和零序等值电路能更准确地计算四绕组变压器的短路电流。

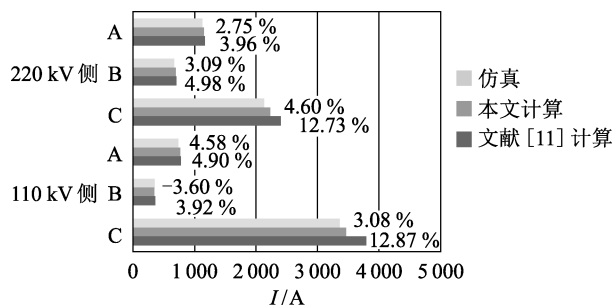


图 9 不同方法的单相短路电流对比

Fig.9 Comparison of single-phase short circuit currents between different methods

4 结论

根据四绕组变压器铁芯结构和漏磁路分布,建立了基于耦合漏感的变压器暂态模型,推导了用于短路计算的变压器简化等值电路。在 MATLAB/Simulink 中搭建了含四绕组变压器的 220 kV 变电站仿真模型,通过对比故障录波、仿真和计算结果,得到如下结论:

a. 本文建立的四绕组变压器暂态模型在稳态运行和电网故障情况下,得到的变压器端口电压和电流与录波数据吻合,该模型对于故障仿真具有较高的准确度;

b. 在四绕组变压器暂态模型基础上得到的短路计算简化等值电路,能够更准确地计算不同故障条件下四绕组变压器的短路电流;

c. 本文提出的四绕组变压器短路计算正序、负序和零序等值电路,可用于四绕组变压器的精细化保护整定,保障四绕组变压器入网的安全稳定运行。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘文业,罗隆福,李勇,等. 基于感应滤波的工业整流系统潜在谐波放大及防治措施[J]. 电工技术学报,2014,29(2):304-317.
- [2] LIU Wenyue, LUO Longfu, LI Yong, et al. Potential harmonic amplification and its prevention of industrial rectifier system based on inductive filtering method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 304-317.
- [3] 徐永海,温从溪. 基于输出电压校正的混合有源滤波器控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):36-43.
- [4] XU Yonghai, WEN Congxi. Hybrid active filter control based on output voltage correction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 36-43.
- [5] 罗隆福,李勇,许加柱,等. 自耦补偿与谐波屏蔽换流变压器保护原理及判据整定[J]. 电力自动化设备,2007,27(2):35-38.
- [6] LUO Longfu, LI Yong, XU Jiazhuzhu, et al. Protection principle of auto-compensator and harmonic shade converting transformer and its criteria setting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(2): 35-38.
- [7] 王雪,王增平. 基于模型的新型变压器主保护判据分析[J]. 电

- 力系统保护与控制,2012,40(10):30-34.
- WANG Xue, WANG Zengping. Analysis of a novel criterion of transformer protection based on model[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 30-34.
- [5] 董霞,刘志珍. 三相变压器直流偏磁仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 121-125.
- DONG Xia, LIU Zhizhen. Simulative analysis of three-phase transformer with DC bias[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 121-125.
- [6] 张雪松,黄莉. 基于PSCAD/EMTDC的变压器直流偏磁仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 78-84.
- ZHANG Xuesong, HUANG Li. Simulation analysis of DC magnetic bias induced current of transformer based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 78-84.
- [7] 李泓志,崔翔,刘东升,等. 直流偏磁对三相电力变压器的影响[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 88-96.
- LI Hongzhi, CUI Xiang, LIU Dongsheng, et al. Influence on the three-phase power transformer by DC bias excitation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 88-96.
- [8] 李晓萍,文习山. 三相五柱变压器直流偏磁计算[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 127-132.
- LI Xiaoping, WEN Xishan. DC bias computation study on three-phase five limbs transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 127-132.
- [9] 赵小军,张晓欣,李慧奇,等. 基于谐波平衡法的变压器直流偏磁电路-磁路频域耦合模型[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 211-218.
- ZHAO Xiaojun, ZHANG Xiaoxin, LI Huiqi, et al. Frequency domain coupled model between magnetic and electric circuits of DC biased transformers by harmonic balance method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 211-218.
- [10] 杨理才,孙结中,刘蔚,等. 变压器匝间短路建模及其实际应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 140-145.
- YANG Licai, SUN Jiezhong, LIU Wei, et al. Transformer inter-turn short circuit modeling and its application[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 140-145.
- [11] 王灿,罗隆福,周冠东. 具有滤波功补绕组整流变压器的等值电路计算[J]. 湖南大学学报, 2014, 41(10): 67-70.
- WANG Can, LUO Longfu, ZHOU Guandong. Calculation of the equivalent circuit of rectifier transformer with additional filtering and power compensating winding[J]. Power System Protection and Control, 2014, 41(10): 67-70.
- [12] DE LEONF, MARTINEZ J A. Dual three-winding transformer equivalent circuit matching leakage measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 160-168.
- [13] ZIRKAS E, MOROZ Y I, MOSES A J, et al. Static and dynamic hysteresis models for studying transformer transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2352-2362.
- [14] 王灿,罗隆福,陈跃辉,等. 220 kV 变压器附加绕组专接滤波器的谐波治理方案[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 186-194.
- WANG Can, LUO Longfu, CHEN Yuehui, et al. A program of harmonic suppression with filters connected to the 220 kV transformer's additional winding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 186-194.
- [15] 王佳佳,周念成,王强钢,等. 电网电压不平衡下串联型12脉波整流装置的频域谐波建模[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 69-98.
- WANG Jiajia, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Frequency-domain harmonic modeling of the series 12-pulse rectifier under unbalanced voltage condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 69-98.

作者简介:



段振锋

段振锋(1987—),男,湖南邵阳人,工程师,从事电力系统运行与保护技术工作;

付鹏武(1986—),男,湖南株洲人,工程师,硕士,从事电力系统运行与保护技术工作;

吴佳芳(1993—),女,四川资阳人,硕士研究生,从事电力系统及其自动化方面的研究工作(E-mail:jfgirl@qq.com)。

Transient model and short circuit calculation of four-winding transformer based on coupling leakage inductance

DUAN Zhenfeng¹, FU Pengwu¹, WU Jiafang², HE Zhi¹, ZOU Xing¹, ZHOU Niancheng²

(1. State Grid Loudi Power Supply Company, Loudi 417000, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To ensure the protection setting reliability of substations containing four-winding transformer, it is necessary to study the detailed transient model of four-winding transformer and its equivalent circuit for short circuit calculation. The shortcomings of conventional transformer equivalent circuit are analyzed, and the equivalent circuit based on the improved coupling leakage inductance is deduced. According to the topological structure of three-phase three-column type four-winding transformer, the duality principle is employed to establish an electrical circuit and magnetic circuit transient model of four-winding transformer based on coupling leakage inductance. According to the characteristic that the mutual impedance of leakage magnetic circuit is far less than its leakage impedance, the simplified equivalent circuit and zero-sequence impedance of four-winding transformer for short circuit calculation is deduced. Taking a 220 kV substation as a simulation calculation example, the result shows that the proposed transient model and short circuit calculation method of four-winding transformer can accurately calculate short circuit current of the substation containing four-winding transformer.

Key words: four-winding transformer; coupling leakage inductance; transient model; short circuit currents; calculation

附录

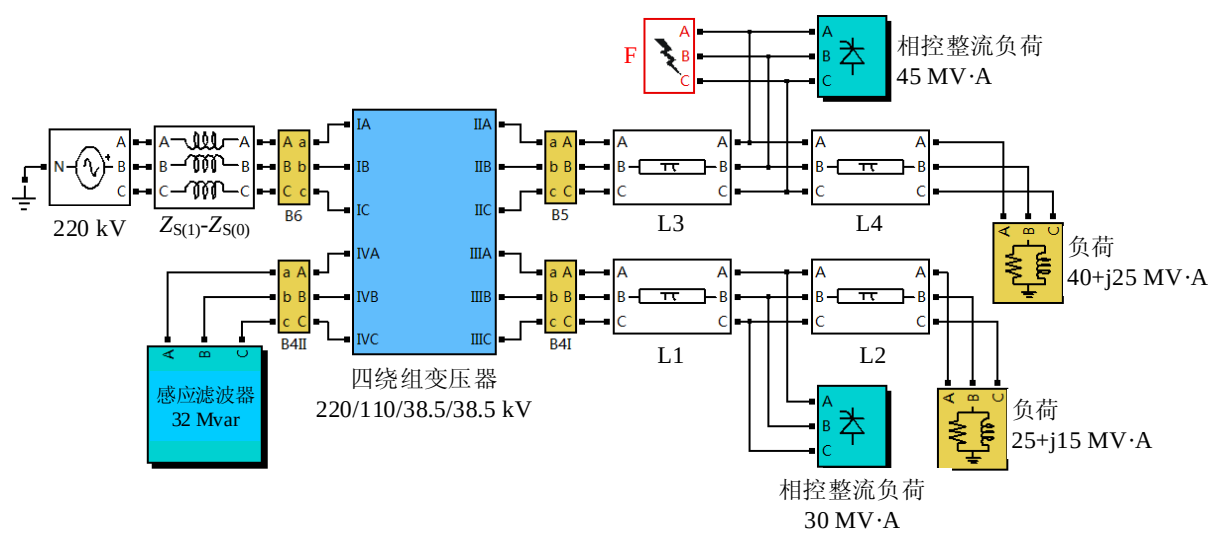


图 A1 含四绕组变压器的 220kV 变电站仿真模型

Fig.A1 Simulation model of a 220kV substation with four-winding transformer

表 A1 系统参数

Table A1 System parameters

参数	数值	参数	数值
电	电压 220kV	U_{k1-II}	16.9%
网	$Z_{S(1)}$ j5.8806Ω	U_{k1-III}	23.54%
	$Z_{S(0)}$ j8.9056Ω	U_{k1-IV}	9.49%
变	型号 SSZ11-L-180000/220	$U_{kII-III}$	5.04%
压	I (4)/II (2)/III(1)/IV(3)	U_{kII-IV}	5.22%
器	电压 230/121/38.5/38.5kV	$U_{kIII-IV}$	11.86%
	容量 180/180/90/50MV·A	P_0	103.98kW
	接线 YNyndd	I_0	0.064%

注： U_{k1-II} 、 U_{k1-III} 、 U_{k1-IV} 、 $U_{kII-III}$ 、 U_{kII-IV} 和 $U_{kIII-IV}$ 为变压器短路电压， P_0 和 I_0 分别为空载损耗和空载电流。