

基于Ansys Maxwell的变压器零序阻抗计算

黄克捷¹, 刘君², 徐舒蓉², 陈沛龙², 曾华荣², 李堃², 袁耀¹, 黎文浩¹

(1. 直流输电技术全国重点实验室(南方电网科学研究院), 广州 510663; 2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵阳 550005)

摘要: 变压器的零序阻抗是继电保护元件选择和整定值计算的重要依据, 是电力系统的重要参数, 可用于准确计算电力系统事故状态下短路电流的零序分量。变压器零序阻抗主要受铁心结构和绕组的联结组别影响, 解析法很难准确计算零序阻抗, 而有限元方法可以较好地解决此问题。以YNyn0d11的三相三柱变压器为研究对象, 在Ansys Maxwell中建立零序阻抗有限元场路耦合计算模型, 研究了3种零序阻抗的计算方法: 能量法、伏安法和电感矩阵法。基于上述模型研究了油箱及磁屏蔽建模方法对零序阻抗计算精度的影响。计算结果与变压器试验数据之间的误差在5%以内满足工程计算精度要求, 验证了提出的3种计算方法的有效性。

关键词: 变压器; 零序阻抗; 有限元; 场路耦合

Transformer Zero-Sequence Impedance Calculation Based on Ansys Maxwell

HUANG Kejie¹, LIU Jun², XU Shurong², CHEN Peilong², ZENG Huarong², LI Kun², YUAN Yao¹,
LI Wenhao¹

(1. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550005, China)

Abstract: The zero-sequence impedance or impedances of the transformers is an important basis for the selection and setting value calculation of relay protection components, and is an important parameter of power systems. It can be used to accurately calculate the zero-sequence component of short-circuit current in power system accident states. The zero-sequence impedance of transformers is mainly affected by the structure of the iron core and the connection group of the windings. Analytical methods are difficult to accurately calculate the zero-sequence impedance, while finite element methods can better solve this problem. Taking YNyn0d11 3-phase 3-leg transformer as the research object, a finite element field circuit coupling calculation model for zero-sequence impedance is established in Ansys Maxwell, and three calculation methods for zero sequence impedance are studied: energy method, volt-ampere method, and inductance matrix method. Based on the above model, the influence of fuel tank and magnetic shielding modeling methods on the accuracy of zero sequence impedance calculation is studied. The error between the calculation results and the transformer test data is within 5%, which meets the engineering calculation accuracy requirements and verifies the effectiveness of the three proposed calculation methods.

Key words: transformer; zero-sequence impedance; finite element; field circuit coupled

0 引言

电力变压器是电力系统中最重要设备之一,

其功能是将电能从一个电压等级转换到另一个电压等级, 以满足不同电压等级的电力传输需求。变压器零序阻抗是电力系统短路电流计算和继电保护整定的重要输入参数, 其数值的准确性将直接影响与其相关的保护定值整定是否正确^[1-2]。

变压器零序和正序阻抗的关系主要取决于磁路形式、绕组联结组、绕组相对位置和漏磁通道, 还受变压器容量、电压等级和所用材料的影响, 用解

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助项目(2021B0101190003); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GZKJXM20222296)。

Foundation item: Supported by the Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province (2021B0101190003); the Science and Technology Projects of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GZKJXM20222296).

析法难以计算。变压器的生产设计单位往往根据类似结构的产品总结出零序与正序阻抗之间的关联系数,在变压器电磁计算或招投标阶段,尽管计算值与实测值往往存在一定的偏差,但仍可用于大致估算零序阻抗。对于新结构和新设计的产品,用于计算零序阻抗的经验系数需要进一步进行统计分析。如果使用旧设计产品积累的经验系数来估计新结构的零序阻抗,可能会产生较大的误差。考虑到零序阻抗的特殊性及其在电力系统继电保护中的重要作用,准确计算各种试验组合下变压器的零序阻抗具有重要意义。

目前行业内对变压器零序阻抗的计算主要以有限元方法为主^[3-6],其基本原理与正序阻抗的计算是一致的,即通过磁场计算获得电感的储能进而计算电感值和阻抗值。但是由于零序磁路与正序磁路的差异性,对于模型简化及边界条件的设置仍需要进行单独研究。吕建玉^[3]分析了影响变压器零序阻抗的因素,提出了零序阻抗的试验测量方法。邹德旭^[4]使用MagNet软件基于能量法及场-路耦方法对不同联结方式及在不同分接型式下的变压器的短路阻抗进行了计算,验证了三维时谐场对短路阻抗计算的准确性。董爽丽等^[5]使用MagNet软件场-路耦合方法分别研究了线圈建模精细度及网格大小对正序短路阻抗计算精度的影响,讨论了三维模型和二维模型对计算精度的影响,发现二维计算不能反映磁场分布的不均匀性,推荐采用三维计算,但没有讨论油箱及磁屏蔽建模对计算结果的影响。郭健^[6]讨论了油箱的建模对零序阻抗计算精度的影响,但是使用的是二维轴对称模型,不能完全模拟油箱及磁屏蔽结构的三维特性。

基于以上研究现状,本文在前人的研究基础上以YNyn0d11的三相三柱变压器为研究对象,在Maxwell中建立零序阻抗有限元场路耦合计算模型,研究了3种零序阻抗的计算方法。基于上述模型研究了油箱及磁屏蔽建模方法对零序阻抗计算精度的影响。计算结果与变压器试验数据之间的误差在5%以内满足工程计算精度要求,验证了提出的3种计算方法的有效性。

1 影响变压器零序阻抗的因素

对变压器而言,由于三相磁耦合电路是静止的,改变三相的相序并不改变各相的互感。因此正

序和负序的阻抗是相等的,并等于负载实验测得的短路阻抗。而变压器的零序阻抗与正序和负序阻抗存在很大差异。一般来说,变压器零序阻抗主要与铁心结构(磁路结构)和联结组别有密切关系。

1.1 磁路对零序阻抗的影响

对于三相三柱变压器,如图1所示,由于零序磁通相位相同,大小相等,因此不可能在铁心内形成闭合回路,磁力线大部分要穿过上下铁轭以及夹件、油箱形成磁回路。这种情况下零序磁通的磁阻较大,磁场总能量较小,零序阻抗较小。在变压器非对称运行时,中性点漂移不大。

对于三相五柱变压器,其旁轭可以为零序磁通提供回路,因此零序阻抗接近正序阻抗。各种联结组别下的零序阻抗可以通过正序阻抗等值电路计算得出。在这种情况下很小的零序电流会产生较大的零序磁通,中性点漂移严重。

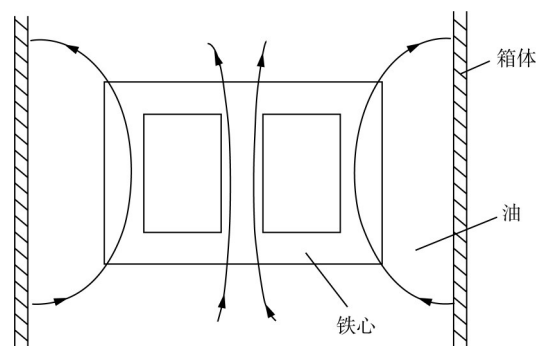


图1 三相三柱式变压器中的零序磁通路径

Fig. 1 Paths of zero-sequence fluxes of three-phase three-leg transformer

1.2 联结组别对零序阻抗的影响

由于变压器绕组的联结组别对零序电流的流动有很大的影响,因此联结组别的不同将直接影响零序阻抗的数值。

如图2所示为Yy联结组别。三相零序电流大小相位都相同,原副边零序电流都无法流通,等效电路为开路,零序阻抗为无穷大。

如图3所示为YNyn联结组别。原副边都有中性点,三相零序电流利用中性点形成回路,原副边都有零序电流流通,零序阻抗约等于正序阻抗。

如图4所示为YNy联结组别。一次侧YN联结,零序电流通过中性点形成回路,零序阻抗有一定数

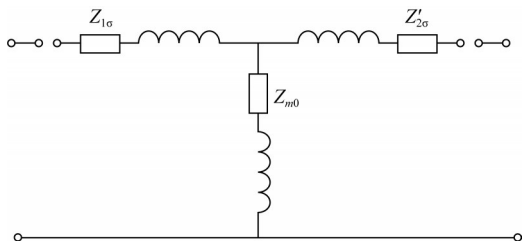


图 2 Yy 联结组

Fig. 2 Yy connection group

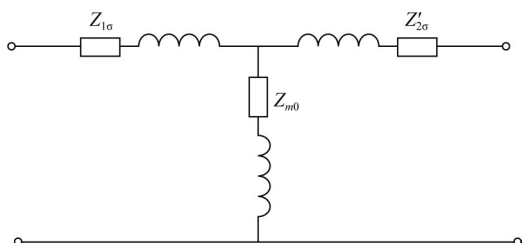


图 3 YNyn 联结

Fig. 3 YNyn connection group

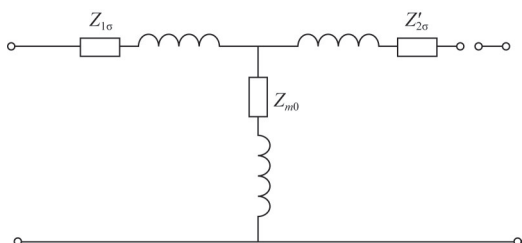


图 4 YNy 联结

Fig. 4 YNy connection group

值；二次侧为 y 联结，零序电流无法流通，等值电路相当于开路，零序阻抗无穷大。

图 5 为 YN/d 联结组别。零序电流只在二次侧三相绕组内部流动，形成闭合回路，在变压器内部相当于短路，从三个进线端看进去相当于开路，零序阻抗为无穷大。一次侧 YN 联结，零序电流经过中性点形成回路，由于二次侧的零序电流只在内部流动，所以从一次侧看进去，二次侧绕组对零序电流处于短路状态。

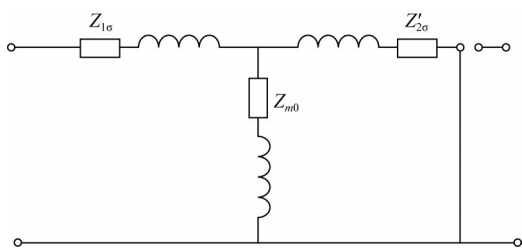


图 5 YNd 联结

Fig. 5 YNd connection group

2 算例模型

由于三相三柱变压器的零序磁通无法在铁心内形成闭合磁路，磁力线大部分要经过油箱形成磁回路，这使得三相三柱变压器的零序阻抗较难通过解析法进行计算。因此，这里使用一台三相三柱变压器为例进行计算。变压器绕组的连接方式及匝数如图 6 所示，其基本信息如下：

额定容量：63 000/63 000/63 000 kVA

额定电压：110/38.5/10.5 kV

额定频率：50 Hz

联结组别：YNyn0d11

绕组排列：铁心-低压-中压-高压-调压(调压绕组分上下两个线圈并联)

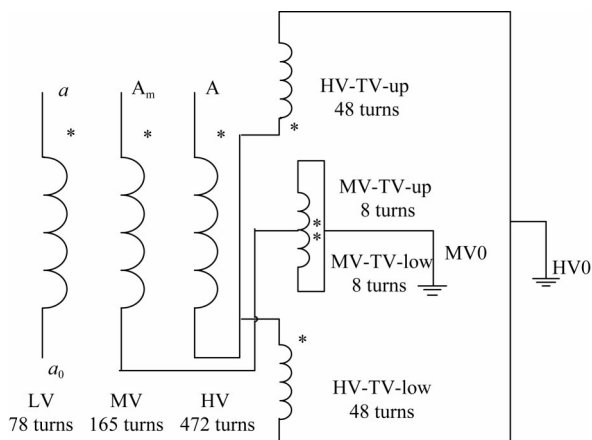


图 6 变压器绕组联结示意图

Fig. 6 Sketch diagram of transformer winding connection

由于三相三柱变压器零序磁通经过油箱形成闭合磁路，所以计算模型包括油箱及磁屏蔽，如图 7 所示。选择 Maxwell 涡流场求解器^[7]，设置求解频率为 50 Hz，求解域为整体模型的 110 % 尺寸。绕组激励选择外电路，根据具体模拟的试验接线对三相绕组进行电路连接，如图 8—11 所示。

研究对象为三绕组变压器，根据零序阻抗测试电路，共有 4 种接线方式。

1) 高压 ABC-O 供电，中压开路，低压角接 (HOC)；

2) 高压 ABC-O 供电，中压短路，低压角接 (HSC)；

3) 中压 $A_m B_m C_m$ -O_m 供电，高压开路，低压角接 (MOC)；

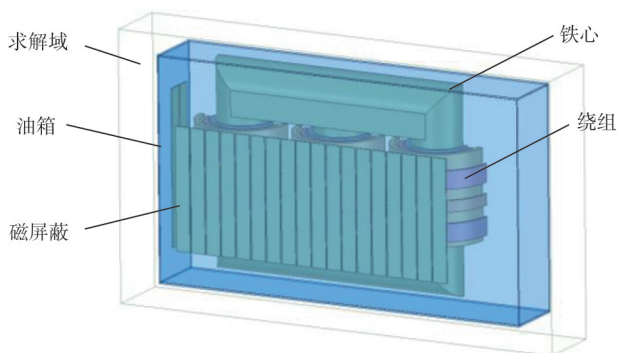


图7 变压器模型

Fig. 7 Transformer model

4)中压 $A_m B_m C_m$ - O_m 供电,高压短路,低压角接(MSC)。

3 计算零序阻抗的3种方法

本文使用3种方法计算变压器零序阻抗。3种方法均通过在Maxwell的output variable中编写公式的方法实现。

3.1 伏安法

伏安法使用Maxwell外电路中电压表和电流表的读数,依据欧姆定律计算零序阻抗的欧姆值,这与实际变压器工厂试验中测量零序阻抗的方法一

致,计算公式如式(1)所示。零序阻抗是每一相的阻抗值,计算中应换算至单相的阻抗值。根据图8—11,Maxwell外电路的中电流表记录的是三相电流之和,所以对于三相一体式变压器计算中应取电流表读数的1/3。

$$Z_{\text{zero}} = \frac{3U_s}{I_s} \quad (1)$$

式中: Z_{zero} 为零序阻抗, Ω ; U_s 为施加电源的电压有效值,V; I_s 为电源输出电流的有效值,A。

3.2 能量法

变压器阻抗包括两个分量:电阻和电抗分量,对大型变压器来说,电阻分量通常可以忽略^[8-10],只要计算出变压器所消耗的无功功率,就可计算出变压器的阻抗,因此只要计算出磁场储能 E 即可求出阻抗。这种通过计算磁场储能进而计算阻抗的方法即称为能量法^[4]。

$$E = \frac{1}{2} L I_s^2 \quad (2)$$

式中: E 为有限元计算得到的磁场储能,J; L 为电感有效值,mH; I_s 为电源输出的电流有效值,A。

零序阻抗是每一相的阻抗值,对三相变压器只需要1/3的磁场储能。零序阻抗的单位是欧姆(Ω),

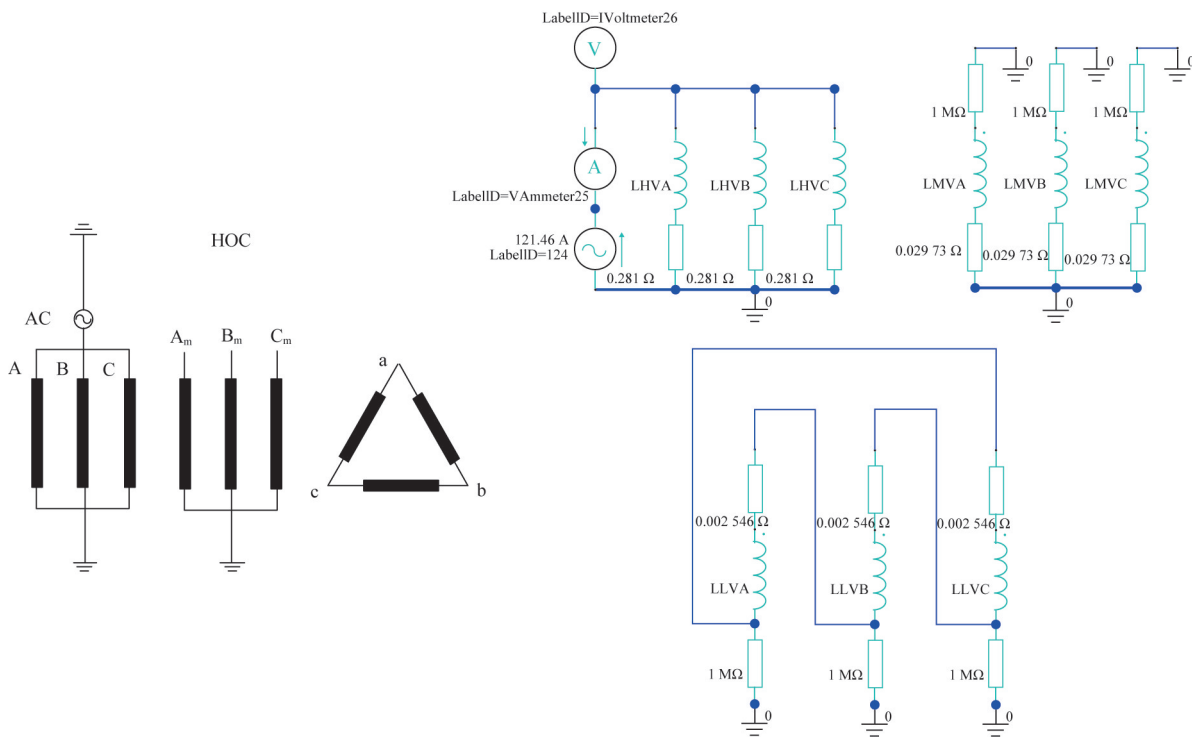


图8 HOC接线图与Maxwell中的电路图

Fig. 8 HOC test wiring diagram and Maxwell circuit diagram

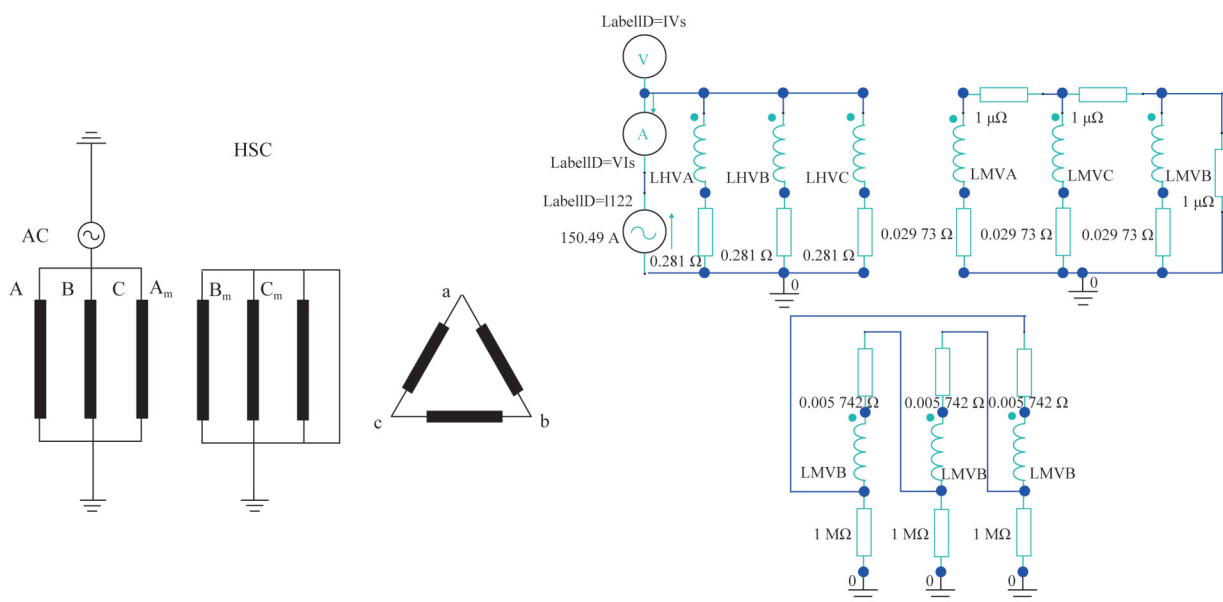


图 9 HSC 接线图与 Maxwell 中的电路图

Fig. 9 HSC test wiring diagram and Maxwell circuit diagram

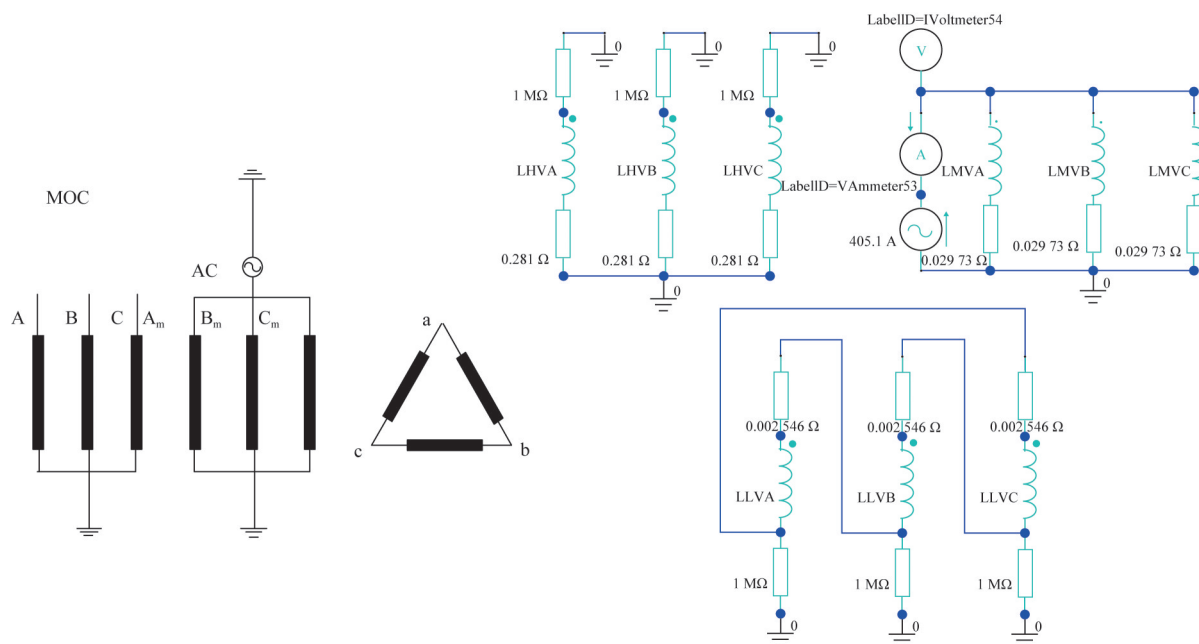


图 10 MOC 接线图与 Maxwell 中的电路图

Fig. 10 MOC test wiring diagram and Maxwell circuit diagram

所以漏感公式中要乘以角频率 ω 。由此可推导能量法计算零序阻抗的公式如下。

$$Z_{\text{zero}} = \omega \times \frac{2}{3} E \times \frac{1}{\left(I_s/3\right)^2} \quad (3)$$

式中 ω 为电源的角频率, rad/s。

3.3 电感矩阵法

电感矩阵法根据绕组自感和互感计算两两绕

组之间的漏感进而计算零序阻抗。对于图 8—11 的 4 种试验接线, 零序阻抗分为两个公式进行计算。

对于 HOC/MOC 接线方式, 由于有一个绕组是开路状态, 其等效电路相当于双绕组变压器, 假设两个绕组的编号分别为 1 和 2, 绕组漏感为:

$$Z_{\text{zero}(1-2)} = \omega \left(\frac{L_{11}L_{22} - L_{12}L_{21}}{L_{22}} \right) \quad (4)$$

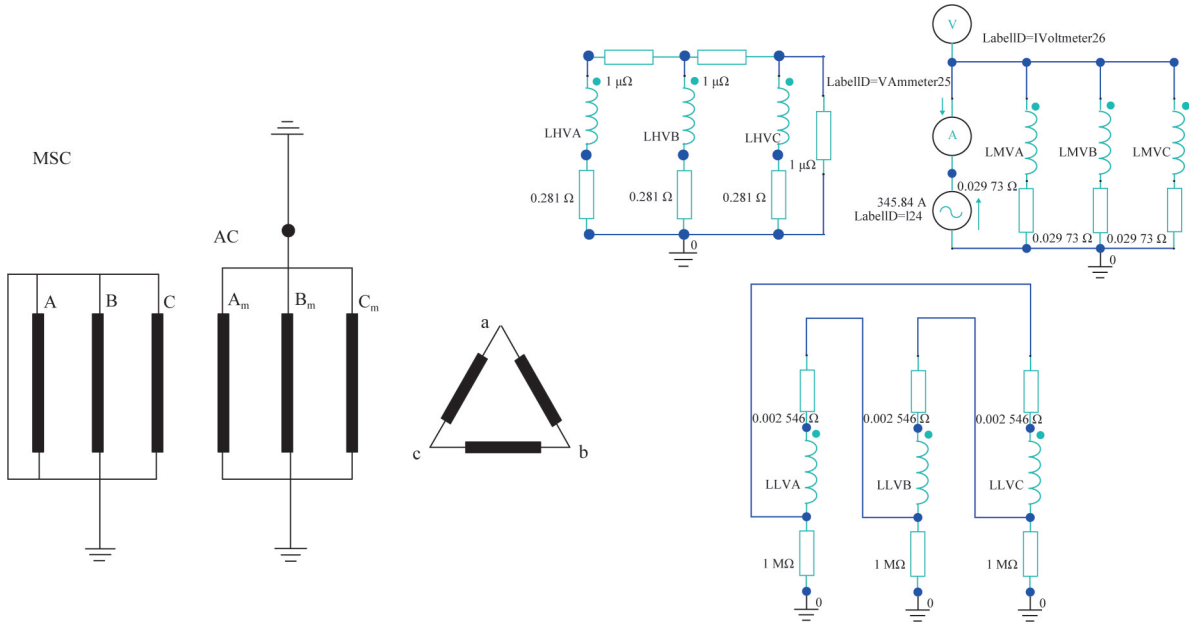


图11 MSC接线图与Maxwell中的电路图

Fig. 11 MSC test wiring diagram and Maxwell circuit diagram

式中: L_{11} 为绕组1的自感; L_{22} 为绕组2的自感; $L_{12} = L_{21}$ 为绕组1和绕组2的互感。

对于HSC/MSC接线方式, 由于3个绕组互感相互关联, 一个绕组对另外两个绕组的漏感公式推导要繁琐些。多个绕组的欧姆定律矩阵为:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1} & L_{n2} & \cdots & L_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

定义高中低绕组的编号为H、M、L。假设高压绕组施加激励, 中压及低压绕组短路(即HSC接线), 上述公式可写为:

$$\begin{aligned} u_H &= j\omega(L_{HH}i_H + L_{HM}i_M + L_{HL}i_L) \\ u_M &= j\omega(L_{HM}i_H + L_{MM}i_M + L_{ML}i_L) \\ u_L &= j\omega(L_{HL}i_H + L_{ML}i_L + L_{LL}i_L) \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $u_M = u_L = 0$, 可以推导出:

$$z_{\text{zero}(H-ML)} = \frac{u_H}{i_H} = j\omega \left(L_{HH} + L_{HM} \frac{i_M}{i_H} + L_{HL} \frac{i_L}{i_H} \right) \quad (7)$$

和

$$\begin{bmatrix} L_{MM} & L_{ML} \\ L_{LM} & L_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{i_M}{i_H} \\ \frac{i_L}{i_H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{HM} \\ -L_{HL} \end{bmatrix} \quad (8)$$

解上述线性方程可得:

$$\begin{bmatrix} \frac{i_M}{i_H} \\ \frac{i_L}{i_H} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_{MM}L_{LL} - L_{ML}^2} \begin{bmatrix} -L_{LL}L_{HM} + L_{ML}L_{HL} \\ L_{ML}L_{HM} - L_{MM}L_{HL} \end{bmatrix} \quad (9)$$

最终高压对中压/低压的漏感公式为:

$$Z_{\text{zero}(H-ML)} = \omega \left(L_{HH} + L_{HM} \frac{L_{ML}L_{HL} - L_{LL}L_{HM}}{L_{MM}L_{LL} - L_{ML}^2} + L_{HL} \frac{L_{ML}L_{HM} - L_{MM}L_{HL}}{L_{MM}L_{LL} - L_{ML}^2} \right) \quad (10)$$

将上述公式中下标H和M对换即可计算中压绕组施加激励, 高压及低压绕组短路的零序阻抗(即MSC接线)。

4 计算与试验对比

在Maxwell后处理模块 output variable 中编写3种计算方法的对应公式并计算4种零序阻抗试验接线图, 计算结果如表1所示。

将所有计算结果汇总并与试验数据进行对比,

表1 零序阻抗计算结果汇总

Tab. 1 Simulation results of zero-sequence impedance

试验接线	频率/Hz	伏安法/ Ω	能量法/ Ω	矩阵法/ Ω
HOC	50	34.034 443	34.043 617	34.679 955
HSC	50	19.468 880	19.404 208	20.206 776
MOC	50	1.468 371	1.467 807	1.497 894
MSC	50	0.840 985	0.840 011	0.840 373

见表 2。可见对于 4 种不同的试验接线, 用 3 种计算方法得到的零序阻抗与试验数据对比误差都小于 5%, 可以证明使用 Maxwell 可以准确地计算出不同接线方式下的变压器零序阻抗。

表 2 计算结果与试验数据对比

Tab. 2 Comparison of simulation results with test data

试验 接线	伏安法 Ω	误差 /%	能量法 Ω	误差 /%	矩阵法 Ω	误差 /%	试验/ Ω
HOC	34.034	2.9	34.044	2.9	34.680	4.7	33.040
HSC	19.470	1.0	19.400	0.7	20.200	4.6	19.260
MOC	1.468	2.7	1.468	2.7	1.497	4.6	1.428
MSC	0.841	4.3	0.840	4.2	0.840	4.2	0.805

在 3 种计算方法中, 伏安法与能量法结果比较接近, 而电感矩阵法与其他两种方法相比误差较大。这是由于伏安法和能量法是基于磁场储能计算零序阻抗的, 二者结果会更接近。从电感矩阵法的计算公式可以看出, 其分母部分为两项相减。由两个绕组之间的耦合系数公式 $k = L_{12} / \sqrt{L_{11} L_{22}}$ 可知, 耦合系数越接近 1, 分母的值越接近 0, 而对电力变压器来说, 为了更有效地传输功率, 采用紧密耦合, k 值接近于 1。即绕组的自感和互感值有非常小的变化对零序阻抗的计算都会产生较大的影响, 计算中需要保留至少 6 位有效数字。但是电感矩阵法的优点在于仅需要进行一次有限元计算, 即可获得不同试验接线下的零序阻抗, 而其他两种方法对不同的试验接线需要分别开展计算。因此对于零序阻抗的计算, 在精度要求高的场合推荐使用伏安法和能量法进行计算, 在精度要求不高但计算效率要求高的场合可以使用电感矩阵法。

5 油箱及磁屏蔽建模对零序阻抗计算结果的影响

实际变压器的油箱壁的厚度为 10 mm 左右、箱底、箱盖为 20~30 mm, 长度可达 10 m, 宽度 3~4 m, 磁屏蔽厚度约为 20 mm, 长度略小于油箱高度, 因此油箱及磁屏蔽均为大尺寸薄板结构, 在有限元计算中如果考虑油箱和磁屏蔽的实体模型不仅增加建模的工作量还增加网格数量, 降低计算效率^[11]。通常在变压器正序阻抗计算中对油箱及磁屏蔽进行简化, 以油箱内壁施加阻抗边界条件代替实体油箱及磁屏蔽模型^[12-13]。

但是在零序阻抗计算中, 因为油箱是金属材料, 当零序漏磁通通过油箱壁时, 会在油箱内产生涡流^[14-15]。该涡流可以等效成零序电流在三角形绕组内流动, 这个现象称为油箱的“D”作用^[16]。

本节通过计算定量计算研究油箱及磁屏蔽建模对零序阻抗计算精度的影响。即分别考虑 1) 考虑实体油箱和磁屏蔽; 2) 无油箱和磁屏蔽但油箱内壁施加阻抗边界; 3) 无油箱和磁屏蔽且边界开放等 3 种建模方法对零序阻抗计算结果精度的影响。其中模型 1 模拟变压器实际运行状态, 模型 2 为正序阻抗计算的常用建模方法, 模型 3 模拟变压器器身落箱前的半成品状态。

按照上述 3 种建模方法, 计算 HOC 和 HSC 的零序阻抗, 计算结果对比在表 3 中列出。

表 3 是否考虑油箱对零序阻抗计算结果的影响

Tab. 3 Effect of tank on zero-sequence impedance computation

试验接线 计算模型	HOC		HSC		网格数 /万
	计算值/ Ω	误差/%	计算值/ Ω	误差/%	
1	34.03	2.996	19.47	1.090	37
2	34.70	5.024	18.45	-4.206	34
3	31.48	-4.722	16.83	-12.620	34

从 3 种模型的计算结果可见, 模型 1 误差最小, 模型 2 次之, 模型 3 误差最大。还可以发现同样是模型 3, 去掉油箱和磁屏蔽后 HOC 和 HSC 的零序阻抗计算结果均有所减小, 但 HSC 的降幅更大, 即模型 3 在 HSC 接线下的误差远大于 HOC。

对于 HOC 接线方式, 中压绕组开路, 同时交链高压、低压绕组的磁通较少, 进入油箱的磁通较少, 油箱在磁路中的作用不明显。对于 HSC 接线方式, 中压绕组短路, 绕组间耦合更紧密, 磁通主要经过油箱形成闭合回路, 油箱在磁路中的作用更明显, 下面由磁场计算结果定量说明。

绘制 HOC 和 HSC 的磁力线分布云图, 如图 12—16 所示。从图 12—13 中可以看出, 磁力线主要通过磁屏蔽以及油箱形成闭合回路。计算中 HOC 和 HSC 的电源电流相同, 但 HSC 油箱和磁屏蔽的磁感应强度 B 远大于 HOC, 这说明 HSC 的磁屏蔽或油箱在磁路中的作用更明显。

图 14 显示了去掉油箱和磁屏蔽后(模型 3), 磁通在求解域内形成闭合回路, 增大了整个磁路的磁阻, 因此零序阻抗计算结果偏小。

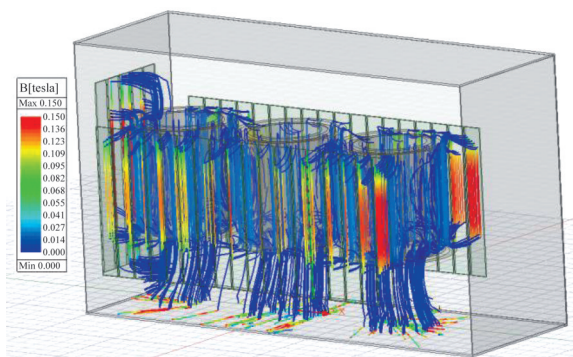


图12 HOC磁力线分布(模型1)

Fig. 12 Distribution of magnetic field lines HOC(model 1)

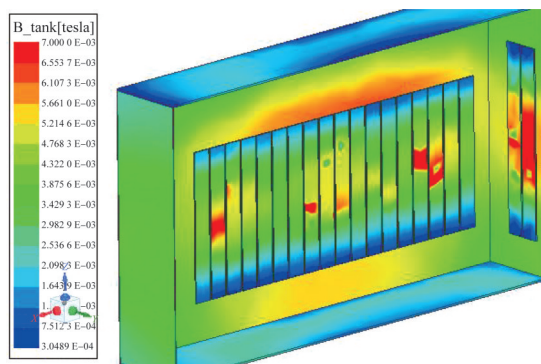


图15 HOC油箱/磁屏蔽的磁场分布云图(模型1)

Fig. 15 Magnetic field contours of the tank/magnetic shield HOC(model 1)

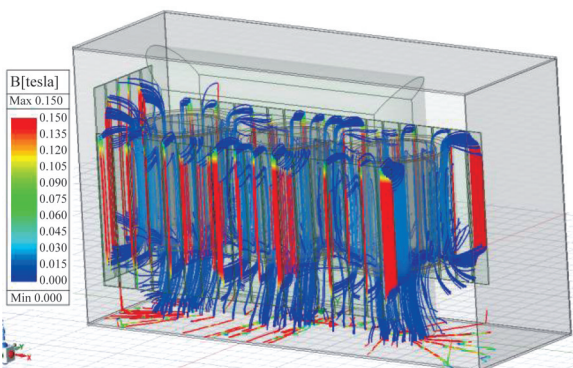


图13 HSC磁力线分布云图(模型1)

Fig. 13 Distribution of magnetic field lines HSC(model 1)

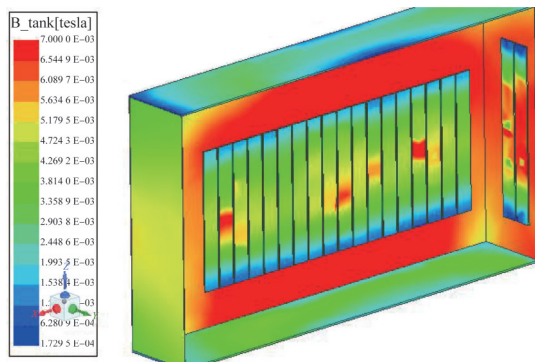


图16 HSC油箱/磁屏蔽的磁场分布云图(模型1)

Fig. 16 Magnetic field contours of the tank/magnetic shield HSC (model 1)

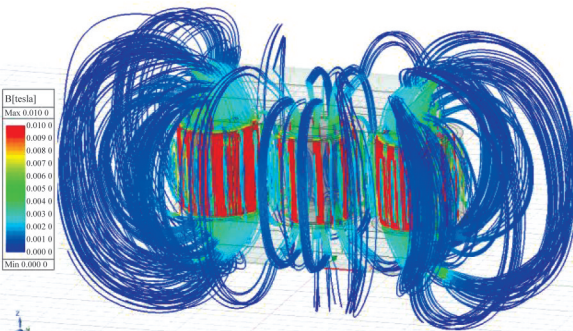


图14 去掉油箱和磁屏蔽的HSC磁力线分布云图(模型3)

Fig. 14 Distribution of magnetic field lines HSC without tank and magnet shield (model 3)

从图15—16可以看出在HOC接线下,油箱/磁屏蔽的磁通密度小于HSC接线下油箱/磁屏蔽的磁通密度,这就解释了油箱/磁屏蔽对HSC的计算结果影响更大。

6 结论

分析了伏安法、能量法和电感矩阵法3种变压器零序阻抗计算方法,推导了相应的计算公式。以

一台三相三柱式YNynd变压器为例,研究如何通过Maxwell有限元分析软件计算变压器零序阻抗工况下的工频磁场,并在软件的后处理模块变量输出中编写3个公式计算变压器零序阻抗,同时研究了油箱和磁屏蔽的建模方法对零序阻抗的影响。计算结果表明以下几点。

1)3种方法计算零序阻抗与测试值相比误差都在5%之内,证明3种方法都可以准确计算零序阻抗。由于电感矩阵法对电感值的微小变化较为敏感,推荐使用伏安法和能量法。

2)对于三相三柱变压器,由于零序磁通经油箱形成闭合回路,油箱对零序阻抗影响较大,计算中建议建立油箱和磁屏蔽的实体模型,油箱内壁施加阻抗边界的做法将增大计算误差。

3)相对于中压开路(HOC),中压短路(HSC)接线方式下有更多的磁力线经过油箱形成回路,油箱在磁路中作用更明显。

参考文献

- [1] 梁振锋, 马龙, 桂小智, 等. 新能源场站并网联络线纵联零序方向保护的整定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 82–90.
LIANG Zhenfeng, MA Long, GUI Xiaozhi, et al. The setting of zero sequence directional pilot protection for a grid tie-line of a new energy station[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 82–90.
- [2] 雷翔胜, 余梦泽, 王彦峰, 等. 变压器绕组振动特性的高精度求解与分析[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 80–87.
LEI Xiangsheng, YU Mengze, WANG Yanfeng, et al. High-accurate solution and analysis for vibration characteristics of transformer windings[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 80–87.
- [3] 吕建玉, 张长栓, 沈红. 变压器零序阻抗的特点[J]. 变压器, 2007, 44(8): 33–35.
LÜ Jianyu, ZHANG Changshuan, SHEN Hong. Characteristics of zero-sequence impedance of transformer[J]. Transformer, 2007, 44(8): 33–35.
- [4] 邹德旭, 钱国超, 井永腾, 等. 基于漏磁能量法的变压器短路阻抗计算与分析[J]. 变压器, 2019, 56(1): 13–17.
ZHOU Dexu, QIAN Guochao, JING Yongteng, et al. Calculation and analysis of transformer short-circuit impedance based on magnetic flux leakage energy method[J]. Transformer, 2019, 56(1): 13–17.
- [5] 董爽丽, 董景义. 三相电力变压器零序阻抗分析计算[J]. 变压器, 2016, 53(6): 5–11.
DONG Shuangli, DONG Jingyi. Analysis and calculation of zero-sequence impedance for three-phase power transformer[J]. Transformer, 2016, 53(6): 5–11.
- [6] 郭健, 林鹤云, 徐子宏, 等. 三相三柱变压器零序阻抗的场路耦合计算与分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 80–85.
GUO Jian, LIN Heyun, XU Zihong, et al. Calculation and analysis of zero-sequence impedance of three-phase and three limbs transformer based on field circuit coupled method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 23(3): 80–85.
- [7] 刘梦, 胡钢墩, 张健, 等. 一种基于ANSYS Maxwell的变压器漏电感的计算方法研究[J]. 变压器, 2020, 57(7): 20–25.
LIU Meng, HU Gangdun, ZHANG Jian, et al. Research on calculation of transformer leakage inductance based on ANSYS Maxwell[J]. Transformer, 2020, 57(7): 20–25.
- [8] 朱佳, 王峰, 李一泉, 等. 基于Tanimoto相似度的变压器零序差动保护约束方案[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 193–199.
ZHU Jia, WANG Feng, LI Yiquan, et al. Restraint scheme of transformer zero sequence differential protection based on tanimoto similarity[J]. Electric Power, 2023, 56(8): 193–199.
- [9] 张晓华, 吕志瑞, 孙云生, 等. 基于修正热路模型的油浸式变压器绕组热点温度计算研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(3): 78–84.
ZHANG Xiaohua, LÜ Zhirui, SUN Yunsheng, et al. Research of hot spot temperature calculation in oil-immersed transformer based on modified thermal model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(3): 78–84.
- [10] 刘力卿, 马小光, 李雪, 等. 变压器绕组轴向振动模型及固有振动特性影响因素研究[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 149–155.
LIU Liqing, MA Xiaoguang, LI Xue, et al. Research on axial vibration model and factors influencing natural vibration characteristics of transformer winding[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 149–155.
- [11] 郝艳, 咸日常, 胡玉耀, 等. 基于场-路耦合有限元法的干式变压器匝间短路暂态特性研究[J]. 南方电网技术, 2023, 17(6): 90–98.
HAO Yan, XIAN Richang, HU Yuyao, et al. Research on transient characteristics of interturn short circuit of dry-type transformer based on field-circuit coupled finite element method[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(6): 90–98.
- [12] 刘建锋, 李志远, 周亚茹. 基于漏磁场和ICOA-ResNet的变压器绕组早期故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 99–110.
LIU Jianfeng, LI Zhiyuan, ZHOU Yaru. Transformer windings based on leakage field and ICOA-ResNet early fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 99–110.
- [13] 翁汉琰, 康涛, 郭伟达, 等. 高压内置变压器涌流对母联零序过流保护的影响及对策[J]. 南方电网技术, 2023, 17(3): 75–84.
WENG Hanli, KANG Tao, GUO Yida, et al. Influence and countermeasures of inrush current of transformer with built-in high voltage winding on zero sequence overcurrent protection of bus tie circuit-breaker[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(3): 75–84.
- [14] 康雅华, 郭源成. 换流变压器肺叶式磁屏蔽对漏磁及损耗的影响分析[J]. 变压器, 2019, 56(11): 53–56.
KANG Yahua, GUO Yuancheng. Calculation and analysis on influence of lobe type magnetic shield to magnetic leakage and loss of converter transformer[J]. Transformer, 2019, 56(11): 53–56.
- [15] 赵志刚, 温涛. 变压器杂散损耗计算中的局部表面阻抗建模方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(22): 4699–4708.
ZHAO Zhigang, WEN Tao. Calculation method of stray loss based on local surface impedance boundary modeling method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(22): 4699–4708.
- [16] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

收稿日期: 2023-12-09; 网络首发日期: 2024-07-02

作者简介:

黄克捷(1989), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为高压直流输电成套设计与电力设备多物理场计算, huangkj@csg.com;

刘君(1982), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为变电设备故障诊断技术;

徐舒蓉(1993), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为变电设备故障诊断技术。