

电力变压器附加损耗计算及影响因素分析

郭 健¹, 林鹤云¹, 徐子宏², 金承祥², 李 宁²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 中电电气集团, 江苏 扬中 212211)

摘要: 为了准确计算并抑制变压器的附加损耗,笔者提出了计算电力变压器附加损耗的涡流场分析方法,对两种型号的油浸式变压器的涡流以及附加损耗分布进行了计算。在涡流场的计算中,通过对铁心材料磁导率和电导率各向异性的处理来等效铁心片之间的叠积效果。文中给出了各主要金属构件中的涡流以及涡流损耗的分布,并对影响附加损耗的几个因素进行了分析。结果表明:结构件采用非导磁材料;适当的调整各结构件之间的尺寸以及采用中部出线的分接类型都可以有效地降低附加损耗。最后,对多种型号的变压器附加损耗进行了试验验证,计算与试验数据吻合很好。

关键词: 变压器; 附加损耗; 棱单元; 涡流

中图分类号: TM41

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)06-0551-04

Calculation and Analysis of Additional Loss in Power Transformer

GUO Jian¹, LIN He-yun¹, XU Zi-hong², JIN Cheng-xiang², LI Ning²

(1. College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Zhongdian Electric Group, Yangzhong 212211, China)

Abstract: This paper presents an eddy current field calculation method of additional loss in transformer based on 3D finite element analysis in order to accurately calculate and control the additional loss. The distributions of eddy current and additional loss in a transformer were calculated. In the calculation of eddy current field, the permeability and conductivity of core material were disposed to be anisotropic to equivalent to the lamination effect of core plates. In the post-processing of leakage field, the distributions of eddy current and eddy current loss were gained, and several factors that affect additional loss were studied. The result shows that additional loss can be effectively reduced by taking non-magnetic materials as structure, adjusting the distance among structures, and using the tapping type of middle wiring. Furthermore, the additional losses of various types of transformers were tested, and the calculation results agreed well with the experimental data.

Key words: transformer; additional loss; edge element; eddy current

0 引言

电力变压器的附加损耗是绕组、铁心、结构件等导电材料在交变的漏磁场中产生的涡流引起的。其大小对变压器的制造成本和运行经济性都有较大的影响^[1]。随着变压器单机容量的日益增大,其损耗和由此诱发的局部过热问题也愈加突出,因此对于变压器附加损耗分布的准确计算和附加损耗抑制方法的研究具有十分重要的工程价值。

变压器附加损耗的计算是变压器设计中一个很困难的问题,目前设计人员大多还是沿用过去的解析公式、半经验公式来计算损耗,而不考虑其分布情况,这在一定程度上可以满足工程的需求,但是对于新产品的研发及性能的优化上就具有一定的局限

性^[2]。鉴于此,国内外学者纷纷采用有限元数值方法来计算变压器的杂散损耗^[3]。如文[4-9]采用三维有限元的数值方法对变压器外壳、夹件涡流损耗进行了计算,并提出了通过磁屏蔽和电屏蔽的方法来控制外壳涡流损耗大小;文[10-12]采用三维表面阻抗法计算了铁心拉板的损耗,并比较了拉板在不同的开槽模式的情况下损耗的大小。文[13]对铁心边的涡流损耗进行了计算。上述成果都是集中在变压器附加损耗中的单组份计算和控制上,由于各附加损耗组份并没有直接的测试手段,需要通过测试绝热条件下的温升来反算损耗,但是一般的工厂试验条件并不能完全满足绝热状态,因此其计算结果与试验之间的误差不能准确地估计。文[14]采用二维有限元的方法进行附加损耗的计算,但是在二维模型中铁心的叠积效果无法等效,同时拉板的存在将会

收稿日期:2007-12-05; 修回日期:2008-06-23

作者简介:郭 健(1980-),男,博士研究生,从事电力变压器物理场计算的研究。

改变漏磁场的分布,导致损耗的计算偏离实际。

笔者建立了三维涡流场模型,计算了漏磁场在各结构件中的涡流及其涡流损耗分布,并分析了其分布的特点。在此基础上,提出了结构件的材料、结构尺寸以及不同的绕组分接类型对变压器各损耗组份和总附加损耗的影响。最后,通过试验对文中的计算方法进行了验证。

1 漏磁场有限元模型

1.1 漏磁场边值问题

在变压器绕组分接采用中部出线和不分级绝缘的情况下,三维漏磁场可取结构的 1/8 建立模型,否则取 1/4 模型。1/8 模型见图 1。

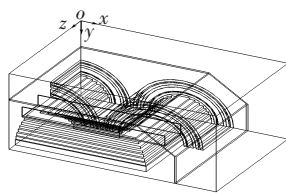


图 1 变压器 1/8 有限元模型

采用 A-V 法求解漏磁场的边值问题可以用式(1)~(4)表示。其中,涡流区(包括铁心边、夹件、油箱)

$$\begin{cases} \nabla \times [\mu]^{-1} \nabla \times A + [\sigma] \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) = 0 \\ \nabla \cdot ([\sigma] \left(-\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla V \right)) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

非涡流区(忽略弱磁的绕组,空气)

$$\nabla \times [\mu]^{-1} \nabla \times A = \begin{cases} J_h \\ 0 \\ J_l \end{cases} \quad (2)$$

边界条件为

$$n \times A = 0 \quad S_{\Omega} - S_{xoy}; \quad n \cdot A = 0 \quad S_{xoy} \quad (3)$$

式(1)~(3)中, S_{Ω} 为求解域的外边界; S_{xoy} 为上下对称面; μ 为磁导率; σ 为电导率; J_h 、 J_l 分别为高、低压绕组电流密度。

1.2 铁心材料属性的确定

为了等效铁心的叠积效果和对不同角度进入铁心的磁通的弱磁效果,可以通过设置铁心材料的各向异性来满足,铁心的等效电导率和磁导率满足下式^[15]

$$\sigma = \begin{bmatrix} k_0 \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_0 \sigma \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mu = \begin{bmatrix} (1-k_0)\mu_0 + k_0\mu_x & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{k_0}{\mu_y} + \frac{1-k_0}{\mu_0} \right)^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & (1-k_0)\mu_0 + k_0\mu_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(4)、(5)中, k_0 为铁心的叠积系数; μ_x 、 μ_y 、 μ_z 为硅钢

片材料 3 个方向的磁导率。笔者忽略导磁材料磁性能的非线性,按线性来处理。这是因为漏磁场中的磁场能量主要集中在不导磁区域,导磁材料为磁通提供了一个短接通路,在其非饱和的工作区域内磁导率的变化对空间的漏磁场影响不大。在磁密很小的情况下,导磁材料中磁滞损耗所占的比例很小,因此可忽略铁心硅钢片和各金属结构件材料的磁滞特性以及磁滞损耗。

2 损耗计算方法

2.1 绕组涡流损耗

由于绕组材料属于非导磁材料,同时导线线规在辐向的宽度很小,在工频情况下磁场的透入深度要大于绕组的尺寸,因此从绕组涡流对漏磁场的反作用来说,将绕组归化为非涡流区域的处理是合理的。在漏磁场计算的后处理中,可以通过平板导体损耗计算方法求取绕组导线的涡流损耗

$$p_e = \frac{\pi^2 f^2 (aB_z)^2}{6\rho} \quad (6)$$

$$p_i = 8 \times \sum_{j=1}^{N_E} p_e \Delta V_j \quad (7)$$

式(6)、(7)中, p_e 为单元涡流损耗密度; a 为导线幅向宽度; ρ 为绕组的电阻率; N_E 为绕组区域单元总数; ΔV_j 为各单元的体积; p_i 为将各单元损耗求和得到的绕组总涡流损耗。

2.2 夹件、拉板及外壳涡流损耗

对于涡流区域的损耗可以在漏磁场的后处理中通过式(8)求得各单元的涡流,然后根据式(9)得到涡流损耗。

$$J_e = -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) \quad (8)$$

$$p_e = \frac{\rho}{2} J_e \cdot J_e^* \quad (9)$$

式(8)、(9)中, J_e 为电流密度; V 为标量电位。

涡流区的总损耗按式(10)计算

$$p_i = 8 \times k_a \sum_{j=1}^{N_E} p_e \Delta V_j \quad (10)$$

式(10)中, N_E 为涡流区域单元总数; k_a 表示涡流损耗的修正系数,对于常规变压器 $k_a=1$,对于低电压、大电流类型的变压器,通过实验发现 k_a 满足 $(k \times P / 1000)^2$ 的函数关系,其中 P 表示变压器额定容量, $kV \cdot A$, k 为与生产工艺有关的系数,在文中计算取值为 $k=3.16$ 。

3 涡流场及涡流损耗分布

笔者以一台型号为 SRN-M2500/34.5 油浸变压器为例进行了漏磁场分析。图 2~4 为变压器中各

结构件的涡流以及损耗的分布。可以看出:当漏磁通从铁心片叠积方向进入铁心时,将在铁心片内产生涡流,涡流主要集中在与低压绕组端部相应的高度,此处的涡流损耗亦比较高。这与文[12]分析得到的拉板涡流及其损耗分布特点一致。外壳的涡流及其损耗的分布受到透入深度的影响,主要集中在内表面上跟电抗高度对应的范围内,因此在采用电屏蔽减小油箱的涡流损耗时,屏蔽的高度应超过绕组总高度并尽可能高一些,否则漏磁通会绕过屏蔽进入油箱壁中,从而降低屏蔽的效果。对于铁轭夹件的涡流及其损耗主要集中在与高低压绕组端部对应的面上,这是由于此处的漏磁场强度比较大;同时,从此处进入的磁通会沿着夹件进入铁心轭部叠片内,从而导致铁心轭部区域损耗有所增加。

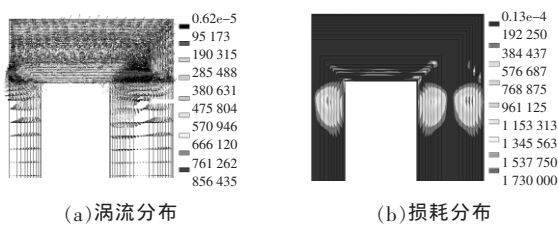


图2 铁心涡流及损耗分布

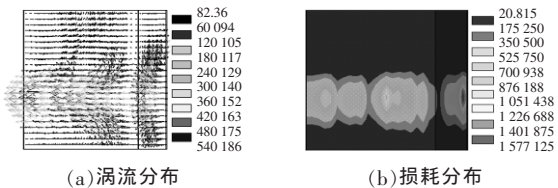


图3 油箱内表面涡流及损耗分布

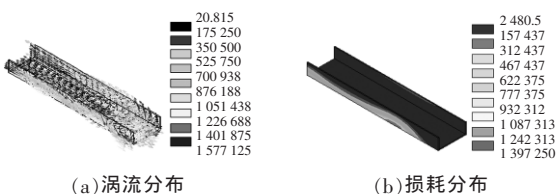


图4 夹件涡流及损耗分布

4 杂散损耗影响因素分析

传统的变压器附加损耗主要是以其中某一结构件为研究对象进行分析并采用相应的方法来抑制损耗,这样,这些结构件中的损耗将会明显减小。但是,它将影响漏磁场的分布并可能导致其它结构件中的附加损耗增加,甚至还会产生局部过热^[2]。究竟是利是弊,需要通过一种抑制方案对总附加损耗和各损耗组份的降低效果进行比较。笔者从结构件材料、结构尺寸、分接类型3个方面研究其对变压器附加损耗及其各损耗组份的影响。

4.1 结构件材料对杂散损耗的影响

表1列出了结构件分别选用导磁钢和非导磁钢

的情况下对附加损耗的影响。可以看出,当结构件选用非导磁钢时,总的附加损耗显著降低,这个时候绕组和铁心边中的涡流损耗基本不变,而结构件中的损耗受导磁率和电阻率的影响,下降明显。

表1 不同材料对附加损耗的影响

结构件材料	总附加损耗/%	绕组涡流损耗/%	外壳损耗/%	铁心边损耗/%	夹件损耗/%
导磁钢	100.00	3.52	24.02	56.31	16.15
非导磁钢	72.48	3.52	6.39	56.58	5.99

4.2 结构尺寸对杂散损耗的影响

图5为各结构件间的尺寸参数图,其中 a 表示夹件到铁心的距离, b 表示高低压绕组间的电抗高度差, c 表示高压绕组到外壳的绝缘距离。通过选取不同的参数值,可以得到图6所示的不同结构尺寸对附加损耗组份的影响规律。可以看出: a 增加,会减小从夹件进入铁心的磁通,从而可以减小铁心和夹件中的涡流损耗; b 对附加损耗的影响最大,随着 b 的增加,总的附加损耗亦增加,这是因为 b 增加会使高低压绕组之间的辐向不平衡安匝增大,从而会增加进入油箱的辐向漏磁通,导致油箱损耗的增加; c 增加,会增加磁回路的磁阻,从而减小穿过油箱的漏磁通,附加损耗将被减小。

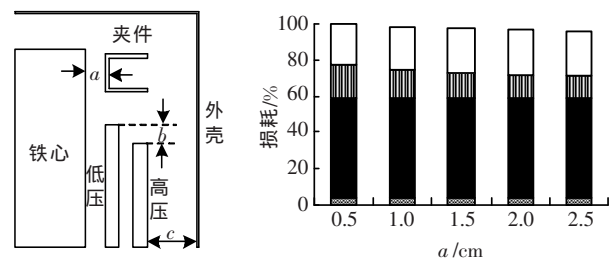


图5 可变尺寸示意图

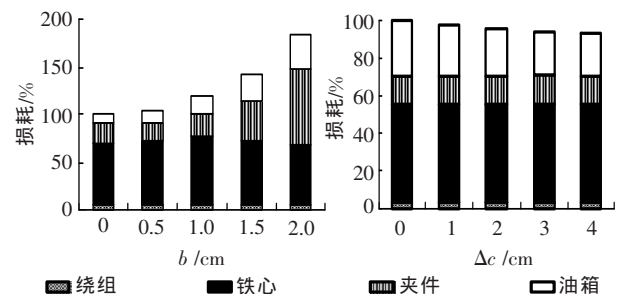


图6 不同尺寸对附加损耗的影响

4.3 分接类型对杂散损耗的影响

表2列出了不同额定分接类型时附加损耗及其各损耗组份所占的比例。可以看出,在选用中部出线分接类型时,附加损耗降低,这是由于中部出线轴向不平衡安匝数要小于端部出线,辐向漏磁通得到削弱,同时,负载损耗降低。因此在大容量的变压器中,高压层式绕组应尽量选用中部出线的分接类型。

表 2 附加损耗与分接类型的关系

分接类型	总附加损耗/%	绕组涡流损耗/%	外壳损耗/%	铁心边损耗/%	夹件损耗/%
端部出线	100.00	2.30	46.07	38.26	13.37
中部出线	71.37	2.30	18.59	38.04	12.44

笔者还分析了其它型号变压器的附加损耗和影响损耗的因素,研究表明其与SRN-M2500/34.5变压器具有相同的规律,只是在量值上稍有区别。

5 实验结果

笔者对变压器的负载损耗进行了试验,三相双绕组变压器的负载损耗测量原理见图7,电压和电流以三相仪表读数的算术平均值为准。负载损耗测量完成后,可以通过式(11)得到参考温度为75℃时的总附加损耗。

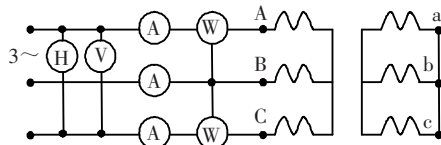


图 7 负载损耗试验原理接线图

$$P_{a75} = P_{k75} - 1.5 \times (I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2) \quad (11)$$

式(11)中, P_{k75} 为75℃时的负载损耗; I_1 、 I_2 为高、低压绕组额定电流; R_1 、 R_2 为75℃时候高、低压绕组的线电阻。

表3列出了变压器附加损耗的计算值与试验测量数据。从表中可以看出,变压器总附加损耗的计算结果与实验数据吻合很好。

表 3 计算数据及试验结果

变压器型号	损耗组份/W					P_{a75} /W		
	绕组	铁心	夹件	外壳	拉板	计算	实验	误差/%
SRN-800/10	218	170	79	542		1 009	1 020	1.18
SRN-2500/34.5	241	3 853	1 105	1 644		6 843	7 277	5.96
S9-6300/35	1 658	589	142	493	75	2 958	3 196	7.43
S9-20000/35	9 033	6 525	671	4 760	612	21 601	21 903	1.37
SF9-25000/35	7 329	3 396	244	2 141	357	13 467	13 019	3.44

6 结语

笔者采用三维有限元法对电力变压器的涡流场以及附加损耗分布进行了分析计算,其中,通过对铁心材料磁导率和电导率各向异性的处理来等效铁心片之间的叠积效果。文中分析了变压器涡流及损耗分布的特点:对于铁心和拉板,最大的涡流损耗主要集中在在低压绕组端部相应的高度处;对于夹件,最大的损耗发生在与绕组端部对应的外表面上;而对于外壳,损耗主要集中在与绕组电抗高度对应的区域。

通过对影响附加损耗的几个因素进行研究,发现结构件采用非导磁材料,适当的调整各结构件之间的尺寸以及采用中部出线的分接类型都可以有效地降低附加损耗。最后,对多种型号的变压器附加损耗进行了试验验证,计算与试验数据很好地吻合。

参考文献:

- [1] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [3] KULKARNI S V, KHAPARDE S A. Stray Loss Evaluation in Power Transformers—a Review [C]// Power Engineering Society Winter Meeting, 2000: 2 269-2 274.
- [4] 李季, 罗隆福. 电力机车主变压器油箱损耗的三维有限元分析[J]. 高压电器, 2005, 41(3): 186-188.
- [5] ERICH S, PETER H. Design Optimization of Power Transformers, Part 2—eddy Current Analyses for Tank Wall and Core Clamping Parts [C]// International Conference On Power System Technology, 2004: 1 375-1 380.
- [6] ERICH S, PETER H. Finite Element Calculation of Eddy Current Losses in the Tank Wall of Power Transformers [C]// Electric Machines and Drives Conference, 2003: 1 167-1 173.
- [7] XIE D X, TANG Y Q, XU Z H. FEM Analysis of 3D Eddy Current Field in Power Transformer [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1987, 23(5): 3 786-3 788.
- [8] TANG R Y, LI Y. Resultant Magnetic Fields Due to Both Windings and Heavy Current Leads in Large Power Transformers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(3): 1 641-1 644.
- [9] HOLLAND S A, OCONNELL G P, SANDERS H W. Calculating Stray Losses in Power Transformers Using Surface Impedance with Finite Elements [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28(2): 1 355-1 358.
- [10] KOPPIKAR D A, KULKARNI S V. Evaluation of Flitch Plate Losses in Power Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 996-1 001.
- [11] 李琳, 崔翔. 电力变压器三维漏磁场及铁心拉板涡流损耗的计算[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 33-36.
- [12] 许加柱, 罗隆福. 电力机车主变压器的三维漏磁场与夹板涡流损耗计算和优化[J]. 变压器, 2006, 43(9): 1-5.
- [13] CARPENTER C J. Theory of Flux Penetration into Laminated Iron and Associated Losses [J]. Proc IEE, 1977, 124(7): 659-664.
- [14] PAVLIK D, JOHNSON D C. Calculation and Reduction of Stray and Eddy Losses in Core-form Transformers Using a Highly Accurate Finite Element Modelling Technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(1): 239-245.
- [15] VIVIANE C S, GERARD M. A 3-D Finite-element Computation of Eddy Currents and Losses in Laminated Iron Cores Allowing for Electric and Magnetic Anisotropy [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(3): 2 139-2 141.