

基于有限元法的变压器漏感计算 在绕组变形中的应用

李 朋¹, 郝治国¹, 张保会¹, 曹瑞峰¹, 褚云龙²

(1. 西安交通大学 电气学院, 陕西 西安 710049;

2. 西北电网有限公司, 陕西 西安 710048)

摘要: 电力变压器电磁分析与参数计算在科学研究与工程应用中一直受到普遍的重视, 而绕组变形作为故障隐患的重要特征, 其变形程度尚无法量化。以有限元方法为研究基础, 利用大型有限元软件 ANSYS 建立变压器铁芯、绕组模型; 以场路耦合方法实现变压器漏磁场的仿真, 同时利用能量法原理完成变压器漏感参数的计算。针对电力变压器发生绕组变形将会导致漏感参数发生变化的基本特征, 提出通过改变绕组的基本几何尺寸模拟绕组变形, 计算变形前后以及各种变形形式下的漏感参数值, 考察绕组变形状态和漏感参数变化量之间的关系。仿真计算结果与测量值比较, 表明方法的正确性、有效性和实用性。

关键词: 电力变压器; 有限元; ANSYS; 短路阻抗; 绕组变形

中图分类号: TM 41; O 241.82 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)07-0049-05

0 引言

电力变压器是电力系统最重要也是最昂贵的电气设备之一, 其电磁分析和参数计算方法的研究也一直备受关注。同时, 变压器在运行过程中, 其核心部件——绕组不可避免地要遭受各种故障短路电流引起的大电磁力的冲击, 可能使绕组局部或整体发生变形, 从而使得变压器无法正常运行, 因绕组变形导致的变压器事故率尤为突出^[1]。绕组变形具有隐蔽性、渐变性等特征, 因此, 为了预知变压器隐患、实现故障的早期预防、延长变压器使用寿命, 研究绕组变形程度及其特征描述具有重要意义。

近年来, 国内外提出并应用于现场的绕组变形诊断方法包括低压脉冲法^[2-4]、频率响应法^[5-6]、短路阻抗法。从变形检测方法的发展及特点看, 由于变压器短路阻抗及阻抗中的电感分量与绕组几何尺寸及相对位置有关^[7], 通过在线检测变压器短路电抗变化分析绕组健康状况的技术正逐渐得到重视^[8-9], 但对于绕组变形程度的描述尚未量化。而无论是短路阻抗还是漏电感参数的分析和测量, 最终都要归结为变压器电磁分析和参数计算方法的深入研究。

在此介绍了大型有限元软件 ANSYS 在变压器电磁特性分析及漏电感参数计算中的应用, 以一台实际的单相变压器为例, 进行了漏磁场分析, 计算了变压器的重要参数短路阻抗, 与普通磁路方法计算结果及测量值比较表明仿真计算原理的实用性。同时, 提出建立变压器铁芯绕组模型, 通过改变绕组几何尺寸模拟绕组变形, 为变压器绕组变形在线监测的研究提供一定的理论参考。

1 变压器漏磁特性分析与漏电感参数计算

1.1 电力变压器场路耦合有限元分析方法

变压器的原副边线圈均为载压线圈, 即输入端为电压源。在有限元分析软件 ANSYS 中将输入、输出等效为集中参数, 线圈区域按有限元剖分离散化求解, 该方法可称为场路耦合有限元法^[10-11], 见图 1。

在 ANSYS 建模过程中, 有限元求解区域的自由度选取较严格, 线圈区域选择动态矢量磁位 $\mathbf{A}$ 和电流 $\mathbf{i}$ 为自由度, 而非导体区域仅选择动态矢量磁位 $\mathbf{A}$ 为自由度。在轴对称圆柱坐标系下, 矢量磁位 $\mathbf{A} = \mathbf{A}_\alpha \alpha$ 的二维涡流场方程为

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{\mu r} \frac{\partial (r \mathbf{A}_\alpha)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\mu r} \frac{\partial (r \mathbf{A}_\alpha)}{\partial z} \right] = -\mathbf{J}_s + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}_\alpha}{\partial t} \quad (1)$$
$$\Gamma_1: r \mathbf{A}_\alpha = 0 \quad \Gamma_2: \frac{1}{r} \frac{\partial (r \mathbf{A}_\alpha)}{\partial n} = 0$$

式中 Γ_1 指模型的左边界; Γ_2 指模型的其他边界。

变压器原副边区的电路方程为

$$u_1(t) = i_1 R_{1\sigma} + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + e_1$$
$$u_2(t) = e_2 - \left(i_2 R_{2\sigma} + L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt} \right) \quad (2)$$

$$e_1 = N_1 \frac{d}{dt} \int A_1 dl_1, \quad e_2 = N_2 \frac{d}{dt} \int A_2 dl_2$$

式中 e_1, e_2 为原副边感应电动势; N_1, N_2 为原副边

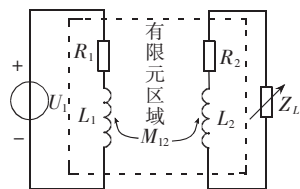


图 1 变压器的场路耦合模型
Fig.1 Magnetic-electric coupling model of transformer

匝数; i_1, i_2 为原副边电流; $R_{1\sigma}, R_{2\sigma}$ 为原副边等效漏电阻; $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ 为原副边等效漏电感。

联立上述方程,即可以对二维轴对称时变压器的漏磁场进行计算。这是一个典型的“磁场-电路”耦合方程,其离散的耦合方程为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{C}^{iA} & 0 & 0 \\ \mathbf{C}^{iA} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}^{AA} & \mathbf{K}^{Ai} & 0 \\ 0 & \mathbf{K}^{ii} & 0 \\ 0 & \mathbf{K}^{ii} & \mathbf{K}^{ie} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{i} \\ \mathbf{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{U}_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{A}$ 为节点向量位矩阵; $\mathbf{i}$ 为节点电流矩阵; $\mathbf{e}$ 为节点电动势矩阵; $\mathbf{K}^{AA}$ 为矢量位刚度矩阵; $\mathbf{K}^{ii}$ 为电阻刚度矩阵; $\mathbf{K}^{Ai}$ 为“磁位-电流”耦合刚度矩阵; $\mathbf{C}^{iA}$ 为电感阻尼矩阵; $\mathbf{K}^{ie}$ 为“电流-电动势”耦合刚度矩阵; $\mathbf{U}_0$ 为外加电压矩阵。

通过求解方程,可得到原副边任意节点在不同时刻的自由度,而这里关心的是求解矢量磁位 $\mathbf{A}_\alpha$,用于后续的变压器电感参数计算。

1.2 ANSYS 中变压器电感参数计算的能量法原理

电感是变压器绕组线圈的重要参数。对于变压器而言,消耗在变压器内部的有功功率等于变压器的电阻损耗功率和漏磁场引起的损耗功率之和,而无功功率则用来建立主磁场和漏磁场。变压器的漏磁场计算正是从麦克斯韦方程出发,求出表征磁场的能量 W ,从而求出漏电感^[12]。对于单线圈系统,磁场能量 W_m 与电感量 L 的关系可用式(4)表示,其中 I 为通过线圈电流的有效值。

$$L = 2W_m / I^2 \quad (4)$$

对于由线性磁性介质组成的场域,各部分的磁场能量 W_m 可表示为

$$W_m = \int_V \frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dV = \frac{1}{2\mu} \int_V \mathbf{B}^2 dV \quad (5)$$

式中 $\mathbf{B}$ 为介质内的磁感应强度,通过有限元法可以求得; μ 为介质的磁导率; V 为介质区域体积。

对于二维轴对称场, V 为旋转体,所以,式(5)可进行如下简化:

$$W_m = \frac{1}{2\mu} \int_s \mathbf{B}^2 \cdot 2\pi r dS \quad (6)$$

式中 r 为各点距轴线的距离。

考虑有限元的离散化,则式(6)离散化为

$$W_m = \frac{\pi}{\mu} \sum (B_i^2 r_i S_i) \quad (7)$$

式中 B_i 为离散单元内的平均磁感应强度; r_i 为离散单元质心距轴线的距离; S_i 为离散单元的面积。

在轴对称磁场中,由 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ 有

$$B_r = -\frac{\partial A_\alpha}{\partial z}, B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial (rA_\alpha)}{\partial r} \quad (8)$$

当 $\mathbf{A}_\alpha$ 通过式(3)边值问题求得后,各单元的磁感应强度 $\mathbf{B}$ 可按式(8)得到。在解得各区域磁场能量后,整个场域的磁场能量 $W_m = \sum W_{m(i)}$,总的漏电感

可通过式(4)获得。

2 基于有限元原理的漏感参数仿真计算

2.1 电力变压器仿真模型的建立及漏磁仿真

以一台实际的变压器为仿真对象,其中单相变压器基本参数是:型号 SF9-240000/500 kV;铁芯直径 1530 mm;高压线圈(原边)480 匝,截面尺寸 2080 mm×181.5 mm;低压线圈(副边)31 匝,截面尺寸 2080 mm×150 mm;高压线圈置于低压线圈外侧,低压线圈与铁芯间主绝缘距离 30 mm,高低压线圈间绝缘距离 108 mm,线圈到轭部间距 60×30 mm;铜导线电阻率 $2.135 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$,非铁磁物质的磁导率 μ_0 ,硅钢片的磁导率 $2000\mu_0$ 。

决定变压器漏磁场的主要因素是线圈电流、铁芯、箱壁。从安装位置上看,压板和夹件对漏磁场的整体改变不大,只是对线圈端部附近的磁场有局部的影响。因此,漏磁场模型中将不考虑压板和夹件的影响。铁芯材料导磁性能的非线性和各向异性对漏磁场的影响不大。这是因为,即使铁芯因主磁通而发生一定程度的饱和,其导磁性能仍远优于铁芯周围的空气或变压器油。尽管铁芯材料在各空间方向上有不同的磁导率,但它们的相对值都远大于 $\mu_0 (\approx 1.0)$,与周围区域中的空气或变压器油介质相比,铁芯的磁导率可近似认为是无穷大。因此,仿真过程中作出以下基本假设:

a. 电力变压器的漏磁场简化为二维非线性漏磁场,由于对称性,求解区域只考虑剖面的一半;

b. 高低压绕组近似认为高度相等,各子区域内安匝均匀分布,忽略线圈导线的涡流去磁作用;

c. 不计铁芯的磁滞效应,忽略铁芯的饱和,各向异性,近似认为铁芯磁导率为无穷大;

d. 忽略变压器绕组的各种支架、铁芯拉板、夹件等对漏磁场的影响。

通过以上假设及变压器基本数据可得到如图 2 所示的仿真模型。

变压器运行状态下,主磁通沿铁芯闭合,而漏磁通在线圈及周围非铁磁介质中流通。这里的求解区域即为漏磁通区域。

考虑有限元法的要求和变压器漏磁场的特点,场域的有限元网格剖分措施应着重考虑。线圈电流为漏磁场场源,漏磁场逐次或全部地交链线圈和线圈间的空道,场量绝大部分集中在线圈间的空道中,线圈及空道为主要求解场域,网格剖分密度应高于其他区域,这里采用映射四边形网格剖分^[13],可保证本区域的计算精度与网格的疏密程度无关。其余区域采用自由剖分形式即可满足计算要求。

通过仿真可得变压器漏磁场的分布如图 3 所示。漏磁仿真结果表明,变压器纵向漏磁在绕组中部最大,而横向漏磁在接近端部最大,与理论分析相符。

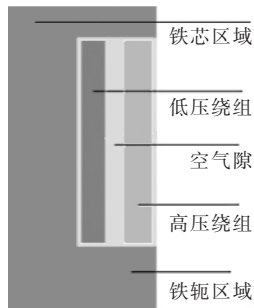


图2 变压器二维仿真模型

Fig.2 Planar model of transformer

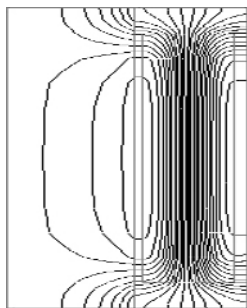


图3 变压器漏磁场仿真结果

Fig.3 Simulative result of leakage magnetic field

2.2 漏抗电压的仿真计算

基于有限元原理计算出变压器漏磁场能量,漏抗和漏磁场能量的关系如式(4)所示。由于电抗是电感与角频率的乘积,则有

$$X = \omega L = 2\pi f 2W_m / I^2 = 4\pi f W_m / I^2 \quad (9)$$

式中 X 、 L 分别为变压器短路漏电抗、漏电感; f 为工频 50 Hz; W_m 为变压器漏磁场能量; I 为电流有效值。

工程上习惯用变压器漏抗电压 u_k 与额定电压 u_N 的百分比来表征变压器的漏抗:

$$u_k \% = 4\pi f W_m / (I u_N) \times 100 \% \quad (10)$$

u_k % 的测量值为 14.10 %, 有限元法计算值为 14.62 % (误差 3.68 %), 磁路法计算值为 16.35 % (误差 16.78 %)。可见, 有限元法的计算精度较高, 优于传统的磁路法^[14], 从而验证了有限元法的正确性。计算结果大于实际测量值是由于对变压器的实际物理结构作出一定的简化造成的, 尤其是在建模过程中忽略了磁屏蔽, 使漏磁增大。

3 基于有限元原理的变压器绕组变形研究

3.1 变压器绕组漏电感参数分析

由于铁磁材料存在饱和现象, 主磁通与建立它的电流之间的关系是非线性的, 即 ϕ_m 与绕组电流非正比关系; 但漏磁通主要沿非铁磁材料闭合, 它与绕组电流保持线性关系, 且漏感可用下式表示^[15]:

$$L = \phi_\delta / i = N(Ni \Lambda_\delta) / i = N^2 \Lambda_\delta \quad (11)$$

式中 N 为线圈匝数; Λ_δ 为漏感磁通所经过磁路的磁导, 即磁阻 R_m 的倒数。

漏感 L 与漏磁通所经过磁路的磁导 Λ_δ 成正比。由于漏磁通是通过非磁性物质闭合的, 磁路不会饱和, 因此 Λ_δ 是常数, 其大小与绕组的尺寸、形状以及布置方式等物理外形因素有关。正常状态下变压器绕阻的匝数和漏磁通所经过磁路的磁导均未发生变化, 则变压器绕组的漏感亦不会发生变化^[16]。

有限元 ANSYS 软件的最大优点在于对模型的有限元计算区域的局部变化非常敏感, 且模型几何尺寸的改变易于实现。因此, 可以通过 ANSYS 软件对变压器绕组建立合理的模型, 改变绕组尺寸模拟变形, 并对绕组漏电感参数仿真计算, 分析绕组状态及变形情况, 从而达到绕组变形程度量化分析的研究目的。

3.2 变压器绕组变形的仿真研究

根据变压器绕组变形与漏电感参数之间关系的理论分析, 由于短路电流产生的巨大电动力和绕组的瞬间急剧发热, 有可能使变压器绕组发生轴向、径向尺寸变化, 绕组扭曲、鼓包, 甚至发生匝间故障等。当绕组发生不同程度的变形时, 漏电感参数将发生变化。为了分析变压器绕组变形量与漏抗电压变化量的关系, 变压器建立模型时要综合考虑模型几何尺寸容易改变和尽可能地模拟各种变形情况等因素, 这里以图 4 所示的变压器截面为研究对象, 用改变子绕组坐标尺寸来模拟各类变形形式。

图 4 中, 高低压绕组分别被分成 5 个部分, 区域 A1 ~ A5 和 A6 ~ A10 分别代表分区后的低压和高压绕组, 在加载电压时仍然分别把高低压绕组的各个部分耦合在一起, 即匝电势不变。通过改变各部分子绕组区域的尺寸模拟绕组变形, 并分别进行漏抗电压的仿真计算。结合漏抗电压计算结果和变形模拟的程度分析两者之间的关系, 为绕组变形在线监测中变形程度判据的研究提供理论依据。

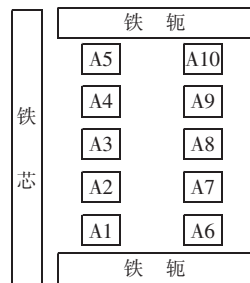


图4 绕组变形仿真模型及子绕组分区结果

Fig.4 Simulation model of winding deformation and its sub-windings

通常情况下, 绕组在轴向上受到压应力的作用, 尤其以靠近端部横向漏磁最大处受力最大; 而径向上受到张力作用, 尤以中部纵向漏磁最大处受力最大。这也符合“同向电流相吸, 异向电流相斥”的原理。

因此, 以常见的轴向压缩和径向伸张变形为研究内容。在模拟绕组变形形式时充分考虑绕组在漏磁场中的受力情况, 而不考虑其他的外界或人为造成的变形形式。如模拟轴向尺寸变化时, 由于绕组轴向上只受压应力作用, 对于轴向伸张的变形不做考虑; 而模拟径向尺寸变化时, 由于低压绕组紧靠铁芯, 且主要承受径向上近似垂直指向铁芯方向的电磁力, 而高压绕组受力方向相反, 因此只模拟相应的受力方向上的径向位移情况。而变形量值大小则根据实际的受力大小情况予以设置。漏抗电压的计算结果如表 1、2 所示。其中, 正常值为变压器绕组分区以后的计算结果。

从漏抗电压的计算结果可以得出:

a. 绕组有微小变形时, 漏抗电压变化量较小, 如轴向压缩变形小于 1% 时, 漏抗电压变化量小于 1%, 可能小于工程上的计算误差和测量系统误差, 但从变形尺寸上而言, 微小的变形量不会影响变压器的正常运行;

b. 当绕组变形量增加时, 漏抗电压的变化量有明显的增大, 可见绕组发生较严重的变形时, 漏抗电压的变化十分敏感, 因此漏抗电压变化量达到一定的量值时, 完全可以判断绕组已经发生了一定程度的变

表 1 模拟轴向尺寸变形的短路阻抗计算结果

Tab.1 Calculated short-circuit impedances of axial deformation simulation

模拟变形形式	对应子绕组尺寸变化量 (以总绕组高度为基准)	短路阻抗			%
		变形值	正常值	变化量	
低压绕组轴向 压缩变形	子绕组 A3 压缩 0.98	14.73	14.62	0.75	
	子绕组 A3 压缩 2.40	15.49		5.95	
	子绕组 A1 压缩 0.72	14.69		0.48	
	子绕组 A1 压缩 1.20	14.97		2.39	
高压绕组轴向 压缩变形	子绕组 A8 压缩 1.44	15.03	14.62	2.80	
	子绕组 A8 压缩 3.84	15.68		7.25	
	子绕组 A6 压缩 1.20	14.92		2.05	
	子绕组 A6 压缩 2.88	15.33		4.86	

表 2 模拟径向尺寸变形的短路阻抗计算结果

Tab.2 Calculated short-circuit impedances of radial deformation simulation

模拟变形形式	对应子绕组尺寸变化量 (以绕组截面宽度为基准)	短路阻抗			%
		变形值	正常值	变化量	
低压绕组径向 坍塌变形	子绕组 A3 左移 1.33	14.99	14.62	2.53	
	子绕组 A3 左移 3.33	15.87		8.54	
	子绕组 A5 左移 2.66	14.85		1.57	
	子绕组 A5 左移 5.33	15.11		3.28	
高压绕组径向 鼓包变形	子绕组 A8 右移 2.75	15.92	14.62	8.89	
	子绕组 A8 右移 4.41	16.73		14.43	
	子绕组 A10 右移 3.86	14.95		2.26	
	子绕组 A10 右移 6.61	16.20		10.81	

形,有利于绕组变形的在线监测;

c. 对于绕组的轴向压缩变形情况,端部变形量对于漏抗电压变化量的影响较小,而中部影响较大,原因是相对于绕组中部,绕组端部漏磁密度较小,受漏磁路空间尺寸变化的影响也相应较小,从漏磁场仿真结果可证明这一点,因此对于相同的绕组变形量,绕组中部位置尺寸变化导致的漏抗电压变化量较大;

d. 对绕组的径向位移变形情况,变形位置对漏抗电压变化量的影响与轴向压缩情况基本一致,但总体看,漏抗电压变化量对径向尺寸的变化更为敏感,可见径向位移的变化严重影响了漏磁高度集中的高低压绕组之间的漏磁路径,即在漏磁场能量计算时,变形导致式(5)的积分路径增量较为明显;

e. 所模拟的绕组变形形式均导致漏抗电压增大,可见凡是导致主漏磁空间增大的变形情况,漏抗电压参数的变化量均为正值,从传统的磁路法计算公式也可以说明这一点。

4 结论

以有限元理论为基础,对变压器的实际结构进行合理简化,通过改变绕组的几何尺寸和相对位置模拟绕组变形,仿真计算变压器绕组正常和变形后的漏感参数,并得出以下结论:

a. 基于有限元原理的仿真软件 ANSYS 可以计算变压器绕组漏感参数,计算结果与实际测量值相符合;

b. 变压器绕组变形时,计算得到的漏感参数是变化的,参数值的变化量与绕组变形的情况密切相关,因此,应用有限元软件 ANSYS 能模拟绕组变形,为变压器绕组变形的研究提供一定的理论分析依据;

c. 变压器绕组发生一定程度的变形时将导致漏感参数的变化,变形的严重程度可以通过漏感参数的变化量进行描述。

参考文献:

- [1] 金文龙,陈建华,李光范,等. 全国 110 kV 及以上等级电力变压器短路损坏事故统计分析[J]. 电网技术,1999,23(6):70-75.
JIN Wen-long, CHEN Jian-hua, LI Guang-fan, et al. Statistics and analysis on power transformer damages caused by short circuit fault in 110 kV and higher voltage classes[J]. Power System Technology, 1999, 23(6): 70-75.
- [2] LECH W, TYMINSKI L. Detecting transformer winding damage—the low voltage impulse method [J]. Electrical Review, 1966, 176(21): 768-772.
- [3] BENGTTSSON C. Status and trends in transformer monitoring[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3): 1379-1384.
- [4] 王钰,徐大可,李彦明. 检测变压器绕组变形的低压脉冲法测试系统研究[J]. 高电压技术,1998,24(3):24-28.
WANG Yu, XU Da-ke, LI Yan-ming. A study on instrumentation techniques in LVI method for detecting transformer winding [J]. High Voltage Engineering, 1998, 24(3): 24-28.
- [5] DICK E P, ERVEN C C. Transformer diagnostic testing by frequency response analysis[J]. IEEE Trans on PAS, 1978, 97(6): 2144-2153.
- [6] MALEWSKI R, POULIN B. Impulse testing of power transformers using the transfer function method [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(2): 476-489.
- [7] 曾刚远. 测量短路电抗是判断绕组变形的有效方法[J]. 变压器, 1998, 35(8): 13-17.
ZENG Gang-yuan. Measuring the short-circuit reactance—an effective method for judging the deformation of transformer windings[J]. Transformer, 1998, 35(8): 13-17.
- [8] 徐大可,汲盛昌,李彦明. 变压器绕组变形在线监测理论研究[J]. 高电压技术,2000,26(3):16-18.
XU Da-ke, JI Sheng-chang, LI Yan-ming. A theoretical research on on-line monitoring of winding deformation of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(3): 16-18.
- [9] 高仕斌,王果. 变压器绕组变形在线监测方法的改进[J]. 高电压技术,2002,28(9):31-33.
GAO Shi-bin, WANG Guo. Research on on-line monitoring of winding deformation of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(9): 31-33.
- [10] 王世山,李彦明. 电力变压器绕组电力的分析与计算[J]. 高压电器,2002,38(4):22-25.
WANG Shi-shan, LI Yan-ming. Computation of electrodynamic force on windings of power transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(4): 22-25.
- [11] 闫学勤,杜勇,梁岚珍. 基于 ANSYS 的电力变压器铁芯磁场与漏磁场分布的仿真研究[J]. 新疆大学学报,2005,22(3): 361-364.
YAN Xue-qin, DU Yong, LIANG Lan-zhen. Study on simulation of the core magnetic field and leakage field in power transformer based on ANSYS [J]. Journal of Xinjiang University, 2005, 22(3): 361-364.
- [12] 彭惠. 变压器漏磁场及箱体涡流损耗计算[D]. 北京:清华大学,2004.
PENG Hui. Computation of leakage magnetic field and tank eddy current loss of transformer[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [13] 张朝晖. ANSYS 工程应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [14] 刘传彝. 电力变压器设计计算方法与实践[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,2002.

- [15] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
[16] 王正茂,阎治安,崔新艺. 电机学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

李 朋(1979-),男,吉林磐石人,硕士研究生,从事电力

系统继电保护方面的研究(E-mail:lpsspeed@163.com);

郝治国(1976-),男,内蒙古鄂尔多斯人,讲师,博士,从事电力系统继电保护方面的研究;

张保会(1953-),男,河北魏县人,教授,博士研究生导师,长期从事电力系统安全自动化装置、继电保护、电力通信、电力系统稳定性方面的研究。

Leakage inductance calculation based on finite element method for power transformer and its application to winding deformation analysis

LI Peng¹,HAO Zhi-guo¹,ZHANG Bao-hui¹,CAO Rui-feng¹,CHU Yun-long²

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northwest China Grid Company, Xi'an 710048, China)

Abstract: The electromagnetic analysis and parameter calculation of power transformer are emphasized in scientific research and engineering application, while the winding deformation, which is the important cause of fault, is difficult to represent quantitatively. Based on finite element method, the ferrite core model and winding model are established using the finite element software ANSYS. The electromagnetic characteristic is analyzed using the magnetic-electric coupling method and the leakage inductance parameters of power transformer are calculated using energy method. As winding deformation causes leakage inductance change, the leakage inductances before and after different winding deformations are calculated by changing the physical dimensions of winding and the relation between winding deformation and leakage inductance change is studied. Comparisons between ANSYS simulative results and measurements show its correctness, effectiveness and practicability.

The project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50577050).

Key words: power transformer; finite element; ANSYS; short-circuit impedance; winding deformation

广 告 索 引

国电南京自动化股份有限公司 (封面)
北京四方继保自动化股份有限公司 ... (封二,前插 1)
欣灵电气股份有限公司 (前插 2,3)
南京南瑞集团公司 (前插 4)
魏德米勒电联接国际贸易(上海)有限公司
..... (前插 5)
南京浩昇科技有限公司 (前插 6)
上海安科瑞电气有限公司 (前插 7)
台湾四零四科技股份有限公司 (前插 8)
哈尔滨国力电气有限公司 (前插 9)
武汉高德红外技术有限公司 (前插 10)
广东中钰科技有限公司 (前插 11)
上海申瑞电力科技(集团)有限公司 ... (前插 11)
国电南京自动化股份有限公司 (前插 12,13)
上海艾莱恩斯电气有限公司 (前插 14,15)
南京南自电网控制技术有限公司 ... (前插 16)
福州凯(嘉)特电气有限公司 (前插 17)
重庆新世纪电气有限公司 (前插 18)
南京南瑞集团公司城乡电网自动化分公司 ... (前插 19)

河南省日立信电子有限公司 (前插 20)
上海蓝鸟机电有限公司 (前插 21)
万可电子(天津)有限公司 (前插 22)
施瓦哲工程实验(上海)有限公司 (前插 23)
硕方科技(北京)有限公司 (前插 24)
合肥阳光电源有限公司 (后插 1)
珠海派诺电子有限公司 (后插 2)
杭州中恒电气股份有限公司 (后插 3)
南京南自电力控制系统工程有限公司 ... (后插 4)
西门子电力自动化有限公司 (封三)
北京博电新力电力系统仪器有限公司 (封底)
深圳市三旺通信技术有限公司 (文前页)
湖北天瑞电子有限公司 (文后 1)
武汉高德光电有限公司 (文后 2)
深圳市信道科技有限公司 (文后 3)
深圳市英微特电子技术有限公司 (文后 3)
常州山泰克电子有限公司 (文后 4)
山西永明自动化设备有限公司 (目次页)