

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.08.014

树脂浇注干式变压器温度场分布的计算分析

刘国坚¹, 王丰华²

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090;

2. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 为更准确地掌握树脂浇注干式变压器的内部温度场分布, 为变压器的绝缘寿命评估提供依据, 在分析变压器产热散热机理及导热途径的基础上, 依据干式变压器的实际对流传热和热辐射特性及温度场计算的流固耦合模型, 在多物理场仿真软件COMSOL中实现了树脂浇注干式变压器温度场分布的建模计算, 得到了干式变压器铁心和绕组的温度分布。同时将计算结果与干式变压器温升试验实测数据进行了对比, 两者吻合较好, 误差 $\pm 5.5\%$, 说明了计算结果的正确性。此外, 计算结果表明: 干式变压器绕组和铁心底部到顶部的温度分布呈现低—高—低走势, 绕组热点位于低压绕组轴向约85%处, 为变压器绝缘最薄弱点; 绕组温度分布与负载大小关系有限, 热点位置相对固定。

关键词: 干式变压器; 温度场; 热点温度; 绕组; 负载率

Temperature Field Calculation and Analysis of Cast-resin Dry-type Transformers

LIU Guojian¹, WANG Fenghua²

(1. College of Electric Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To accurately understand the temperature distribution inside the cast-resin dry-type transformer for assessment of transformer insulation life, the temperature field in the dry-type transformer is calculated on the basis of heat transfer theory and fluid mechanics. First, a coupled thermal-hydraulic analytic model is built, and a physical model of the cast-resin dry-type transformer is established with the software COMSOL to calculate the temperature distribution of its components such as ferrite core and windings. Comparison between the simulation result and the measured one indicates that the physical model is accurate with an error of less than $\pm 5.5\%$. According to the simulation, the temperature distribution of windings and core shows a low-high-low trend from the bottom up, and the hottest spot is located in low-voltage winding at 85% height from bottom. The correlation between winding temperature distribution and loading rate is limited, and hot spot maintains a relatively fixed position.

Key words: dry-type transformer; temperature field; hot spot; winding; loading rate

0 引言

近年来, 干式变压器因其优越的防火、防爆、节能、低噪音、环保及安装维护方便等特点得到了广泛使用, 尤其在配电变压器中, 所占比例不断增大。

但干式变压器的温升时间常数更短, 冷却性能较弱, 需要特别关注其温度分布情况^[1-2]。此外, 干式变压器的绝缘性能与其产热和散热性能密切相关, 绕组温度过高会导致绝缘材料加速老化, 缩短变压器使用寿命, 极端情况甚至会造成变压器起火爆裂等严重事故^[3-4]。这不仅会造成设备受损, 局部区域停电, 给社会造成大量经济损失, 还可能威胁到相关

收稿日期: 2016-02-11; 修回日期: 2016-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51207090)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (51207090).

人员的人身安全,有必要深入研究干式变压器的内部温度分布。

目前,研究者主要借助数值计算和试验研究的方法对干式变压器的内部温度场分布进行研究。文[5]建立了干式变压器的传热模型,使用有限单元法得到了强迫风冷状态下变压器的温度场分布,但由于传热模型忽略了流场对干式变压器温度场分布的影响,计算精度有限。文[6]通过建模计算,详细讨论了流体的物理性质、绕组散热方式及变压器结构等因素对变压器温升的影响,但在计算中假设流体的物性参数为常数,与实际情况不符。文[7]设计了干式变压器温度在线监测系统来进行温度报警和故障预警,但温度传感器的安装位置根据经验确定,对热点位置的预估针对性较差。文[8]尝试大量内置光纤光栅温度传感器来探究变压器内部温度分布,虽然能得到精确的温度分布情况,但也存在光纤传感器的成本高以及传感器的大量内置可能不利于变压器稳定运行等问题。

为此,文中依据传热学原理及干式变压器热传递特性,通过在 COMSOL 软件中建立干式变压器的仿真模型,对不同负荷下变压器的温度场分布进行计算。同时,将仿真计算结果与干式变压器温升试验实测温度进行对比,期望得到准确的干式变压器的温度场分布规律,为干式变压器的温度定位监测和寿命评估等提供依据。

1 干式变压器热源及传热分析

干式变压器的热源主要包括铁心损耗和高、低压绕组损耗,损耗转化为热量使部件温度升高。与此同时,热量又以热传导、对流和热辐射3种方式向周围环境散发,最终当产热和散热达到平衡时,变压器温度场达到稳态^[9]。

1.1 热源分析

1)铁心损耗 P_F 主要包括磁滞损耗 P_h 和涡流损耗 P_e ,为^[10]

$$P_F = P_h + P_e = \gamma f B_{\max}^2 V + \gamma d^2 f^2 B_{\max}^2 V。 \quad (1)$$

式(1)中: γ 为铁心材料的磁滞系数; f 为频率,Hz; $B_{\max}$ 为铁心中磁感应密度最大值,T; V 为铁心体积, mm^3 ; d 为硅钢片厚度,cm; γ 、 $B_{\max}$ 、 d 和 V 对于具体铁心来说都是定值。

2)高、低压绕组损耗一般可用式(2)计算^[11]。

$$P_w = P_k \beta^2 = P_k \left(\frac{S_{js}}{S_e} \right)^2。 \quad (2)$$

式(2)中: P_w 为绕组损耗,kW; P_k 为变压器短路有功功率,kW; β 为负载系数; S_{js} 为变压器计算负

荷,kVA; S_e 为变压器的额定容量,kVA。

此外,变压器绕组中还存在一些附加损耗,对干式变压器而言,这些附加损耗大概占绕组总损耗的1/10^[12]。考虑到变压器厂家通常将这部分损耗计入额定短路有功功率中,故此不做考虑。

1.2 传热分析

1.2.1 热传导

热传导主要发生在铁心和高、低压绕组导体内部,使热量从温度高的地方传至温度较低处。在二维柱坐标系中通常可将其描述为^[13]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{q_v}{k_u}。 \quad (3)$$

式(3)中: q_v 为单位体积发热量, W/m^3 ; k_u 为导热率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为温度,K。

1.2.2 对流传热

对流传热主要发生在铁心、高、低压绕组与空气接触的外表面,其数学描述如下

$$Q_{cd} = h_{cd}(T_s - T_{air})A。 \quad (4)$$

式(4)中: Q_{cd} 为对流传热的热量,W; h_{cd} 为对流传热表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_s 和 T_{air} 分别为固体表面和空气的平均温度,K; A 为对流换热面积, m^2 。

为提高计算结果的准确性,文中综合传热学原理及干式变压器的对流传热机理对 h_{cd} 的设定如下^[14]:

1)绕组和铁轭上下端部水平面与空气发生对流传热时的对流系数用一个整体均值来表示,为

$$\bar{h}_{cd} = \frac{c(G_r P_r)^n k_{air}}{L} = \frac{c[g\beta(\bar{T}_s - T_{air})]^n k_{air}}{(\eta\alpha)^n L^{(1-3n)}}。 \quad (5)$$

式(5)中: G_r 为葛拉晓夫数; P_r 为普朗特数; c 和 n 是常数; k_{air} 为空气的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; L 为水平面长度,m; g 为重力加速度, m/s^2 ; $\beta = 2/(\bar{T}_s + T_{air})$,为空气热膨胀系数, K^{-1} ; η 为流体粘度, m^2/s ; α 为热扩散系数, m^2/s 。

2)气道处对流系数随绕组轴向高度变化,为:

$$h_{cd}(y) = \frac{0.508 R_a^{1/4} k_{air}}{y} \left(\frac{P_r}{0.952 + P_r} \right)^{1/4}; \quad (6)$$

$$R_a = G_r P_r = \frac{g\beta[T_s(y) - T_{air}]y^3}{\eta\alpha}。 \quad (7)$$

式(6)、(7)中: y 为轴向高度,m; R_a 为瑞利数。

1.2.3 热辐射

辐射散热主要发生在铁心、高低压绕组之间以及最外层绕组向周围流体辐射热量。根据“由浸灰表面组成的封闭腔的辐射传热”理论可知,构成气道的两界面(如铁心与低压绕组表面、低压绕组和高压绕组表面)之间的辐射传热为^[13]

$$q_{1,2} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (8)$$

式(8)中: $q_{1,2}$ 为在壁面 1 与壁面 2 相互辐射作用下壁面 1 的净辐射热量密度, W/m^2 ; σ 为黑体辐射常数; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 分别为壁面 1 和壁面 2 的辐射率; A_1, A_2 分别为壁面 1、2 的辐射面积, m^2 ; T_1, T_2 分别为壁面 1、2 的温度, K 。

当只有 1 个壁面向周围空气环境辐射热量时(如高压绕组最外层向周围空气辐射热量), 辐射传热的数学描述为

$$q_1 = \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_{\text{air}}^4) \quad (9)$$

式(9)中, q_1 为壁面 1 向周围环境辐射的热量密度, W/m^2 。

2 变压器流体温度场一流场耦合模型

2.1 控制方程

为了便于分析, 文中作如下假设: ①流体流动是二维的; ②流体为不可压缩的牛顿型流体; ③流体无内热源; ④粘性耗散产生的耗散热量可以忽略不计。据此, 由不可压缩粘性流体动力学偏微分守恒方程^[15], 可以得到变压器温度场计算模型的数学描述为:

1) 流体质量守恒方程

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho u r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v r)}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

2) 流体轴向动量守恒方程

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} \right) = F_u - \frac{\partial P}{\partial r} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

流体径向动量守恒方程

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} \right) = F_v - \frac{\partial P}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (12)$$

3) 流体能量守恒方程

$$u \frac{\partial T_{\text{air}}}{\partial r} + v \frac{\partial T_{\text{air}}}{\partial z} = \frac{k_{\text{air}}}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T_{\text{air}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\text{air}}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{\text{air}}}{\partial z^2} \right) \quad (13)$$

4) 空气状态方程

$$P = \rho R T_{\text{air}} \quad (14)$$

式(10)–(14)中: u, v 分别是流体轴向和径向的速度分量; $k_{\text{air}}, \rho, T_{\text{air}}, c_p, P$ 分别是空气热导率、密度、温度、比热容和压强; F_u, F_v 分别是体积力的轴向和径向分量; η 为动力粘度系数。

2.2 无滑移边界条件

根据传热学原理, 当粘性流体在壁面上流动时, 由于粘性和摩擦力的作用, 在靠近壁面的地方流速

逐渐减小, 最后滞止而处于无滑移状态^[16]。对于干式变压器来说, 空气在绕组、铁心表面流动时, 流—固交界处最终会处于无滑移状态, 绕组和铁心外表这一极薄的空气层是不流动的, 固体表面的热量必须穿过这个静止空气层才能传递到外部流动的空气中。而穿过静止的空气层, 热量传递方式只能是导热, 根据传热学中的傅里叶定律可得

$$q = -k_{\text{air}} \frac{\partial T}{\partial z} \bigg|_{z=0} \quad (15)$$

式(15)中: q 为传递的热流密度, W/m^2 ; $\partial T / \partial z|_{z=0}$ 为流—固交界面法线方向上的空气温度变化率。

2.3 流体所受体积力

空气受热体积增大, 密度减小, 变压器内各处温度不同, 空气受热情况不同, 密度也不同, 这导致了空气受到体积力的作用^[17]。体积力归根结底是由重力产生的, 即单位体积空气在不同密度情况下受到的重力是不同的。正是由于体积力的作用, 才使得初始速度为 0 的空气流动起来。体积力可描述为

$$F = g(\rho_h - \rho_l) \quad (16)$$

式(16)中: F 为体积力, N/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ρ_h, ρ_l 分别为上方空气和下方空气密度, 它们是温度的函数, kg/m^3 。

3 温度场仿真分析

文中以 SCB10-1250/10 型干式变压器为研究对象在 COMSOL 软件中建立模型进行分析。变压器参数如下:

容量 $S_N = 1\,250\,\text{kVA}$, 电压等级为 $10 \pm 2 \times 2.5\% \,\text{kV}$ / $0.4\,\text{kV}$, Dyn11 联结; 铁心直径 $425\,\text{mm}$, 低压绕组内径 $548\,\text{mm}$, 外径 $774\,\text{mm}$; 高压绕组内径 $856\,\text{mm}$, 外径 $1\,020\,\text{mm}$; 低压气道宽 $10\,\text{mm}$ 。高压气道宽 $17\,\text{mm}$ 。

3.1 建立结构模型

SCB10-1250/10 型干式变压器的低压绕组为层式绕组, 位于铁心和高压绕组之间, 共有 3 层, 每层由不同的匝数绕制而成, 匝与匝之间有绝缘层; 高压绕组结构为分段层式, 共 2 层, 匝与匝、段与段之间有树脂材料绝缘; 铁心是由硅钢片叠在一起, 在圆周缝隙处填充一些导磁材料, 再由玻璃丝在上、中、下部捆紧。此外, 铁心和低压绕组之间、低压绕组层间、低、高压绕组之间以及高压绕组之间均有气道散热。

文中在建模时进行了如下简化:

1) 不考虑铁心叠片之间的空气隙, 认为整个铁心柱是一个完全由硅钢材料构成的柱体, 使用二维简化模型进行建模;

2)绕组各匝的树脂绝缘对绕组的散热影响有限,将其作为绕组整体来考虑^[18]。

所建立的变压器单相二维轴对称模型见图1。

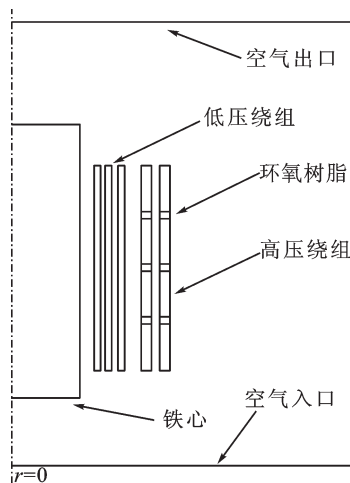


图1 变压器简化模型

Fig. 1 Simplified model of transformer

3.2 设置物性参数及初始条件

1)根据实际变压器各部件所使用的材料,分别设置变压器铁心、高、低压绕组的物理属性见表1。

表1 变压器材料属性

Table 1 Material properties of transformer

部件	材料	密度/(kg·m ⁻³)	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
铁心	硅钢	7 550	20.000	450
低压绕组	铜箔	8 700	398.000	385
高压绕组	扁铜线	8 700	387.000	385
绝缘	树脂	980	0.276	1 400

2)模型中空气的物理性质随着温度变化而变化,见表2。

表2 空气物性参数

Table 2 Properties of air

物理性质	拟合公式
密度/(kg·m ⁻³)	$\rho=1.263 \times e^{[-0.003 \times (T-273)]}$
动力粘度/(Pa·s)	$\eta=-8.3e^{-7}+8.3e^{-8}T-7.7e^{-11}T^2+4.6e^{-14}T^3-1.1e^{-17}T^4$
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	$K=-0.00237+1.15e^{-4}T-7.91e^{-8}T^2+4.12e^{-11}T^3-7.44e^{-15}T^4$
比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	$C_p=1047.6-0.372T+9.45e^{-4}T^2-6.02e^{-7}T^3+1.28e^{-10}T^4$

3)辐射率 ε 的设定。铁心外层涂有绝缘油漆,其辐射率设为0.9;高低压绕组的外包封使用环氧树脂,其辐射率也是0.9。

4)对流系数的设定。根据式(5)–(7),结合变压器的通风情况,给铁轭上下端面、绕组上下端面、气道

散热面、部件外围散热面各设置不同的对流系数。具体设置如下:铁轭上下端面、绕组上下端面对流系数较高,为12;气道散热面的对流系数与气道宽度有关,设为8;高压绕组最外围属于空气主要通道,与空气换热较为充分,故对流系数最高,为14。

5)冷空气从变压器底部流入,相对压强为0,温度为环境温度;热空气从顶部流出,相对压强为0,不指定温度;环境温度为303 K不变。

6)变压器常规情况下不会满负荷运行,其绕组温升也不会超过限值,但是当系统中某台变压器因故障或检修而退出运行期间,余下变压器就有可能需要满负荷甚至过负荷运行,这时需要特别关注绕组温升。因此为了检验模型仿真非常规负荷时温度场分布的能力,文中取变压器额定负荷时铁心、高、低压绕组的发热量代入模型。根据上文的热源计算方法求得它们的单位体积发热量分别为6 257、28 840、25 766 W/m³。

3.3 网格剖分

网格剖分对于计算的准确性来说很关键。网格剖分太精细,计算量太大,计算时间太长,有时候甚至超出软件仿真能力;剖分太粗糙,会导致结果准确度不够,偏离实际情况。为了控制误差,同时保证软件能顺利计算,该模型采用三角形网格剖分,在温度梯度较大的区域,如热源和空气接触区域,网格剖分较精细,反之则相对粗糙^[19]。网格剖分结果见图2。

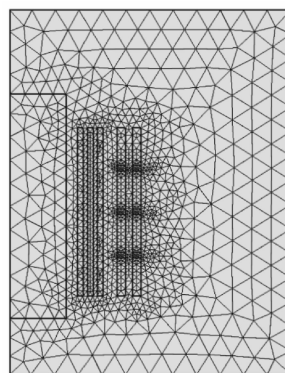


图2 有限元法三角网格剖分

Fig. 2 Finite element domains divided into mesh

4 仿真结果分析

4.1 仿真结果与试验结果对比验证

计算得到的干式变压器额定负载下的温度场结果见图3,对应的变压器铁心、低压和高压绕组的轴向温度分布见图4。由图3、4可见,干式变压器各部件从底部到顶部的温度分布规律大致是低—高—低走势,铁心、低、高压绕组的最热点温度有不

同程度的差异;整个变压器的热点温度位于低压绕组中层轴向高度 85%左右的位置,约为 145 °C;高压绕组外层最热点温度比内层的低。

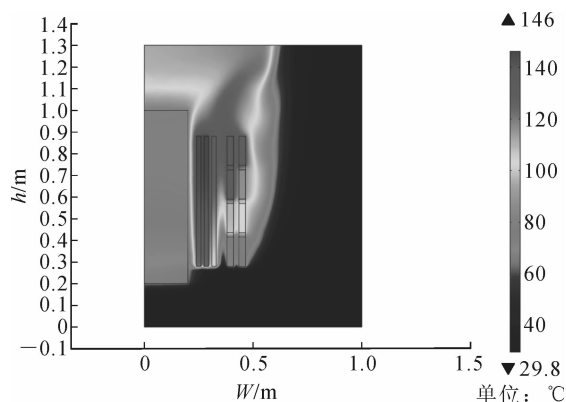
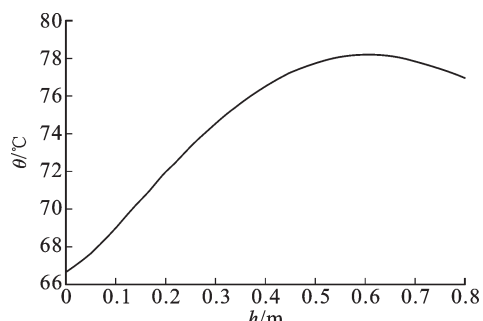
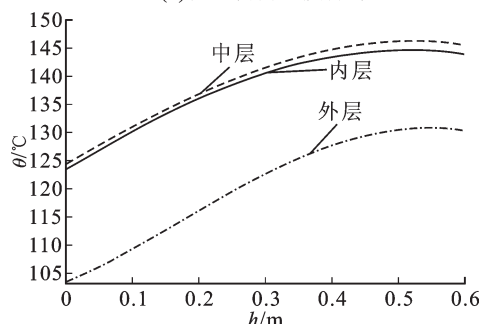


图 3 干式变压器温度场分布

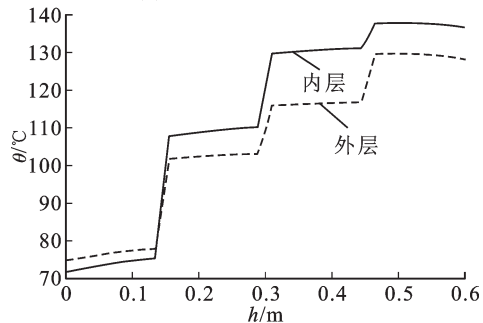
Fig. 3 Temperature distribution of dry-type transformer



(a)铁心轴向温度分布



(b)低压绕组轴向温度分布



(c)高压绕组轴向温度分布

图 4 变压器各部件轴向温度分布

Fig. 4 Axial temperature distribution of different parts of transformer

根据图 3、4 的温度分布并结合传热学理论分析可知:

1)热源温度沿轴向升高的原因在于热空气沿着气道自由上升时受粘度和壁面摩擦的影响,在靠近壁面的地方流体速度逐渐减小,在壁面处几乎停滞,形成换热薄层。由于空气动力粘度随温度升高而增大^[20],所以热空气上升的同时,换热层越来越厚,导致局部换热系数随高度增加而减小,因此热源上部的散热效果比下部差。另外,观察图 4(b)可知,随着轴向高度增加,温度曲线的切线斜率也在减小,即局部温度梯度差在减小,根据上文的传热分析可知,温度梯度差减小意味着热传导及对流传热的效果下降,这也是造成热源上部散热效果较差的原因。

2)热源温度的最高点出现在绕组顶端偏下位置的原因在于顶端上面空气流通空间大,散热较好;顶端下面由于气道狭小,散热效果有限,所以此处温度会较顶端温度高。

3)低压绕组的最热点温度高于高压绕组和铁心的最热点温度的原因在于低压绕组位于高压绕组和铁心之间,其散热方式包括辐射和对流散热,但辐射效果较差,起主要散热作用的是其与空气的对流换热,由于气道狭窄,空气对流散热量低。而铁心的发热量远低于绕组,以及高压绕组直接与外围空气接触,所以它们的最热点温度都低于低压绕组。

为了验证仿真计算结果的正确性,文中同时对实体干式变压器进行了温升试验,其中温度探头的布置见图 5。图 5 中,温控器 1-3 分别放置在低压绕组内、中、外层的外侧,温控器 4、5 分别放置在高压绕组内、外层的外侧。每个温控器监测 2 个点,分别为绕组表面轴向高度 50%和 85%处。

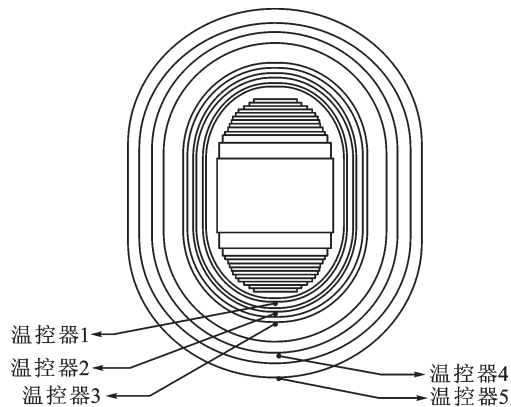


图 5 测温点布置图

Fig. 5 Temperature measurement point layout

试验监测温度数据和仿真数据对比见表 3。由表 3 可见,各处温度实测值与计算值的绝对差值不超过 7 °C,若以百分比表示则误差不超过 5.5%;实测绕组中最热点温度的位置在低压绕组中层上部,

与仿真结果吻合,说明了计算结果的正确性。

表3 绕组实测温度值与计算值比较

Table 3 Comparison of temperature data from winding

温控器	位置	计算值/℃	实测值/℃	误差/℃
1	50%处	140.1	137.7	2.4
	85%处	144.6	144.8	-0.2
2	50%处	141.5	141.1	0.4
	85%处	146.2	147.8	-1.6
3	50%处	122.7	117.3	5.4
	85%处	130.5	123.7	6.8
4	50%处	119.0	119.7	-0.7
	85%处	138.0	143.3	-5.3
5	50%处	108.7	114.4	-5.7
	85%处	129.9	129.4	0.5

4.2 不同负荷下绕组轴向温度分布计算分析

为得到典型负载下干式变压器轴向温度的分布规律,分别对负载系数 K 为0.9、1、1.1时干式变压器绕组的轴向温度分布进行仿真。限于篇幅,文中在此主要给出了低压绕组中层(即热点所在层)轴向温度分布计算结果,见图6。由图6可见,当变压器负载系数 K 分别为0.9、1、1.1时,变压器绕组热点分别位于轴向高度约82%、85%、87%处,变动不大,且绕组轴向温度分布规律基本一致。这说明绕组轴向温度分布和负载大小关系不大,热点位置相对固定,这一特性对于变压器热点温度定点监测具有重要意义。

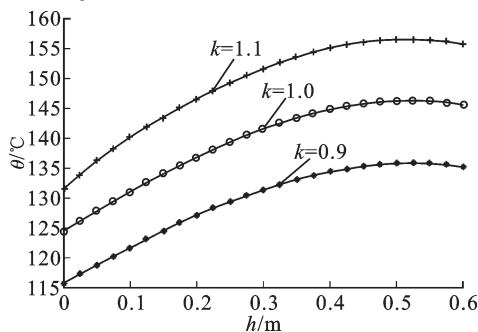


图6 低压绕组中层轴向温度曲线

Fig. 6 Axial temperature curve of middle layer of low-voltage winding

5 结论

文中以SCB10-1250/10型树脂浇注干式变压器为研究对象进行了仿真分析和实物温升试验,结果表明:

1)将温度实测值与仿真值对比分析,两者吻合度较高,误差最大不超过5.5%,表明,文中所提方法具有实用性,可以有效反映出变压器的实际运行

情况。

2)额定负载时,干式变压器高、低压绕组最热点温度分别为146.2℃和138.0℃,分别位于高低压绕组轴向78%和85%处。最热点即是绝缘薄弱环节,应着重加强绝缘监测和维护。

3)变压器的绕组热点温度与负载系数关系有限,且热点位置相对固定。

参考文献:

- [1] 余涛. 干式电力变压器技术与应用[M]. 北京:中国电力出版社,2008:10-15.
YU Tao. Dry-type power transformer technology and application[M]. Beijing:China Electric Power Press,2008:10-15.
- [2] JING C, WANG J, CUI W, et al. Numerical analysis of winding temperature field for dry type transformer [C]// Electromagnetic Field Problems and Applications(ICEF). Dalian, China:IEEE,2012:1-4.
- [3] 廖瑞金,张懿议,黄飞龙,等. 基于可拓分析法的电力变压器本体绝缘状态评估[J]. 高电压技术,2012,38(3):521-526.
LIAO Ruijin, ZHANG Yiyi, HUANG Feilong, et al. Power transformer condition assessment strategy using matter element analysis[J]. High Voltage Engineering,2012,38(3):521-526.
- [4] 熊兰,赵艳龙,杨子康,等. 树脂浇注干式变压器温升分析与计算[J]. 高电压技术,2013,39(2):265-271.
XIONG Lan, ZHAO Yanlong, YANG Zikang, et al. Temperature rise analysis and calculation of cast resin dry-type transformers[J]. High Voltage Engineering,2013,39(2):265-271.
- [5] ARJONA M A, HERNANDEZ C, ESCARELA R, et al. Thermal analysis of a dry-type distribution power transformer using FEA[C]//International Conference on Electrical Machines(ICEM). Berlin, Germany:IEEE,2014:2270-2274.
- [6] JEAN-MICHEL M B, ERIC V. Modelling of the mass flow distribution around an array of rectangular blocks in-line arranged and simulating the cross-section of a winding disc-type transformer[J]. Applied Thermal Engineering,2010,21(7):731-749.
- [7] 张又力,王礼,熊兰,等. 10 kV 干式变压器温度在线监测与评价系统[J]. 电测与仪表,2012,49(6):33-37.
ZHANG Youli, WANG Li, XIONG Lan, et al. On-line temperature monitoring and state evaluation system for 10 kV dry-type transformers[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2012,49(6):33-37.
- [8] 邓建钢,王立新,聂德鑫,等. 内置光纤光栅油浸式变压器的研制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(24):160-167.
DENG Jiangang, WANG Lixin, NIE Dexin, et al. Development of oil-immersed transformers with built-in fiber bragg

- grating sensors[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 160-167.
- [9] RAHIMPOUR E, AZIZIAN D. Analysis of temperature distribution in cast-resin dry-type transformers[J]. Electrical Engineering, 2007, 89(4): 301-309.
- [10] NING W, DING X. Three-dimensional finite element analysis on fluid thermal field of dry-type transformer[C]//Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCC). Harbin, China: [s.n.], 2012: 516-519.
- [11] ORTIZ C, SKOREK A W, LAVOIE M, et al. Parallel CFD analysis of conjugate heat transfer in a dry-type transformer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(4): 1530-1534.
- [12] 顺特电气有限公司. 树脂浇注干式变压器和电抗器[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 11-18.
- SUNTEN Electric Co., Ltd.. Cast resin dry-type transformer and reactors[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 11-18.
- [13] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [14] LEFÈVRE A, MIÈGEVILLE L, FOULADGAR J, et al. 3-D computation of transformers overheating under nonlinear loads[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5): 1564-1567.
- [15] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 第3版. 北京: 科学出版社, 1998.
- KONG Xiangqian. The application of finite element method in heat transfer[M]. 3th. Beijing: Science Press, 1998.
- [16] 蔡定国, 姚育成, 徐业彬, 等. 基于流固耦合分析的干式变压器温度场数值分析[J]. 华北电力大学学报, 2012, 39(2): 34-38.
- CAI Dingguo, YAO Yucheng, XU Yebin, et al. Numerical simulation of dry type transformer temperature field based on the fluid solid coupling analysis[J]. Journal of North China Electric Power University, 2012, 39(2): 34-38.
- [17] 刘永志, 李岩, 井永腾. 基于Fluent软件的电力变压器温度场计算与分析[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 6-11.
- LIU Yongzhi, LI Yan, JING Yongteng. Calculation and analysis of temperature field of power transformer based on software Fluent[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 6-11.
- [18] JACEK S, ANDRZEJ J N. Shape optimization of coils and cooling ducts in dry-type transformers using computation fluid dynamics and genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(6): 1726-1732.
- [19] LEE M, ABDULLAH H A, JOFRIET J C, et al. Temperature distribution in foil winding for ventilated dry-type power transformers[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(9): 1065-1073.
- [20] LEE M, ABDULLAH H A, JOFRIET J C, et al. Thermal modeling of disc-type winding for ventilated dry-type transformers[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(1): 121-129.

刘国坚(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力变压器在线监测与高电压绝缘技术等。

王丰华(1973—), 女, 博士, 副研究员, 研究方向为电力变压器在线监测、电力变压器直流偏磁、电能质量分析等。

版权声明:

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我编辑部上述声明。

《高压电器》编辑部