

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.06.028

基于 Fluent 的超高压变压器二维温度场分析

汪德华, 杨春, 王革鹏, 韩晓东

(西安西电变压器有限责任公司, 西安 710077)

摘要: 建立了一台 500 kV 超高压油浸式变压器的二维模型, 基于 ANSYS Fluent 软件, 采用 Laminar 层流模型对其进行二维定常层流计算, 获得了变压器温度场分布及热点位置, 并研究了绕组端部角环位置对变压器油热性能的影响。经过实际对比发现, 计算结果和相关试验值吻合很好, 从而为今后超高压变压器的设计、研发和试验提供了重要依据, 这表明利用 Fluent 软件对超高压变压器的数值计算和性能分析可以应用于工程实践中。

关键词: 超高压油浸式变压器; ANSYS Fluent; 温度场; 热点位置

Analysis of Two-dimensional Temperature Field in Ultra-high Voltage Transformer Based on Fluent

WANG Dehua, YANG Chun, WANG Gepeng, HAN Xiaodong

(Xi'an XD Transformer Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: A 2D model of 500 kV ultra-high voltage oil-immersed transformer is built. The two-dimensional steady laminar flow in the model is simulated using the Laminar model based on the software Ansys Fluent, and the temperature distributions and the position of hot spot within the transformer are obtained. The position effect of the angle rings at winding end on the thermal property of oil is analyzed. Simulation results are consistent with the experimental ones, which infers that the numerical simulation method on the basis of ANSYS Fluent is applicable to temperature field analysis of ultra-high voltage transformers. This study may provide a tool for design, research and development, and test of ultra-high voltage transformers.

Key words: ultra-high voltage oil-immersed transformer; ANSYS fluent; temperature field; hot spot position

0 引言

温升直接关系到变压器的使用寿命和运行安全, 其中热点温升是衡量变压器设计优劣和评价其热性能的重要技术指标。变压器在温升过程中温度分布不均, 热点温度是其中具有代表性的确定变压器最优化负载的重要参数^[1]。长期以来油浸式电力变压器热设计都是基于对经验公式的估算, 关注的是油的平均温升, 无法全面准确地反映绕组的温度分布, 不能预判绕组的热点位置。国外 ABB、Luxtron 等公司开发了基于光纤技术的热点温度计, 如 ABB 的 FT1010 型热点温度计、Luxtron 公司的 WTS 系列热点温度计^[2]。近年来, 光纤测温已经应用于变压器温升试验中, 它可以较准确地测出绕组的温度值, 但是事先无法预估热点位置, 传感器埋设处不一定是

绕组的最热点^[3]。有限元流体分析软件在变压器温升计算分析中的应用, 可以为绕组热点位置的确定提供依据。

FLUENT、STAR-CD 与 CFX-TASCflow 堪称目前 CFD(计算流体动力学)主流商业软件, FLUENT 的市场占有率达 40%左右, 显然是应用面最广、影响最大的 CFD 软件^[4]。FLUENT 云图技术可以清晰展示变压器绕组内部各点流场和温度场的分布情况, 尤其是变压器绕组温度场分布效果图可为光纤测量变压器绕组热点温度提供定位依据^[5]。

文中以一台 500 kV、167 MV·A、自冷超高压电力变压器为例, 基于传热学和流体力学的原理, 利用 ANSYS Fluent 软件仿真计算了该变压器二维的温度场和流体速度矢量场的分布, 得到绕组的温度场分布, 并对比了端部角环位置的差异对变压器温升的影响, 研究了角环位置对变压器油热性能的影响。

收稿日期:2014-12-22; 修回日期:2015-01-23

最后与试验值进行对比,结果表明利用 ANSYS Fluent 软件满足了工程上的需要,为变压器的设计、研发和试验提供了依据。

1 变压器绕组的热源和传热分析

变压器在运行时,作为变压器电路和磁路的主要组成部分,即绕组、铁心、引线及钢结构件(漏磁的磁路)是主要热源。这些部件在伴随电磁能量转换过程中,要产生损耗,这些损耗全部转化为热量,其中绕组是变压器内部的最主要的热源^[6]。

低压和高压绕组的发热主要由两部分损耗产生:直流电阻产生的损耗和漏磁通引起的损耗。假设绕组是唯一的发热源,且单位时间单位体积的发热量为常数,传热系数均匀。高低压绕组的发热部分为铜导线所在的部分。热源密度可由式(1)求得

$$q_v = P/V. \quad (1)$$

式(1)中: q_v 为热源密度, W/m^3 ; P 为变压器的损耗, W ; V 为热源的体积, m^3 。对于绝缘部分,设 $q_v=0$ 。

变压器绕组的散热主要是对流换热。变压器内的热环境是流固耦合的复杂的传热过程。

变压器油在散热器里冷却时靠重力向下流动,流进油箱底部时靠热浮升力油流向上流动,如此循环^[7-8]。浸式变压器大部分是采用自然油循环的冷却方式,该方式依靠油箱的辐射和空气的自然对流将热量从油箱的冷却表面带走^[9]。

为了改善变压器冷却效果,目前多采用在绕组中设置导向挡板,利用导向结构驱动油的流动,以降低绕组对油的温升,从而降低绕组热点温度^[10-13]。

2 求解的微分方程和边界条件

首先对变压器绕组温度场进行假设:

- 1) 稳态:发热与散热达到平衡时,绕组及油的温度和速度分布不再随时间变化;
- 2) 常数:固体的密度、比热及导热系数,油的动力粘度、密度、比热均恒定;
- 3) 热源密度为常数;
- 4) 环境温度恒定。

在以上条件的假设下,为了获得导热物体温度场的数学表达式,必须根据能量守恒定律和傅里叶定律来建立导热微分方程^[14]。

该变压器绕组的温度场的导热方程为

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0. \quad (2)$$

绕组绝缘层温度场的导热方程为

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0. \quad (3)$$

式(2)-(3)中: q_v 为内热源密度,即单位时间单位体积所发出的热量; λ 为材料的导热系数。

导热微分方程及相应的定解条件构成一个导热问题的完整的数学描述,文中研究的是稳态温度场,定解条件中无需初始条件,仅有边界条件,具有对流换热的边界是典型的第3类边界条件,即

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(t_w - t_f). \quad (4)$$

式(4)中: λ 为材料的导热系数; n 为法方向,即换热表面的外法线; h 为综合换热系数; t_w 为壁面温度; t_f 为周围流体介质的温度。

当物体壁面与流体接触进行对流换热时,Fluent 求解器根据绕组结构特点和周围流体特征,计算出任意时刻绕组界面和周围油表面的综合传热系数^[15]。

温度场的计算过程是个反复迭代的过程,Fluent 求解器在边界条件、物性参数(导热系数、密度、比热等)等初始化之后就对网格节点进行求解。求解器里的控制方程离散化后,把方程组转化成封闭的代数方程组,然后迭代求解各网格节点上的函数值,直至满足一定的精度要求,最终收敛。

3 算例分析

3.1 有限元分析的物理模型

利用 Fluent 软件对一台 500 kV、167 MV·A、自冷的超高压电力变压器高中绕组额定运行时的温度场及流场进行了分析计算。变压器结构呈几何对称分布,可将三维模型转化为二维轴对称的温度场和流场计算,以提高运算效率。该模型不考虑铁心和构件对绕组温度的影响,由于绕组幅向尺寸相对于变压器的轴向尺寸小得多,可以近似绕组沿圆周方向完全呈几何对称分布^[6],即变压器温度场的分布沿变压器圆周方向没有梯度变化,这样的模型易于计算且能更好地收敛。等效的变压器结构轴截面见图1,图1中对称轴为 x 轴,上部为高压绕组,下部为低压绕组,左边为绕组的端部,右边为绕组的底部。

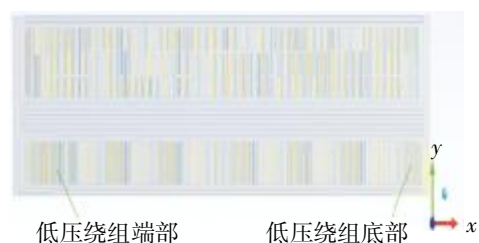


图1 变压器二维轴对称计算模型图
Two dimension axisymmetric transformer model for CFD simulation

电力变压器绕组区域通常采用的冷却油道结

构^[17-18]。在高、低压绕组区的油道内,变压器油从底部流入,在入口侧垂直油道内反复分流,经过水平油道后再反复汇流到达出口^[19]。

为了研究端部角环位置的差异对变压器温升的影响,建立模型 A、B。图 2、3 分别为计算模型 A、B 的局部放大图,模型 A、B 的区别为:低压绕组端部绝缘内、外角环放置顺序不同。其中模型 A 沿线饼高度方向(二维模型中从右到左为沿高度方向)角环是先外后内放置,见图 2;而模型 B 角环为先内后外放置,见图 3。

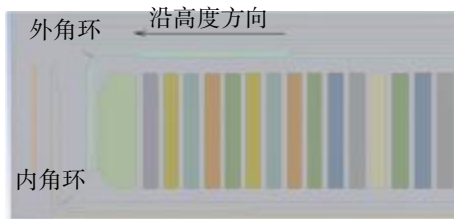


图 2 计算模型 A 局部放大图

Fig. 2 The detail of model A

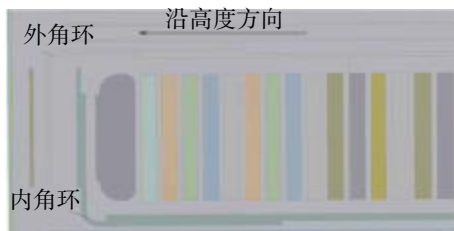


图 3 计算模型 B 局部放大图

Fig. 3 The detail of model B

3.2 温度场与流场分析

3.2.1 温度场分析

图 4、5 为模型 A、B 的温度场云图,单位为 K,入口温度设置为 310 K。

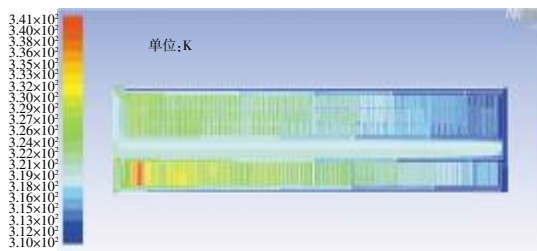


图 4 模型 A 温度场云图

Fig. 4 Temperature field distribution of mode A

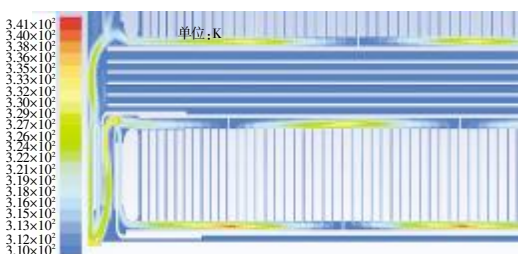


图 5 模型 B 温度场云图

Fig. 5 Temperature field distribution of mode B

从图 4、5 可以看出,变压器高低压绕组温度分布不均匀,下部温度低,上部温度高;绕组的最低温度在整个绕组的底端,最高温度在整个绕组的上半部分,由传热学理论分析可知,热量从绕组内部通过传导的方式传递到外表面,然后和变压器油进行热量交换。变压器油受热后温度升高,体积膨胀,自然油流的循环动力是浮升力,热浮升力使得油沿着油道向上流动,流动过程中受粘性和壁面摩擦的影响,越靠近壁面流体速度越来越小,在壁面处被凝滞不动,形成换热薄层;流体继续往上流动,由于壁面粘滞力的影响会逐渐地传递到流体的内部,边界层逐渐增厚,换热热阻随着增加,进而换热系数减小,因此高低压绕组上半部分的散热效果比下半部分散热效果差,因此绕组温度沿着轴向高度方向温度逐渐升高。Fluent 求解器里流体与固体自动耦合的方式,使得换热系数可以随着变压器油的温度和流速变化而变化^[4],大大提高了运算结果的准确性。

由于该变压器低压绕组热源密度 q_v 大于高压绕组,并且低压绕组靠近变压器内侧,换热条件更差,经分析热点应该位于低压绕组,同时绕组顶部的油流条件优于绕组通道,并且顶端的静电板不发热,散热较好,故绕组热点应该低于绕组的最顶部位置。图 4、5 的数值模拟结果与上述理论分析一致。

模型 A 的热点温度为 354 K,热点温升为 44 K,模型 B 的热点温度为 341 K,热点温升为 31 K,可见在其他条件均不变,低压绕组端部绝缘内、外角环放置顺序不同,绕组的热点温升却相差很大,其中的原因见 3.2.2 流场分析。通过 Fluent 软件对变压器温度场的模拟计算,可以为变压器绝缘结构的设计和选取提供重要依据。

3.2.2 流场分析

图 6、7 为模型 A、B 的油流速度矢量局部放大图,单位 m/s。

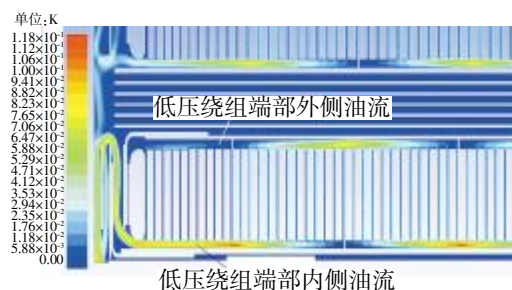


图 6 模型 A 速度矢量局部放大图

Fig. 6 Detail of velocity vector diagram of model A

绕组幅向两端的轴向油道中的油流速度要大于绕组和绕组间的水平油道。低压绕组的水平油道中存在水平方向上油的流动,各档油板形成的导向结

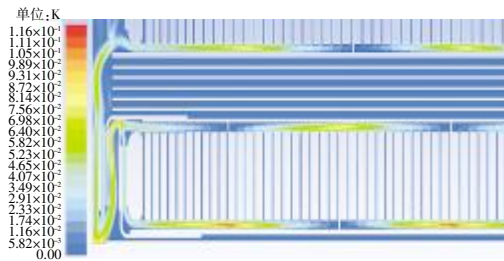


图7 模型B速度矢量局部放大图

Fig. 7 Detail of velocity vector diagram of model B

构使得水平方向油的流动比较规律,更加均匀,见图6、7。在档油板的上下线饼的水平油道的油流方向是相反的,这样油的流动在不同的导向区交替流动,每一个导向区里面的油流在水平方向上的流向却是相同的,各个导向区的油流互不影响,变压器油的水平流动更加彻底和流畅,避免了“死油区”的形成。

从图6可以看出模型A变压器油在低压绕组端部外侧油流的速度几乎为0,水平油道的油流速度也几乎为0,变压器油全部从绕组内侧流出去,显然端部绕组无法得到充分的散热,使得绕组温度局部过热,热点温升达44 K(见图4)。当低压绕组端部的角环位置由模型A的先外后内(沿绕组高度方向)设置成先内后外时,其速度矢量局部放大图见图7,显然低压绕组端部内侧油流速度和水平油道的速度显著变大,变压器油得以顺利水平流过端部绕组,起到了良好的散热作用,热点温度为31 K(见图5),比模型A下降了13 K。可见通过Fluent软件对变压器绕组端部角环位置布置的速度矢量场的模拟计算,可以为变压器油路的设计提供重要的依据。

4 计算结果和试验结果对比

光纤测温能准确、实时,可直接测出变压器绕组的温度值。对变压器模型B的绕组进行了光纤测温,把光纤预埋在变压器的第94-95饼(从底部往端部数)间的3个位置(14-15、25-26、35-36档之间,共36档),当温度值的变化很小时,认为发热与散热达到平衡,温度分布不再随时间变化,测得的瞬时温度值即为稳态温度值,测得温升值分别为30.7、31.3、28.6 K,最高温升为31.3 K。Fluent软件计算收敛后,第94-95饼计算的结果为26 K,两者相差仅为5 K,可满足工程需要。根据以上计算结果,软件计算结果比试验测试的温度低了5 K。经过进一步的分析,热源的发热量以及变压器模型材料参数(如变压器油随温度变化的密度、粘度、比热、导热率;绝缘材料的密度、比热、导热率等)将影响到Fluent软件温度场计算的准确度,因此为了进一步提升软件计算的准确性,需要软件热源的发热量尽可能接近温升

试验所施加的损耗值,同时对软件计算所需要的绝缘材料参数做进一步的研究。

Fluent软件模拟值比试验值低,造成误差的原因为:

- 1)Fluent模拟忽略了铁心,结构件等的发热,所以模拟值应该偏低一些;
- 2)未考虑垫块及撑条对热源—绕组的影响,另外软件模拟的是额定情况下计算的发热值,在试验条件下施加的损耗值比额定值大一些,因此模拟值会偏低;
- 3)试验时由于环境温度的变化,给测量结果也会带来一定的不确定性。

5 结语

通过文中建立的二维模型,采用有限元分析软件Fluent,计算出了油浸式自冷超高压电力变压器绕组和油的温度场分布,通过两个模型的对比,发现端部角环位置的布置十分重要,对变压器温升特别是热点温升有重大影响,并最终找到了合理的布置方法,降低了变压器绝缘老化的风险,提高了变压器的使用寿命和运行可靠性。

同时利用光纤测温,测量了绕组的温度值,和Fluent软件的计算结果对比,两者相差在5 K左右,证明用Fluent软件模拟计算超高压油浸式电力变压器温度场的方法是合理且可靠的,结果具有一定的可信度,Fluent软件的模拟分析可以为变压器的设计、研发和试验,为绕组热点位置的确定和测量提供重要依据。

文中Fluent软件模拟用的是简化模型,今后的物理模型可考虑油道垫块、撑条、铁心和结构件等的影响,使计算结果更接近实际情况;变压器损耗的计算通过其他更准确更先进的CAE手段计算而得,使得热源密度值更接近实际运行状况;变压器温度场和流体速度矢量场涉及到材料的属性,为了更精确地利用Fluent模拟计算,需要对材料库的数据进行规范化的研究;随着计算机硬件的不断提升,Fluent软件的不断更新升级,以及CAE工程师的技术不断提升,可考虑对超高压甚至特高压电力变压器进行三维建模,模拟三维温度场和流体速度矢量场。

参考文献:

- [1] 江淘莎,李剑,陈伟根,等.油浸式变压器绕组热点温度计算的热路模型[J].高压技术,2009,35(7):1635-1640.

- JIANG Taosha, LI Jian, CHEN Weigen, et al. Thermal model for hot spot temperature calculation in oil-immersed transformers[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1635-1640.
- [2] 单东雷. 大型变压器绕组温度场的研究[D]. 河北: 华北电力大学, 2012.
- SHAN Donglei. Research on the temperature field of oil-immersed transformer winding [D]. Hebei: North China Electric Power University, 2012.
- [3] 吴勇华. 大型油浸式变压器温度场计算的研究[J]. 江西: 华东交通大学, 2007, 12(5): 19-24.
- WU Yonghua. Calculation research of temperatures field of large oil-immersed power transformers [D]. Jiangxi: East China Jiaotong University, 2007, 12(5): 19-24.
- [4] 姚征, 陈康民. CFD 通用软件综述[J]. 上海理工大学学报, 2002, 24(2): 137-144.
- YAO Zheng, CHEN Kangmin. Review on the commercial CFD softwares [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2002, 24(2): 137-144.
- [5] 温波, 刘爽, 冯加奇, 等. 油浸式电力变压器绕组温度场的二维仿真分析[J]. 变压器, 2009, 46(9): 35-38.
- WEN Bo, LIU Shuang, FENG Jiaqi, et al. Two dimensional simulation analysis of winding temperature field of oil-immersed power transformer[J]. Transformer, 2009, 46(9): 35-38.
- [6] 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.
- [7] 陈书敏, 石玉美. 油浸式变压器用散热器温度场数值模拟[J]. 变压器, 2010, 47(7): 52-55.
- CHEN Shumin, SHI Yumei. Numerical simulation of temperature field in radiator for oil-immersed transformer[J]. Transformer, 2010, 47(7): 52-55.
- [8] 叶翔. 油浸式变压器用散热器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- YE Xiang. Research on heat exchangers of oil-immersed transformer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [9] 刘永志. 油浸式变压器温度场的数值计算与分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- LIU Yongzhi. Numerical calculation and analysis of temperature field of oil-immersed transformer [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012.
- [10] 张志霄. 自然油循环电力变压器线圈冷却结构换热性能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2000.
- ZHANG Zhixiao. Study on thermal performance of natural oil circulation power transformer winding [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2000.
- [11] 孙旭东. 自然油循环电力变压器内部流动与传热分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2003.
- SUN Xudong. Analysis of flow and heat transfer inside a power transformer cooled by nature oil circulation [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2003.
- [12] 刘兴平, 陈民铀. 一种配电变压器绕组变形故障的在线监测新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 20-26.
- LIU Xingping, CHEN Minyou. A novel method on on-line monitoring of winding deformation of transformers [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 20-26.
- [13] 高吉普, 徐长宝, 陈建国, 等. 基于网络采样的变压器差动保护异步闭锁技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 105-110.
- GAO Jipu, XU Changbao, CHEN Jianguo, et al. Research on asynchronous blocking technology of transformer differential protection based on network sampling [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 105-110.
- [14] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [15] 崔伟, 张喜乐, 李永刚, 等. 基于 Fluent 软件的干式变压器绕组热点温度计算与分析[J]. 电力科学与工程, 2011, 27(1): 32-35.
- CUI Wei, ZHANG Xile, LI Yonggang, et al. Calculation and analysis hot temperature of dry-type transformer winding based on the software of fluent [J]. Electric Power Science and Engineering, 2011, 27(1): 32-35.
- [16] 井永腾, 李岩, 孙昕, 等. 基于 Fluent 油流模型的油浸式变压器绕组温升计算[J]. 变压器, 2010, 47(4): 9-12.
- JING Yongteng, LI Yan, SUN Xin, et al. Calculation of winding temperature rise in oil-immersed transformer based on fluent oil flow model [J]. Transformer, 2010, 47(4): 9-12.
- [17] 变压器制造技术丛书编审委员会. 变压器装配工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [18] 邸双奎. 自然油循环电力变压器温升计算方法的研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- DI Shuangkui. Research on method of temperature rise calculation of natural oil circulation power transformer [D]. Ji'nan: Shandong University, 2006.
- [19] 汤焱, 刘成远, 郝忠言, 等. 变压器绕组热点温升的计算与实验研究[J]. 变压器, 2001, 38(2): 1-5.
- TANG Yan, LIU Chengyuan, HAO Zhongyan, et al. Calculation and test of hot point temperature-rise in transformer windings [J]. Transformer, 2001, 38(2): 1-5.

汪德华(1968—), 男, 教授级高级工程师, 长期从事变压器研究和开发。

(编辑 赵彩莉)