

文章编号: 1001-1609(2007)06-0451-03

大型变压器屏蔽涡流场中杂散损耗的研究

杨素梅¹, 程志光², 朱晓荃¹, 胡启凡², 任晓鹏²

(1. 河北工业大学电气与自动化学院, 天津 300130; 2. 保定天威集团技术中心, 河北 保定 071056)

Investigation on the Stray-field Loss of Eddy Current Field by Adding Shielding in the Larger Transformer

YANG Su-mei¹, CHENG Zhi-guang², ZHU Xiao-quan¹, HU Qi-fan², REN Xiao-peng²

(1. Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. R & D Center, Baoding Tianwei Group, Baoding 071056, China)

摘要: 主要研究在大型变压器设计中如何通过加入磁屏蔽和电磁屏蔽结构来有效地减少杂散损耗,同时,为了简化结构并且还要切中杂散损耗的基本特征,建立了两组基于工程的基准屏蔽模型,这两组模型用来定量地研究通过加入屏蔽构件来有效地降低杂散损耗及模拟典型屏蔽的电磁行为,同时也可以验证使用的电磁分析方法的实用性和有效性。

关键词: 涡流; 磁滞; 各向异性; 硅钢迭片; 杂散损耗
中图分类号: TM401 文献标志码: A

Abstract: The paper aimed to how to effectively reduce the stray loss of the configuration by magnetic and/or electromagnetic shielding in larger transformer design. Two sets of engineering-oriented benchmark shielding models were built up in order to pinpoint the basic characteristics about the stray loss and simplified the configuration problem. The models were used to quantitatively investigate the effectiveness in reducing stray loss due to adding shielding configuration and simulate electromagnetic behavior of the typical shielding accordingly the applicability and practicality of electromagnetic analysis methods were validated.

Key words: eddy current; hysteresis; anisotropy; silicon steel lamination; stray-field loss

0 引言

大型变压器的设计中一方面需要把漏磁通引起的附加损耗控制在可接受的水平,另一方面又要防止在漏磁场中的金属部件形成局部过热点。从功率损耗和温升的观点看,应该主要研究处于绕组和通过大电流的导线和引线引起的漏磁场中的构件。主要有油箱、夹件、铁心及其上的金属件、拉板等。为了降低由漏磁通引起的损耗和温升,优化变压器的设计,通常采用下列几种方法:①选择合适的部件的结构和尺寸减少涡流损耗;②选择合适的结构部件的材料;③用磁屏蔽或电屏蔽的方式“阻止”或“转

移”漏磁通。笔者主要是以大型变压器的优化设计为工程背景,重点研究如何采取有效的屏蔽措施减少变压器的附加损耗,主要包括一些关键部件上的涡流损耗和磁滞损耗等。

1 模型的建立

设计大型变压器时,如果采用真实模型进行研究会使问题变得非常复杂甚至于得不到解决,于是对实际模型进行了简化,建立了两种面向工程的基准模型,机械尺寸见图1、2。

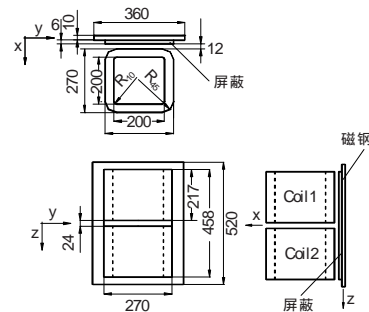


图1 整块屏蔽模型

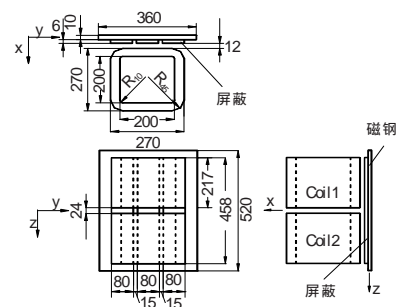


图2 分块屏蔽模型

笔者提出了两个电磁屏蔽模型^[1],即用铜板(厚6 mm)作为屏蔽构件的P21^c-EM1和P21^c-EM2模型。另外,还有两个磁屏蔽模型,命名为P21^c-M1和P21^c-M2,磁屏蔽构件由硅钢片材料迭积而成;模型

收稿日期: 2006-05-21; 修回日期: 2007-07-28

基金项目: 河北省自然科学基金重大项目(E2006-001036)。

作者简介: 杨素梅(1973-),女,讲师,博士研究生,主要研究方向为电工理论与新技术。

中下标 1 和 2 分别表示屏蔽材料的不同尺寸类型, 图 1 为整块屏蔽; 图 2 为分块屏蔽。

屏蔽基准模型的数据包括两部分: 应用于每个模型的激励源; 在不同子模型中被交变电流激励的不同类型的导体。

1.1 激励源

由两个相同尺寸、相同匝数的激励线圈组成, 在两个线圈中激励电流的方向相反, 每个线圈的匝数均为 300。激励电流额定值为 ±10 A(50 Hz)。

1.2 导体

(1) 导磁钢板(A₃ 钢)

钢板的厚度为 10 mm, 电导率为 6.484 ×10⁶ S/m, 密度为 7.8 ×10³ kg/m³, 各向同性。导磁钢的 B-H 和 W_h-B_m 曲线见文[2]。

(2) 硅钢迭片(30RGH120)

硅钢迭片的厚度为 0.3 mm/片, 最后形成的磁屏蔽构件是由 20 片迭积而成的迭片组成, 厚度为 6 mm; 电导率为 2.22 ×10⁶ S/m; 密度为 7.65 ×10³ kg/m³。对各向异性的硅钢片材料的 B-H 和 W_h-B_m 曲线, 考虑了迭片的轧制方向和垂直轧制方向, 由日本冈山大学的电力实验研究室测量并提供。

(3) 紫铜板

铜板的厚度为 6 mm; 电导率为 5.714 3 ×10⁷ S/m; 密度为 8.9 ×10³ kg/m³; 相对磁导率接近于 1。

2 数值分析的实现

2.1 数值分析方法

笔者已经开发了基于 A_r-V-A_r 位组方法的涡流分析程序, A_r 为用于整个求解区域的简化磁矢量位; 总磁矢量位 A=A_r+A_s, A_s 代表激励源的贡献, 具体的控制方程如下:

导体区域中, 有

$$\begin{aligned} \nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times (A_r + A_s) - \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot A_r \right) + \left(\frac{\partial A_r}{\partial t} + \frac{\partial A_s}{\partial t} + V \right) &= 0 \\ \nabla \cdot \left(- \frac{\partial A_r}{\partial t} - \frac{\partial A_s}{\partial t} - V \right) &= 0 \end{aligned}$$

非导体区域中, 有

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0} \nabla \times (A_r + A_s) - \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \cdot A_r \right) = J_s$$

以上控制方程中强加了库仑规范条件, 其中

$$\left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot A_r \right) \text{ 和 } \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot A_r \right) \text{ 为罚函数项, 为了强制满}$$

足零散度条件, 更进一步的研究表明罚函数项中的磁导率 μ 应该各向同性, 以确保有限元系数阵的对称性。一种简便的方法是取不同方向的(被考察点)局部磁导率的平均值。

基于 A_r-V-A_r 位组的涡流控制方程采用节点元有限元进行分析; 对于时间微分项的处理采用时步法或时谐法; 导磁钢板的非线性用时间周期有限元

法和准非线性法进行处理^[2, 3]。

2.2 各向异性的硅钢迭片的磁导率的处理

在磁屏蔽模型中, 硅钢迭片的厚度仅为 0.3 mm, 在大尺寸三维涡流场有限元分析中非常薄的有限元网格分层给计算带来很大的困难。同时, 单张硅钢片的特性与整体硅钢迭片屏蔽的特性是不同的。笔者使用了磁屏蔽的有效磁导率, 根据硅钢片与空气间的 B、H 的连续性条件, 考虑到硅钢片的导磁性能比空气高得多, 有效磁导率 μ_e、μ_h、μ_v 与对应的实测磁导率之间可有如下关系^[4]

$$\mu_e = \mu / (1 - C_f); \quad \mu_h = C_f \mu; \quad \mu_v = C_f \mu \quad (1)$$

式(1)中 C_f 为迭片系数; μ₀ 为真空磁导率。

2.3 磁滞损耗计算

导磁钢板和硅钢迭片中的磁滞损耗在总损耗中占有相当的比例, 所以分析中必须予以考虑, 针对要解决的工程磁滞损耗问题提出了一种实际可行的方法^[3, 5], 即磁滞损耗 W_h 被认为是磁通密度峰值 B_m 的函数, 对于指定材料的 W_h-B_m 曲线可以事先测量, 如同 B-H 曲线一样。基于磁场的分析结果磁滞损耗 W_h 可以由式(2)计算

$$W_h = \sum_{e=1}^{N_e} W_h^{(e)}(B_m^{(e)}) V^{(e)} \quad (2)$$

式(2)中 W_h^(e) 为单元磁滞损耗, W/kg; B_m^(e) 为磁密的峰值; ρ 为钢板密度; V^(e) 为单元体积; N_e 为单元总数。

3 磁密和损耗的测量

对 TEAM 模型中指定位置的磁通密度使用高斯计进行测量, 在导磁钢板和模型的屏蔽板中产生的总损耗使用宽带功率分析仪进行了测量^[6]。

4 结果分析

4.1 磁通及涡流的分布

作为计算和测量结果的一部分, 位于 P21^c 模型中钢板两侧(x=±5.76 mm)的 B_x 的分布见图 3, 可以看到, 测量值和计算值有较好的吻合。

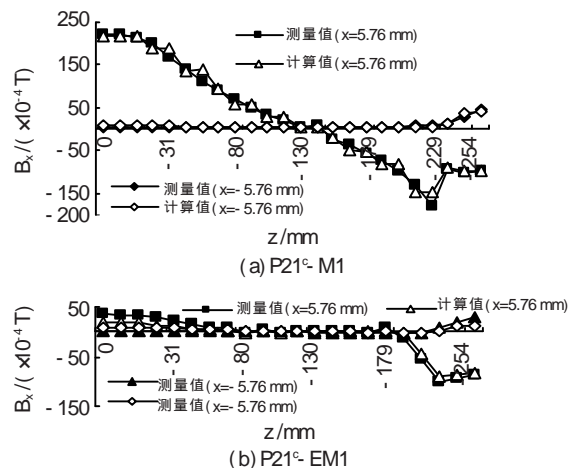


图 3 P21^c-M1 和 P21^c-EM1 模型中 B_x 的分布(y=0.0 mm)

为了更为形象清楚地模拟屏蔽基准模型的涡流分布,还使用了 OPERA 电磁场分析软件进行了仿真分析,结果见图 4。

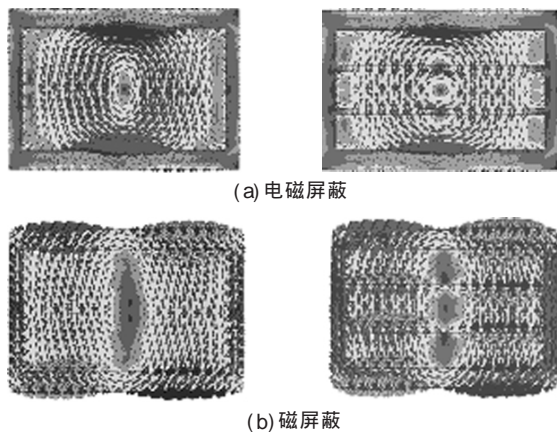


图 4 电磁与磁屏蔽模型的+X方向的涡流分布

4.2 杂散损耗分析结果

屏蔽基准模型相关的损耗分析结果见表 1, 总结如下:

(1) 损耗结果的比较表明磁屏蔽中损耗的减少优于在电磁屏蔽中。当然, 这并不意味着在其它场合中不使用电磁屏蔽。

(2) P21^c-EM2 损耗大于 P21^c-EM1, 由于在 P21^c-EM2 中 3 块分离开的铜板的屏蔽效果低于由一整块铜板组成的 P21^c-EM1 的屏蔽效果, 因此, 在 P21^c-EM2 情况下, 有更多磁通穿透进入钢板中, 并在其中产生很大的涡流。

(3) 对比之下, P21^c-M1 产生的损耗大于 P21^c-M2, 原因是晶粒取向的硅钢 (30RGH120) 的磁导率比普通导磁钢(A₃) 高得多, 大部分磁通穿越硅钢迭片而不是普通钢板, 且 P21^c-M1 的体积比 P21^c-M2 的要大。

(4) 在迭片组中产生的涡流基本上是二维流动, 不可能从一个硅钢片流向另一片, 因此, 在硅钢迭片中产生的功率损耗仅考虑钢片两个方向中的损耗。

(5) 笔者获得的参考测试结果表明, 在磁屏蔽中产生的功率损耗主要集中在离激励线圈最近的硅钢迭片(组)中, 例如仅仅在该屏蔽中第 1 和第 2 个迭片中。更进一步的分析得知由穿透到薄迭片组层的垂直方向的磁通产生的涡流是总损耗的主要部分。

根据表 1 和表 2 的数据绘制图表见图 5、6。

表 1 杂散损耗中的成分分析

模型	导磁钢板	屏蔽件	涡流	磁滞
P21-B	12.31	0	8.22	4.09
P21 ^c -EM1	5.17	10.85	14.52	1.50
P21 ^c -EM2	10.73	9.29	17.64	2.38
P21 ^c -M1	1.75	2.43	3.47	0.71
P21 ^c -M2	2.32	0.83	2.25	0.90

表 2 各屏蔽模型中的总损耗

模型	计算值/W	测量值/W
P21-B	12.65	12.32
P21 ^c -EM1	15.24	16.02
P21 ^c -EM2	20.07	20.02
P21 ^c -M1	3.72	4.18
P21 ^c -M2	2.64	3.15

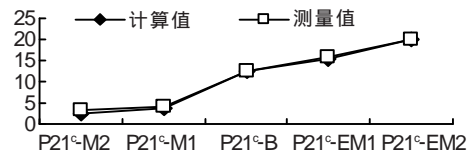


图 5 模型的总损耗(计算值和测量值)

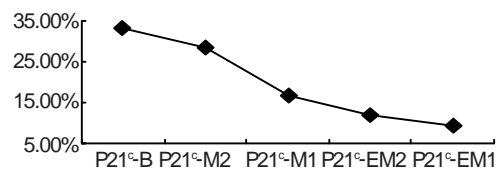


图 6 模型中磁滞损耗占总损耗的比例

5 结语

笔者对面向工程的基准屏蔽模型 P21^c 的铁磁非线性、各向异性及磁滞特性的电磁行为进行了计算分析, 另外还根据测得的材料 W_h-B_m 曲线进行了磁滞损耗的计算。根据得到的结果总结如下

(1) 为材料的非线性、各向异性、磁滞及硅钢迭片结构及磁滞损耗的计算提供了有效的数值分析法。

(2) 对 P21^c 基准屏蔽模型的屏蔽效果进行了比较, 这有助于电力变压器的优化设计。

(3) 结果表明与电磁屏蔽相比较, 采用磁屏蔽可以使整个基准屏蔽模型的总的杂散损耗大大降低。

参考文献:

- [1] CHENG Z, TAKAHASHI N, YANG S, et al. Proposal of Problem 21-based Shielding Model [C]// Shenyang: Proc. of TEAM. Workshop, 2005: 15-16.
- [2] TAKAHASHI N, SAKURA T, CHENG Z. Nonlinear Analysis of Eddy Current and Hysteresis Losses of 3-D Stray Field Loss Model (Problem 21)[J]. IEEE Trans. on Magn., 2001, 37(5): 3 672-3 675.
- [3] User Guides and Reference Manuals, OPERA V10.5 [Z]. Vector Fields, UK.
- [4] CHENG Z, TAKAHASHI N, YANG S, et al. Loss Spectrum and Electromagnetic Behavior of Problem 21 Family [J]. IEEE Tans. on Magn., 2006, 42(4): 1 467-1 470.
- [5] TAKAHASHI N, FUJIWARA K, TAKEHARA J. Basic Study on Characteristics of Magnetic Shielding and Electromagnetic Shielding[C]// Software for Electrical Engineering Analysis and Design V, Wessex Institute of Technology, WITpress, 2001: 79-86.
- [6] 程志光, 高生, 李琳. 电气工程涡流问题的分析与验证 [M]. 北京: 高教出版社, 2001.