

大电流互感器试验时的电磁耦合场分析

许加柱, 罗隆福, 李季, 尚荣艳

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

Analysis of Electromagnetic Coupling Field of Large Current Transformer under Testing Condition

XU Jia-zhu, LUO Long-fu, LI Ji, SHANG Rong-yan

(School of Electrical Engineering, Hu'nan University, Changsha 410082, China)

摘要: 目前,国内外对大电流互感器屏蔽绕组电流的计算还没有一个准确的计算公式,笔者用有限元法计算了屏蔽绕组中的电流,对仿真的结果和试验数据进行的比较说明,仿真结果是可靠的。

关键词: 电流互感器; 电磁耦合方法; 有限元法; 屏蔽绕组
中图分类号: TM452 **文献标识码:** A

Abstract: At present, calculation of current in shielding windings of large current transformer under testing condition doesn't have accurate formula yet in the world. In this paper, the current is calculated by finite element method. The results are proved to be reliable, compared with the testing results of large current transformer.

Key words: current transformer; electromagnetic coupling method; finite element method; shielding winding

1 引言

电力系统使用大量的电流互感器(CT)用于电能计量和电气测量,准确度通常为0.2级和0.5级。其中用于高压电能计量装置的CT现场检验的难度很大,特别是安装在变压器套管和封闭母线上的CT,几乎不可能在额定电流下检验。笔者研究的是15000/5A的大电流互感器,文[1]指出,用于大容量发电机组的大电流互感器一般不是单相运行的。在实际工程中,大电流互感器主要在三相电力系统中运行,其中B相互感器受到杂散磁通的影响最为严重,因此这里主要考察B相中屏蔽绕组的电流和铁心中的磁感应强度。如图1所示,屏蔽绕组 L_A, L_B, L_C 绕制在电流互感器的铁心上,用来屏蔽三相运行中相与相之间的杂散磁通的影响。为能达到一次侧的大电流所产生的安匝数,采用多匝线圈(共10匝)来代替一次侧导线,试验电流也就减小到一次侧额定电流的1/10。这

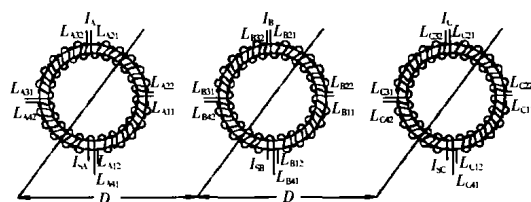


图1 三相运行电流互感器

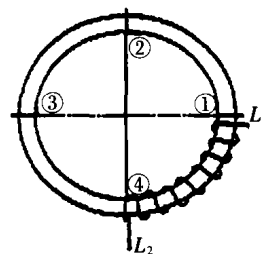


图2 试验模型

样,试验电流只有1500A,见图2。在这种情况下,由于一次侧线圈也束在电流互感器的铁心上,与一次侧绕组在同位置的屏蔽绕组电流会很大,所以一定要考查绕组的温升,以免屏蔽绕组被烧坏。

2 数学模型与耦合原理

2.1 磁场方程

电磁分析问题实际上是求解给定边界条件下的麦克斯韦方程组问题^[2],式(1)为磁矢势方程:

$$\text{rot}(\rho_m \text{rot } \mathbf{A}) = \mathbf{J} \quad (1)$$

式中: \mathbf{A} 为磁矢势; ρ_m 为磁阻率; \mathbf{J} 为电流密度。

式(1)也可以用式(2)来表示:

$$\mathbf{J} = -\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad } V \right) \quad (2)$$

式中: σ 为电导率; V 为电势。由于在试验条件下,大电流互感器的一、二次绕组均绕制在铁心上,在忽略集肤效应的条件下^[2],在一次绕组上通入试验电流,式(1)在求解区域内必须给定边界条件,然而方程的解并不一定是唯一的,只有通过库仑规范约束条件($A_n=0$)才能得到唯一解。 w 代表三维空间中的任意一个方向(x, y, z 3个方向)。

为了获得式(1)的解,用变分公式,在求解区域内可用以下方程计算:

$$\int_{\Omega} (\rho_m \text{rot} \mathbf{A} \cdot \text{rot} \mathbf{A} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{J}) d\Omega = 0 \quad (3)$$

式中: Ω 为求解区域。在求解式(3)时,首先将求解区域 Ω 进行离散化,互感器实体部分用六面体单元剖分,模拟空气部分为不规则体,用四面体单元剖分,单元图形见图3。

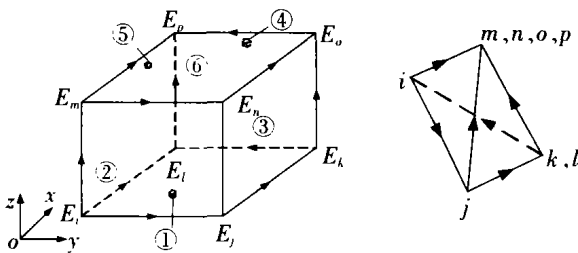


图3 六面体单元及退化形式

单元内部的磁矢势可用下式表示:

$$\mathbf{A}_e = \sum_{m=1}^{8(4)} u_m \mathbf{c}_m = [\mathbf{u}_e][\mathbf{c}_e] \quad (4)$$

$$u_m = (\lambda_i \text{grad} \lambda_j - \lambda_j \text{grad} \lambda_i)$$

式中: λ_i 和 λ_j 为节点 i, j 的质点坐标, c_m 为从节点 i 到节点 j ,并沿着单元边界线的矢量流量。

2.2 磁场与电路的耦合原理

考虑到大电流互感器的结构对称性,计算模型的有限元模型见图4(只建实体模型的一半),在ANSYS/MUTIPHYSICS模块中选用PLANE97单元作为求解单元,电路单元采用CIRCU124单元,用INFIN111单元来模拟无穷远。对电流互感器实体部分也用映射剖分方式,对空气用自由剖分。图4为铁心、二次线圈、屏蔽绕组和绝缘层的剖分图。图5为三维电路耦合绞线圈单元,其刚度矩阵方程为^[5]:

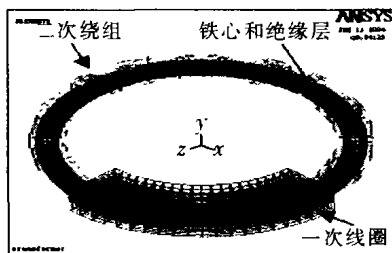


图4 互感器实体剖分图

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & s \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \\ i_k \\ e_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: s 为单元对称因子。将电路和电流互感器绕线圈部分的区域单元的自由度CURR(电流)和EMF(电动势)耦合在一起,CURR表示每匝线圈中的电流,EMF表示通过线圈终端的电动势。虽然这些自由是

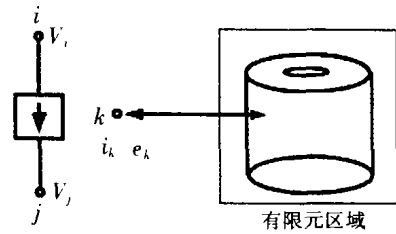


图5 三维电路耦合绞线圈单元

未知的,但却是唯一的,所以必须把有限元区域中线圈中所有节点的CURR自由度和EMF自由度都耦合起来。从线圈部分的区域单元中任取一节点 k 与外部电路相关联,最终计算出 k 点的自由度 i_k, e_k ,即代表了线圈部分的电流和电动势。在电路单元中,通过其实常数来确定15 000/5 A电流互感器二次绕组的负载大小,额定输出为150 V·A,功率因数为0.8(滞后),负载为电感性;根据公式^[4]: $S_N = I^2 Z$; $L = Z \times \sqrt{1 - 0.8^2} / 100 / \pi$; $R = Z \times 0.8$ 。铁心尺寸 $\phi 780 / \phi 875 \times 25$,二次绕组尺寸 $\phi 755 / \phi 900 \times 55$,二次绕组匝数3 000,屏蔽绕组分4段并联,每段240匝。

图6为互感器屏蔽绕组的布置图,试验中替代发电机组输出线的集中线圈绕制在 $L_{11} \sim L_{12}$ 之间。

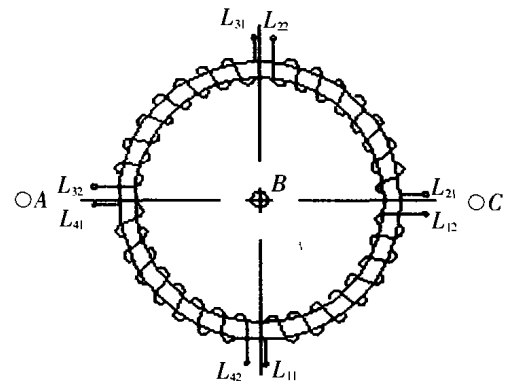


图6 屏蔽绕组分布图

场-路耦合离散的有限元方程^[5]为:

$$\begin{bmatrix} [0] & [0] & [0] \\ \mathbf{C}^A & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right] \\ [0] \\ [0] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}^{AA} & \mathbf{K}^{Ae} & [0] \\ [0] & \mathbf{K}^u & \mathbf{K}^{e} \\ [0] & [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{I} \\ \mathbf{E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] \\ \mathbf{U}_n \\ [0] \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: \mathbf{A} 为节点向量磁位矩阵; \mathbf{I} 为节点电流矩阵; \mathbf{E} 为节点电动势矩阵; \mathbf{K}^{AA} 为向量位刚度矩阵; \mathbf{K}^u 为电阻刚度矩阵; \mathbf{K}^{Ae} 为磁位-电流耦合刚度矩阵; \mathbf{C}^A 为电感阻尼矩阵; \mathbf{K}^e 为电流-电动势耦合刚度矩阵; \mathbf{U}_n 为外加电压矩阵。由于电流互感器不考虑外加电压,因此其为零矩阵。

加载一次侧电流密度后,通过式(3)和式(4)求解出有限元区域中每一个单元的矢量磁位 \mathbf{A} ,再根

据耦合单位刚度矩阵式(5),求解矩阵方程式(6),即可得到二次绕组、屏蔽绕组的电流及外部电路各节点的电动势。同样根据矢量磁位 A ,也可求出大电流互感器的磁场分布和损耗等。磁场强度可由公式(7)计算出:

$$B = \nabla \times A \quad (7)$$

3 计算结果与分析

15 000/5 A 大电流互感器是某厂最新产品。通过对仿真结果和试验结果比较,由表 1 可以看出,仿真结果与试验结果是相近的。试验过程中,绕组表面最高温升的测量值在 52~60 °C 之间,已满足 F 绝缘等级的温升要求。从图 7 中可以看到 B 相中 4 个屏蔽绕组中的电流密度分布情况。

表 1 B 相二次绕组、屏蔽绕组电流计算值和实测值的比较

	电流/A	
	计算值	实测值
二次绕组	4.66	5.00
屏蔽绕组 I	43.05	44.00
屏蔽绕组 II	12.69	10.50
屏蔽绕组 III	14.72	13.60
屏蔽绕组 IV	15.73	19.90

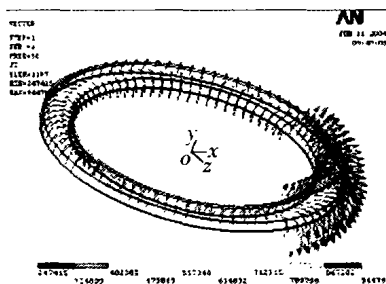


图 7 B 相屏蔽绕组中的电流密度分布

从表 1 中可以看出,一次线圈所在位置的屏蔽绕组的电流较其它 3 个屏蔽绕组的电流大,主要是因为一次线圈电流在其屏蔽绕组位置产生强磁感应强度,迫使其产生较大的电流以阻止一次线圈电流所产生的强磁场。由于铁心其它位置中的磁感应强度都没有一次线圈所在位置的铁心磁感应强度大,见图 8,所以相应的屏蔽绕组的电流也相对较小。试验中,4 段屏蔽绕组是并联的,一次线圈位置的屏蔽绕组电流为其它 3 个屏蔽绕组的电流矢量和。从表 1 可以看出,屏蔽绕组 IV 的电流误差比较大,这主要是

由试验测量过程的偶然误差导致的。根据铁心中的磁感应强度 B 的分布来看,除了一次线圈下的屏蔽绕组外,其它 3 个屏蔽绕组的电流大小应大致相同。总体来看,屏蔽绕组的仿真值和试验测量值还是很接近的。由于铁磁材料的相对导磁率是磁感应强度 B 的函数,因此在仿真时,首先定义电流互感器铁心的相对磁导率相同,为其在额定电流下的相对磁导率;计算完成后,查看铁心中的磁感应强度 B ,再对铁心的相对磁导率进行调整,再进行计算;直到相对磁导率与磁感应强度 B 满足 $B-\mu_r$ 函数,迭代停止。

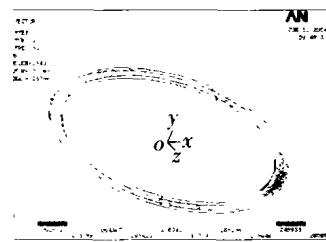


图 8 B 相铁心中的磁感应强度分布

4 结语

对于大电流互感器的模型试验,由于受到试验条件和试验设备的限制,无法对其进行三相试验,因此,15000/5 A 大电流互感器试验时的耦合场分析对大电流互感器的设计、制造和出厂试验都有一定的实用价值。模拟其各种试验方案,不仅能减少试验时间和经费,而且能预先发现潜在的问题。仿真结果和试验结果还存在一定的误差,这就需要对试验仿真模型进行进一步的优化和调整。

参考文献:

- [1] S Seely. Effect of Stray Flux on Current Transformers [J]. Journal of Science & Technology, 1970, 37(3): 115-120.
- [2] 金建铭. 电磁场有限元方法 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
- [3] Wang Jian-she. A Nodal Analysis for 2D and 3D Magnetic-circuit Coupled Problems [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1996, 32(3): 1 074-1 077.
- [4] 陈乔夫. 互感器电抗器的理论与计算 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992.
- [5] 刘志刚. 干式空心电抗器磁场和电感的计算分析 [J]. 高压电器, 2003, 39(3): 7-11.

作者简介: 许加柱(1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事现代电器设备的设计、优化及仿真研究工作。