

# 基于 ANSYS 的电力变压器漏感参数计算 及其在绕组变形中的应用研究

李 朋<sup>1</sup>, 张保会<sup>1</sup>, 郝治国<sup>1</sup>, 褚云龙<sup>2</sup>

(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)

**摘 要:** 介绍大型有限元软件 ANSYS 在电力变压器电磁分析与参数计算中的应用; 针对电力变压器运行过程中发生绕组变形将会导致绕组漏感参数发生变化的基本特征, 本文提出利用有限元软件 ANSYS 对电力变压器铁心和绕组进行建模, 仿真计算变压器漏电感参数; 同时通过改变绕组的基本几何尺寸模拟绕组变形, 为电力变压器绕组变形在线监测的变型判据研究提供一定的理论基础。

**关键词:** 电力变压器; 绕组变形; ANSYS; 漏电感

## 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, 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<sup>[1]</sup>。

电力变压器绕组变形是指在电动力和机械力的作用下, 绕组的尺寸和形状发生不可逆的变化; 变形发生后, 有的立即发生损坏事故, 有的则可以继续运行, 运行时间的长短取决于变形的严重程度; 一旦变压器绕组发生严重变形而未被及时发现, 很有可能导致事故的发生, 对变压器本体及电网安全的危害很大。因此, 为了预知变压器健康隐患、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就具有重要意义。

近年来, 国内外提出并应用于现场的绕组变形诊断方法对于绕组变形程度的描述尚未量化。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, 通过在线检测变压器短路电抗变化来分析绕组健康状况的技术正逐渐得到重视<sup>[2-3]</sup>。本文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漏电感, 与普通磁路方法

计算结果比较表明仿真计算原理的实用性。同时提出建立变压器铁心绕组模型, 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 基于 ANSYS 软件的电力变压器电磁分析与漏电感参数计算原理

### 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 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, 这一方法可以称为场路耦合有限元法<sup>[4]</sup>, 如图 1 所示。场路耦合法的优点是在已知输入电压的条件下, 可以一次求解线圈区域的磁场分布和流过线圈的电流, 同时还可以求得负载端电压和电流。

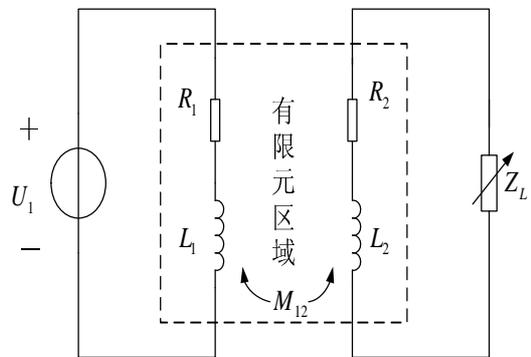


图 1 变压器的场路耦合模型

在 ANSYS 建模过程中, 有限元求解区域的自由度选取比较严格, 线圈区域选择动态矢量磁位  $\mathbf{A}$  和电流  $i$  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。由于原边考虑为载压线圈, 副边是通过电磁感应得到输出电压, 因此必须增加原边的电流  $i_1$ 、副边的电流  $i_2$ 、副边的感应电动势  $e_2$  为自由度; 另外, 副边是通过端部与负载相连接, 所以需要增加端电压  $u_2$  为自由度。在轴对称圆柱坐标系下, 矢量磁位  $\mathbf{A} = A_\alpha \boldsymbol{\alpha}$  的二维涡流场方程为:

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50577050)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu r} \frac{\partial (rA_\alpha)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu r} \frac{\partial (rA_\alpha)}{\partial z} \right) \\ \qquad \qquad \qquad = -\mathbf{J}_s + \sigma \frac{\partial A_\alpha}{\partial t} \\ \Gamma_1 : rA_\alpha = 0 \quad \Gamma_2 : \frac{1}{r} \frac{\partial (rA_\alpha)}{\partial n} = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中,  $\Gamma_1$  指模型的左边界,  $\Gamma_2$  指模型的其它边界。变压器原、副边区的电路方程为:

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

其中,  $e_1 = N_1 \frac{d}{dt} \int \mathbf{A}_1 \cdot d\mathbf{l}_1$  为原边感应电动势,

$e_2 = N_2 \frac{d}{dt} \int \mathbf{A}_2 \cdot d\mathbf{l}_2$  为副边的感应电动势,  $N_1$ 、

$N_2$  为原副边的匝数,  $i_1$ 、 $i_2$  为原副边的电流,

$R_{1\sigma}$ 、 $R_{2\sigma}$  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:

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

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,  $\mathbf{V}_0$  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, 即原边电流  $i_1(t)$ 、磁位  $A_1(t)$ , 副边电流  $i_2(t)$ 、磁位  $A_2(t)$ 、感应电动势  $e_2(t)$  和端电压  $u_2(t)$ 。而本文关心的是求解矢量磁位  $A_\alpha$ , 用于后续的变压器电感参数计算。

## 1.2 ANSYS 软件中变压器电感参数计算原理

电感是变压器绕组线圈的重要参数。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:

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

式中,  $B$  为介质内的磁感应强度, 通过有限元法可以求得;  $\mu$  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:

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

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:

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

当  $A_\alpha$  通过式(3)边值问题求得后, 各单元的磁感应强度  $B$  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  $W_m = \sum W_{m(i)}$ , 电感可通过式(4)获得。对于多线圈系统, 也可

以用该方法求出各自的自感和互感。

## 2 ANSYS 软件在变压器绕组变形中的应用

### 2.1 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  $\phi_m$  与绕组电流不是正比关系；但是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，并且漏感可用下式表示<sup>[5]</sup>，即

$$L = \frac{\phi_\delta}{i} = \frac{N(Ni\Lambda_\delta)}{i} = N^2\Lambda_\delta \quad (10)$$

式中  $N$  为线圈的匝数， $\Lambda_\delta$  为漏感磁通所经过磁路的磁导，即磁阻  $R_m$  的倒数，所以  $L$  与漏磁通所经过磁路的磁导  $\Lambda_\delta$  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， $\Lambda_\delta$  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，且漏感的大小不受铁心饱和程度的影响<sup>[6]</sup>。

因此，变压器原、副边绕组的漏电感参数只与绕组的几何尺寸及相对位置有关，当变压器绕组发生变形时，绕组的物理结构及相对位置发生了改变，漏电感参数也将发生变化。而相对于漏电感而言，变压器绕组的电阻值对温度更为敏感，受绕组形变量影响较小。

有限元 ANSYS 软件的最大优点就在于对模型的有限元计算区域的局部变化非常敏感，并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得研究目的。

### 2.2 电力变压器模型及漏电感参数计算

利用 ANSYS 软件进行建模，通过仿真计算绕组漏磁分布及磁场强度，求出原、副边绕组的电感  $L_1$ 、 $L_2$  和互感参数  $M_{12}$ 。本文以同心式简化双绕组变压器模型为例。在求出原、副边绕组自感及互感参数后，其漏电感参数可表示为：

$$L_{1\sigma} = L_1 - \frac{M_{12}^2}{L_2}, \quad L_{2\sigma} = L_2 - \frac{M_{12}^2}{L_1} \quad (9)$$

等效短路漏电感为：

$$L = L_1 - 2M'_{12} + L'_2 \quad (10)$$

其中  $M'_{12} = n^2 M_{12}$ ， $L'_2 = n^2 L_2$  均为原边侧

的归算值<sup>[7]</sup>。

## 3 变压器的数值仿真验证及绕组变形应用

### 3.1 变压器铁心绕组二维模型的数值仿真验证

为了验证基于 ANSYS 软件的变压器绕组变形仿真研究的可行性和正确性，本文首先对一台实际的单相变压器进行漏磁场分析，仿真计算变压器的重要参数短路漏电感。

变压器基本参数如表 1 所示。

表 1 变压器基本参数及绝缘数据

型号	SF9-240000/500 Kv
铁心直径	1530mm
高压线圈 (原边)	线圈匝数 480 匝， 线圈尺寸 2080mm×181.5mm。
低压线圈 (副边)	线圈匝数 31 匝， 线圈尺寸 2080mm×150mm
绝缘数据	高压线圈置于低压线圈的外侧，低压线圈与铁心间主绝缘距离为 30mm，高低压线圈间绝缘距离为 108mm，线圈到轭部间距为 120×20mm
电气参数	铜导线电阻率 $2.135 \times 10^{-8} (\Omega \cdot m)$ ，非铁磁物质的磁导率 $\mu_0$ ，硅钢片的磁导率 $20000 \mu_0$

根据以上参数，建立变压器漏磁场计算的简化模型并进行有限元剖分<sup>[8]</sup>。双绕组变压器漏磁场可通过二维轴对称场有限元来近似分析，从计算精度和后处理方面来看，采用四边形剖分可以保证计算结果与网格疏密程度无关，如图 2 和 3 所示。

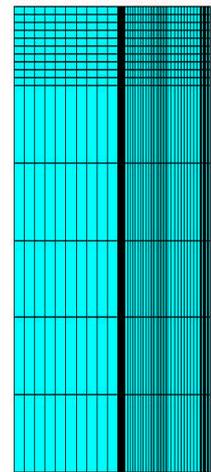
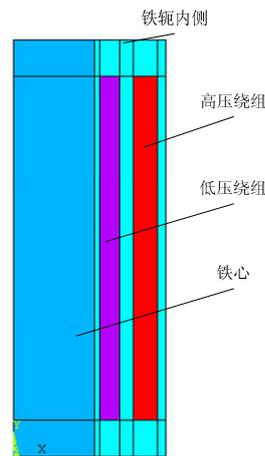


图 2 变压器 ANSYS 模型 图 3 四边形有限元剖分结果

在工频 50Hz 时，给原边线圈两端加载电压  $\dot{U} = 69859 \angle 0^\circ \text{ V}$ ，根据式 (3)，可以求出矢量磁位  $\mathbf{A}$ ，根据  $\mathbf{A}$  可以求出变压器的漏磁场分布，如图 4—6 所示。

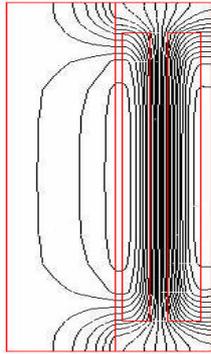


图4 变压器漏磁场仿真结果

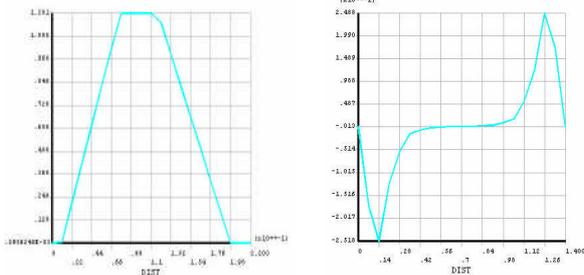


图5 变压器纵向漏磁分布 图6 变压器横向漏磁分布

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。等效短路漏电感仿真计算结果与传统磁路法<sup>[9]</sup>计算结果如表2所示。

表2 计算结果

计算方法	短路漏电感(H)	短路电压(%)
ANSYS	0.195	14.95
磁路法	0.181	16.35

### 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、幅向尺寸变化、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。因此在 ANSYS 中对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的模拟各种变形情况等因素。本文拟建立绕组变形仿真模型如图7所示。

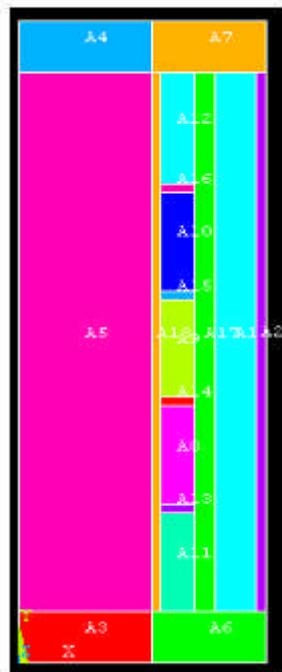


图7 圆形式变压器绕组变形仿真模型

以紧靠铁心的低压绕组为研究对象进行变形模拟。为了便于改变不同位置不同程度的尺寸变化, 该绕组被分为五个子绕组, 模拟绕组不同部位的轴向、幅向变形等。在此情况下, ANSYS 软件可以分别计算各子绕组的电感参数, 包括自感和互感, 再计算其等效漏电感。结合漏电感计算结果和变形模拟的程度来分析二者之间的关系, 以此达到量化绕组变形的目的。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。由于篇幅所限, 该研究工作本文不再详述。

## 4 结论

本文提出一种基于大型有限元软件 ANSYS 的电力变压器绕组参数计算及其在绕组变形仿真研究中的可行性应用。仿真计算结果表明:

- 1 基于 ANSYS 的变压器电磁特性分析和漏电感参数的计算与理论分析相符, 验证了 ANSYS 软件在变压器绕组变形分析中应用的可行性与正确性。
- 2 ANSYS 软件能够实现变压器实体建模及绕组漏电感参数的准确计算, 且模型的几何特征直观, 物理尺寸易于改变, 能够再现绕组变形的各种形式, 可以实现变压器绕组变形的仿真研究, 为绕组变形在线监测判据的研究提供参考。
- 3 由于 ANSYS 软件的分析计算功能强大, 结构复杂, 且电磁分析的建模过程对研究对象作了一定的简化, 因此计算存在一定的误差, 计算精度有待于进一步研究。

## 参考文献

- [1] 金文龙, 陈建华, 李光范, 王梦云. 全国 110kV 及以上等级电力变压器短路损坏事故统计分析. 电网技术, 1999, 23(6): 70-75.
- [2] 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. 2002, 26(3): 16-18.
- [3] 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.
- [4] 王世山, 王德林, 李彦明. 大型有限元软件 ANSYS 在电磁学科中的使用[J]. 高压电器. 2002, (6): 27-33.
- [5] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [6] 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.
- [7] Patrick BASTRAD, Pierre BERTRAND, Michel MEUNIER. A Transformer Model for Winding Fault Studies[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1994, 9(2): 690-699
- [8] 张朝晖. ANSYS 工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社. 2004.
- [9] 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.

---

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:

[lpspeed@stu.xjtu.edu.cn](mailto:lpspeed@stu.xjtu.edu.cn));

---

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;

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