

混合绝缘液浸电力变压器的热-流耦合场分析及绝缘和散热器结构的改进

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: 由于传统的变压器温升计算公式不再适用于混合绝缘结构的液浸式新型电力变压器设计, 为此笔者采用传热学和流体力学原理建立了变压器热流耦合场的有限元模型, 模型中考虑了变压器油热力学参数的非线性和绕组结构中垫块、纸筒对散热的影响, 并根据不同的绕组形式进行单元离散。通过对混合绝缘结构的液浸式变压器热-流耦合问题的求解, 得到了变压器内部各点的温度和流场分布状况, 高低压绕组平均温升与试验结果吻合。结合计算和试验结果对变压器的绝缘材料进行了改进, 充分发挥了材料的耐高温特性和经济性。最后, 提出了通过升高散热器进出口的高度差来达到降低变压器热点温升的有效方法。

关键词: 变压器; 热流耦合场; 温度场; 混合绝缘

中图分类号: TM41

文献标识码: A

文章编号: 1001-1609(2008)02-0122-04

Analysis of Thermal-fluid Coupled Field for Fluid-immersed Power Transformer with Hybrid Insulation System and Improvement of Its Insulation and Radiator Structures

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: Because the traditional calculation method of transformer temperature rise is not suitable for the design of fluid-immersed power transformer with hybrid insulation system, this paper built a finite element model of thermal-fluid coupled field for power transformer based on the heat transfer theory and fluid dynamics. The thermodynamic parameter nonlinearity of transformer oil and the effects of bearings and fiber containers in winding construction on heat radiation were considered in this model. Moreover, unit discretization was conducted according to different winding forms. The temperature and flow distributions at different spots in transformer were achieved by the thermal-fluid coupled method, and the results show excellent agreement with experimental ones. The insulation material of transformer was also improved according to computation and measurement results. At last, a method to reduce temperature rise of thermal wall is proposed by expanding the height difference between exit and inlet of radiator.

Key words: transformer; thermal-fluid coupled field; temperature field; hybrid insulation system

0 引言

混合绝缘结构液浸式电力变压器除了满足客户对传统电力变压器的基本要求外, 还在安全、环保、防火可靠性、耐高温方面作了很大的改进^[1-3]。这种变压器与传统变压器最大的差别在于设计中合理考虑了变压器内温度场的实际情况, 按照温度分布合理使用不同耐高温等级的绝缘材料, 构成一个混合

绝缘系统。另外耐高温的难燃 beta 液取代常规变压器油作为绝缘介质和散热媒介, 提高了耐高温能力。对这种新型变压器的发热散热过程进行研究, 掌握其内部温度场的分布规律, 可以指导不同等级绝缘材料的选用, 充分发挥材料的耐高温特性并提高经济性。

传统方法中变压器温升的计算公式是通过热路的方法和大量实验数据总结得到的, 由于绝缘系统的改变, 它已不再能满足混合绝缘结构液浸式变压器设计的要求, 因此通过仿真技术对其温度场和流场进行数值模拟, 掌握温度分布和变压器液的流动

收稿日期: 2007-08-06; 修回日期: 2007-12-26

基金项目: 2005 年江苏省科技攻关项目 (BE2005086)。

作者简介: 郭 健 (1980-), 男, 山西省洪洞县人, 博士研究生, 主要研究方向电力变压器物理场计算。

规律,结合试验结果确定温升的计算对于其电磁设计十分重要。在变压器温度场的计算方面,文[4-6]分别采用传热学理论对油浸风冷变压器和干式变压器温度场进行了数值模拟;文[7,8]建立了电缆式变压器绕组的二维有限元模型,采用了流体动力学理论对其进行了温度场分析。目前,对于耐高温混合绝缘液浸变压器的温升计算仍然以长期由实际运行系统获取的经验数据为常规手段,缺少较为深入的理论研究。

笔者以流体的边界层厚度和绕组轴对称结构为依据对绕组模型进行了二维简化,并以整个层式绕组或线饼为单元进行离散,建立了混合绝缘结构液浸式变压器热-流耦合的温度场模型,控制方程中考虑了流体的物性参数随温度变化的特性,以此求得了高、低压绕组在额定电流下相对于油的平均温升以及各点温度和气流分布。与工厂计算值比较,基于热-流耦合的有限元计算结果更接近于实验数据,最后提出了通过增加散热器进出口的高度差来达到降低油温升,进而降低绕组热点温度的有效措施。

1 热-流耦合场有限元模型

1.1 计算模型的确定

变压器内部温度场是一个三维空间分布的物理场,由于绕组的散热是在变压器油对流层中完成,而对流层的厚度约为3mm^[9],绕组间的绝缘距离要大于对流层的厚度,因此相间绕组的发热相互影响不大,故可将三相的问题简化为单相,而每一相绕组又沿轴对称,这样在计算绕组相对于油的温升时就可以将三维的温度场分布转化为二维轴对称温度场来计算,见图1,笔者对该模型的合理性已进行了验证。

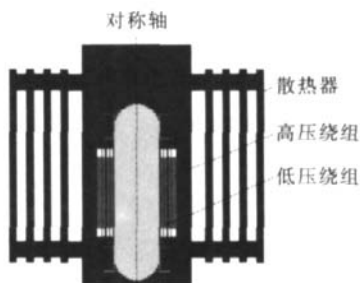


图1 温度场有限元模型

根据油的对流层厚度,在发热不变的情况下,绕组相对于油的温升将有一个确定的数值和分布,而要最终确定绕组的温度还需要知道油相对于环境的温升,笔者采用文[9,10]提到的方法对油温进行计算。油相对于环境的温升与变压器外壳散热面以及安装结构有关,为了研究外壳的结构对油温升的影响,在轴对称模型中增加了散热器模型,尽管散热器

在结构上形式多样并且在空间上也不满足二维等效,但这并不影响对降低油温规律性问题的探讨。

对于高低压绕组模型,若以绕组线匝和匝间绝缘进行剖分和离散,单元的数目一定很多,离散方程组的阶数很高,一般计算机将无法解算。鉴于此,根据绕组类型进行不同的离散,若为层式绕组,则以整个绕组建立模型;若为饼式绕组,则以每个线饼为单元建立模型。在绕组中的传热只存在传导方式,因此离散后单元的传导率采用铜导线和匝间绝缘合成的热导率^[10]。

1.2 热-流耦合的边值问题

油浸变压器内部固体区域发热、散热满足傅里叶热传导方程,油流换热过程受流体质量、动量、能量守恒定律的共同支配,由于液体属于不可压缩流,故在能量方程中忽略粘性耗散分量,同时,发热固体和运动流体在交界面上满足相容性条件,热-流耦合的边值问题为(x 为径向, y 为轴向)^[11,12]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) &= q && \text{在固体区域内} \\ \frac{\partial}{\partial x} x + \frac{\partial}{\partial y} y &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} x x + \frac{\partial}{\partial y} y y &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu \frac{\partial x}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu \frac{\partial x}{\partial y}) \\ \frac{\partial}{\partial x} x y + \frac{\partial}{\partial y} y y &= g_r \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu \frac{\partial y}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu \frac{\partial y}{\partial y}) \\ \frac{\partial}{\partial x} x c T + \frac{\partial}{\partial y} y c T &= \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) && (1) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &&& \text{在流体区域内} \\ k(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y}) &= a(T - T_1) + (T^4 - T_1^4) && \text{在外壳边界上} \\ x = y = 0 &&& \text{在流固交界上} \end{aligned}$$

式(1)中, T 为流体温度; k 为传导系数; q 为单位体积发热量; ρ 为流体密度; x, y 为流体速度的 x, y 分量; μ 为运动粘性系数; P 为流体压力; g 为重力加速度(y 方向); T_1 为环境温度; c 为流体比热容; a 为外壳表面对流散热系数; σ 为Stefan-boltzmann常数; ϵ 为外壳表面辐射率。

为了考虑撑条、纸筒对绕组散热面积的影响,笔者借鉴经验公式,引入了单位面积热负荷 p ,由于撑条、纸筒在绕组上都是沿轴向均匀布置,因此引入热负荷的概念并不会影响温升沿轴向高度的分布。热负荷根据绕组的的不同形式通过文[9]的方法求得,从而有限元模型中绕组的单位体积发热量为

$$q = \frac{\rho x(a+b)}{a \times b} \quad (2)$$

式(2)中 a 为绕组电抗高度; b 为绕组径向厚度。

1.3 外壳对流散热系数确定和辐射散热的处理

分析油浸变压器外部空间的自然对流问题,需

要已知变压器外壳的对流散热系数或热流密度作为边界条件。油浸变压器外壳周围的对流散热属于自然对流换热问题,其换热系数满足如下的准则方程^[13]

$$Nu=C(Gr \cdot pr)^n \quad (3)$$

式(3)中 Nu、Gr 和 pr 分别为努谢尔数、格拉夫数和普朗特数。

格拉夫数 Gr 为

$$Gr=\frac{g \cdot \beta \cdot T \cdot l^3}{\nu^2} \quad (4)$$

式(4)中 β 为流体的容积膨胀系数; T 为流体与壁面的温差,恒取正值;l 为定形尺寸。普朗特数 $pr=\frac{\mu k}{\rho c_p}$, k 为流体的导热系数,在温度变化不太大时 pr 约为 0.7。

对于油浸变压器系统,当对流形态为层流时(由 Gr·pr 的范围决定),参数 C 和 n 作如下的选择^[14]: 顶部 C=0.54, n=0.25; 底面 C=0.27, n=0.25; 侧面及散热器表面 C=0.508, n=0.25。从而可以根据外壳表面与大气间的温度差来确定其表面的对流换热系数。

在进行流场-温度场耦合分析时,加载了变压器外壳向周围空间的辐射,由于外壳进行了涂灰漆处理,其表面的黑度为 0.95^[9]。

2 计算结果分析

笔者对一台 SRN11- M- 800/10 混合绝缘结构液浸式变压器进行了热流耦合场分析。该型变压器采用了难燃油、耐高温固体绝缘材料 NOMEX(匝间、端部绝缘)和常规的纤维素绝缘材料(纸筒)组成了混合绝缘系统,高、低压绕组采用层式绕组且各绕组中都有一个纵向油道,为了增加油箱散热面积,左右各安装了 4 组散热片,图 1 是其热-流耦合场计算的有限元模型。通过计算求得了额定电流下变压器内部的温度场和流场的分布,见图 2(a)、(b)。beta 液受热上升,越靠近上端部,油温越高,绕组为了保持发热散热平衡,其热点温升将随着油温向上移动,最大的热点温升出现在绕组上端部区域,见图 2(a)。而在高压绕组的外表面,由于油流不受油道尺寸的影响,所以流速较大,最大流速出现在 2/3 高度区域,见图 2(b)。

SRN11- M- 800/10 变压器设计初期,采用普通油浸变压器的工厂公式进行了铜油温升的计算,计算数值见表 1(环境温度为 40)。考虑到 beta 液的粘度要大于变压器油,在 beta 液中的铜油温升将比在变压器油中的高,从安全余度考虑,采用了 NOMEX 纸进行绕组的匝间及其端部绝缘。产品成型后的温升实验表明,即便采用变压器油,高压绕组温

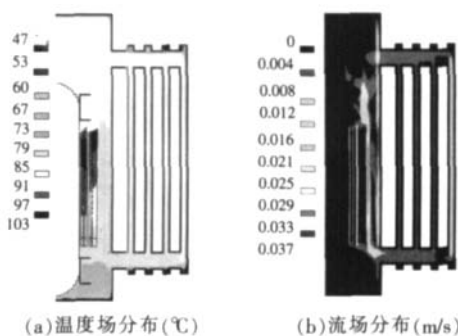


图 2 温度场、流场分布图

升的工厂计算结果仍然高出实测值 10K,而通过有限元方法得到的铜油温升数值与实验数据比较吻合。

表 1 变压器温升实验值与计算值的比较

	油温升/K	铜油温升/K	
		高压绕组	低压绕组
热流耦合计算值		16.1	14.8
工厂计算值	37.0	25.0	20.0
实验值	37.7	15.7	15.0

3 绝缘和散热结构的改进

3.1 绝缘结构的改进

绕组温度沿轴向高度的分布见图 3,与文[9, 10]提到的分布规律相吻合。可以看出,环境温度在最高气温 40 时,热点温度不超过 105 ,而 NOMEX 纸的耐热等级为 H 级,最高温度可达到 180 ^[15],选用 NOMEX 纸并不经济,一般的耐热等级为 105 限值的绝缘材料即可满足温升要求。因此,可以只在绕组的上部 1/4 处(区域 I)采用 NOMEX 纸进行匝间及端部的绝缘,而在其余部分(区域 II)选用常规的纤维素绝缘材料。这种局部混合绝缘系统即能够充分发挥材料的耐高温特性,同时又有良好的经济性。

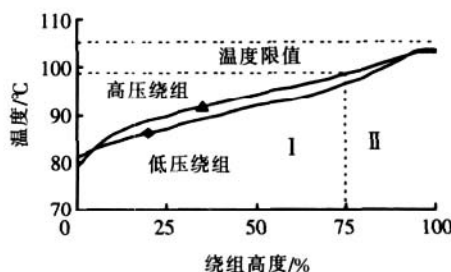


图 3 绕组轴向温度分布

3.2 散热器进出口尺寸的改进

将散热器的进出口高度差分别增加 0.1、0.2、0.3 m 后,油的平均温升减小值随电流变化的曲线见图 4。可以看出,增加进出口的高度差,油的温度将下降,并且随着负载率的增加,油温减小的幅度也在加大。

图 5 是增加散热器的进出口高度后,额定电流

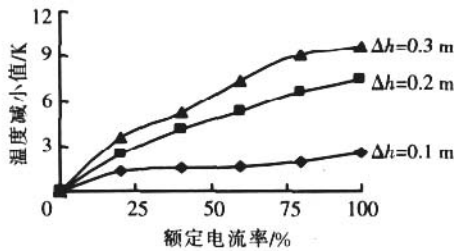


图4 散热器进出口高度对油温的影响

下变压器温度场及流场的分布。相对于没有增加前(图2),其流速增加,热点温度下降,这是因为增加散热器的进出口高度差后,在器身发热相同的条件下,可增加作用在冷却回路的浮力,提高回路中油的流动速度,从而降低了器身的热点温度。

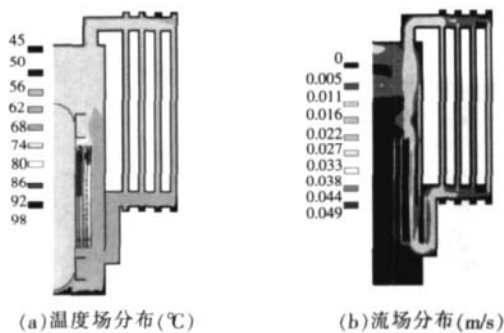


图5 改进结构后温度场、流场分布图

4 结语

笔者根据变压器油边界层的厚度和绕组的轴对称结构建立了热-流耦合的变压器温度场计算模型,模型中考虑了变压器油的物性参数随温度变化的特性和垫块、纸筒等绝缘材料对绕组散热的影响,并对不同形式绕组的离散进行了说明,使得计算得以简化。通过对SRN11-M-800/10混合绝缘结构液浸式变压器的计算与实测比较,证明了热-流耦合场计算模型的合理性。计算表明:高压绕组外表面的

2/3高度区域对流比较强烈,热点温升出现在绕组的上端部,通过增加散热器进出口的高度差可以明显降低其热点温升。

参考文献:

- [1] 贺以燕,郭振岩.不燃油和难燃油及其变压器的发展[J].变压器,2000,37(8):4-7.
- [2] 徐子宏,王强,徐文多,等.耐高温液浸式变压器及技术[C]//第5届输配电技术国际会议,2005:1058-1061.
- [3] 侯盈,鱼振民,彭国平.浅谈Beta Fluid高燃点油浸变压器[J].变压器,2003(8):16-19.
- [4] HWANG M D, GRADY W M, SANDERS H W. Calculation of Winding Temperatures in Distribution Transformers Subjected to Harmonic Currents [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1988, 3(3): 1074-1079.
- [5] 丛龙飞.油浸风冷变压器温度场的数值模拟[J].变压器,2003,40(5):1-6.
- [6] 陈世省.树脂浇注干式变压器绕组最热点位置的分析[J].变压器,2002,39(9):8-12.
- [7] 傅晨钊.变压器绕组温度场的二维数值计算[J].高电压技术,2002,28(5):10-12.
- [8] 傅晨钊.电缆变压器绕组温度场的二维数值计算[J].电工电能新技术,2002,21(4):46-50.
- [9] 谢毓城.电力变压器手册[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [10] 尹克宁.变压器设计原理[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [11] 休斯 W F, 布赖顿 J A(美).流体力学[M].徐燕侯,译.北京:科学出版社,2002.
- [12] 杨濯根.流体力学有限元[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1995.
- [13] 杨世铭,陶文铨.传热学(第3版)[M].北京:高等教育出版社,1998.
- [14] LEFEVRE A, MIEGEVILLE L, FOULADGAR J, et al. 3-D Computation of Transformers Overheating under Nonlinear Loads [J]. IEEE Trans on Magnetics, 2005, 41(5): 1564-1567.
- [15] 王秀春,杨增军.自然冷却高燃点油变压器温升计算方法[J].中国电机工程学报,2004,24(7):223-226.

(上接第121页)

3 结语

通过上述对比分析,可以看到,三元乙丙橡胶具有优良的力学性能、耐热老化性能、耐低温性能和耐臭氧性能,仅仅是耐受不了矿物油,应作为GIS密封圈的首选。在密封部位涉及到矿物油时,应该首选丁腈橡胶,其次可以选用氯丁橡胶。如果密封部位虽接触油但不是矿物油,则也不必选用丁腈橡胶或氯丁橡胶,仍可以选用三元乙丙橡胶。在密封状

态下,若O形圈不接触空气和臭氧,则不必将丁腈橡胶耐臭氧性能较差视为缺点。

最后有必要指出,上述对比分析特别是在各性能中的优劣或强弱排序不是绝对的,一些性能可以通过调整配方进行改善。另外,同一类橡胶,其常用品种有数十种之多,不同合成橡胶厂家的产品性能有相当大的不同,这也给橡胶配方提供了变更空间,从而能在一定范围内满足GIS厂家的特殊要求。