

基于参数热等效的10 kV变压器温度流体场三维仿真计算

邓永清¹, 阮江军¹, 龚宇佳², 黄道春¹, 赵庆源³

(1. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430074;
3. 辽宁省电力有限公司本溪供电公司, 辽宁 本溪 117000)

摘要:变压器温度流体场三维仿真是准确计算变压器绕组热点温度的重要方法,然而变压器绕组结构复杂,精确考虑绕组导线和绝缘结构的三维模型建模和网格剖分困难,同时计算效率低,难以满足实际工程需求。提出了一种配电变压器绕组结构的热等效简化分析方法,采用热导率各向异性、比热容等效的块状导体来等效实际的绕组结构。应用所提方法对一台S13-M-200 kV·A / 10 kV型油浸式变压器三维温度流体场进行了计算。基于短路法的变压器温升试验结果表明:热等效参数方法大幅减少了变压器三维网格剖分数量,同时温度场计算结果能有效反映绕组轴向温度分布,热点温度仿真值与温升试验值温差相对误差不超过4%,验证了所提方法的有效性与准确性。

关键词:油浸式变压器;温度流体场;热等效;热点温度

中图分类号:TM 411

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202103012

0 引言

电力变压器是电力系统的重要设备,而绕组热点温度是影响变压器油纸绝缘劣化的重要因素,其在很大程度上影响着变压器性能和使用寿命^[1-2]。准确获取绕组热点温度可为指导变压器负荷控制、保障变压器设备的安全高效运行提供重要参考。

目前,变压器绕组热点温度通常采用经验公式和热路模型进行计算^[3-4],然而这2种方法主要关注变压器的绕组热点温度,无法了解变压器内部温度分布和详细的散热过程。为准确分析变压器内部温度分布,指导变压器结构优化设计,数值计算方法在变压器温度流体场计算中得到了越来越广泛的应用。文献[5]提出了一种温度流体场耦合分析方法,分析了变压器不同叠型绕组结构对热点温度的影响;文献[6]利用数值计算方法分析了一台容量为25 MV·A的变压器的风扇位置和排风角度对变压器散热的影响。为了得到最佳油箱结构以增强变压器的散热,文献[7]利用数值计算方法对变压器油箱结构进行了优化分析;文献[8]将计算流体动力学(CFD)与遗传算法相结合,对一台干式变压器的绕组和冷却管道结构进行了优化设计。

在变压器绕组温度数值计算方面,文献[9]采用有限体积法计算了一台单相油浸式变压器的二维瞬

态流体-温度场,分析了不同负载情况下绕组温度的变化规律,绕组各测温点的仿真值与试验值的平均百分比误差为5.8%;文献[10]建立了一台大型单相变压器的二维简化模型,采用有限体积法和有限元法对变压器电磁和流体温度场进行了计算,同时分析了不同负载对变压器热点温度的影响;文献[11]建立了一台321.1 MV·A油浸式换流变压器的绕组局部分层结构模型,采用迎风有限元法计算了变压器绕组温度分布,所得流场内温度计算值与采用Fluent软件得到的计算值的最大温差不超过1℃;文献[12]建立了一台绕组轴向为分层结构的大型单相试验变压器1/4对称模型,采用多面体网格对模型进行剖分,数值计算结果与试验结果吻合较好,最大温差为3.71℃,且多面体网格大幅降低了网格数量和计算内存;文献[13]采用电磁-热-流弱耦合的方式计算了一台ODFS-400000 kV·A / 500 kV型单相自耦变压器的温度流体场,绕组热点温度计算值与光纤实测值的相对误差不超过3.5%。对于三相变压器,简单的二维分析模型难以有效反映变压器内部的温度流体场分布,且变压器内部绕组结构复杂,在三维多物理场数值计算中对绕组进行过多的简化将导致计算误差增大,不能有效反映绕组温度分布和热点温度,而对绕组进行精细建模又会导致建模和网格剖分困难,大幅增加计算时间,降低计算效率,因此有效的变压器绕组结构简化分析方法对保证变压器热点温度多物理场计算的精度和效率具有重要意义。

10 kV油浸式变压器作为配电网的重要组成部分,在配电网中应用广泛^[14]。本文应用ANSYS CFX三维流体动力学仿真分析软件,基于参数热等效的分析方法,采用热导率各向异性和比热容等效的块

收稿日期:2020-10-08;修回日期:2021-01-14

基金项目:国家自然科学基金智能电网联合基金资助项目(电力设备热点状态多参量传感与智能感知技术)(U2066217)

Project supported by the Smart Grid Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China(Multi Parameter Sensing and Intelligent Sensing Technology for Hot Spot State of Power Equipment)(U2066217)

状导体代替实际的变压器绕组结构,计算了一台S13-M-200 kV·A / 10 kV型油浸式配电变压器绕组热点温度。通过基于短路法的变压器温升试验对仿真计算结果进行了验证,结果表明变压器绕组热点温度计算值与试验值的相对误差不超过4%,验证了本文方法的有效性与准确性。

1 变压器温度流体场仿真分析方法

1.1 温度流体场分析基本原理

流体问题的求解主要依赖于计算流体力学模型的建立,而流体场内散热介质流动及传热的数学模型主要基于三大守恒方程,即质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。对于本文所研究的不可压缩牛顿流体而言,流体密度不随时间变化,其微分形式为^[8]:

$$\nabla V = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \rho V \nabla V = \rho f - \nabla p + \mu \nabla^2 V \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla(\rho e V) = \rho q + \nabla(k \nabla T) - p \nabla V + S \quad (3)$$

其中, ∇ 为哈密顿算子; V 为流体速度矢量; ρ 为流体密度; f 为单位流体质量力; p 为流体压力; μ 为流体的动力粘度; e 为流体内能; q 为流体的体积热源; k 为流体热导率; S 为油粘性流体内部热源共同作用下,流体机械能转换为热能的部分; T 为变压器油温度(单位为K)。

本文采用基于有限体积法原理的ANSYS CFX软件对变压器温度流体场控制方程进行离散求解。

1.2 边界条件

(1)内部壁面边界条件:由于变压器内部固体壁面与壁面附近流体的相对速度几乎为0,在变压器内部固体壁面处设置无滑移边界条件,同时壁面温度与紧贴壁面的流体的温度一致。

(2)外壳对流换热系数:数值仿真中,常用对流换热系数来等效表达变压器与外界环境的换热过程。将变压器外壳及散热器外壳简化为光滑平面,即可将变压器外壳散热过程认为是纵掠平板对流传热。根据传热学基本理论,水平板的努塞尔数 N_{uh} 和竖直板的努塞尔数 N_{uv} 分别如式(4)、(5)所示^[15]。

$$N_{uh} = 0.27 \lambda_{Ra}^{1/4} \quad (4)$$

$$N_{uv} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \lambda_{Ra}^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / \lambda_{Pr})^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (5)$$

$$\lambda_{Pr} = \frac{\mu c}{k} \quad (6)$$

$$\lambda_{Gr} = \frac{g \beta \theta L^3}{\nu^2} \quad (7)$$

$$\lambda_{Ra} = \lambda_{Gr} \lambda_{Pr} \quad (8)$$

其中, λ_{Pr} 为普朗特数; λ_{Gr} 为格拉晓夫数; λ_{Ra} 为瑞利数; g 为重力加速度; β 为对应流体膨胀系数; ν 为流体的运动粘度; L 为特征尺寸; c 为流体比热容; θ 为壁面与外流体的温差。

将所得的努塞尔数代入式(9)即可求得自然对流情况下的变压器对流换热系数。

$$h = \frac{N_{ui} k}{L} \quad i = v, h \quad (9)$$

其中, h 为对流换热系数(单位为W/(m²·K))。

(3)外壳辐射换热:变压器外壳的辐射换热产生的热流可通过式(10)表示^[16]。

$$q_r = \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_a^4) \quad (10)$$

其中, ε 为变压器外壳表面发射率; σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数,取值为5.67×10⁻⁸ W/(m²·K⁴); T_w 为变压器外壳温度; T_a 为变压器外界环境温度。

1.3 温度流体场材料参数

变压器油作为油浸式变压器的主要内部冷却介质,其热力学参数对变压器内部结构的温度分布具有重要影响。变压器油的热物理参数会随着温度发生变化,为保证拟合的准确性,本文采用函数拟合油热物理参数随温度的变化过程,如式(11)所示^[17]。

$$\mu(T) = \exp(B) T^{-A} \quad (11)$$

其中, $A = 9.55 \pm 0.23$; $B = 50.24 \pm 1.33$; $\mu(\cdot)$ 为变压器动力粘度(单位为N·s/m²)。

变压器油的其他物理参数如表1所示^[18-19]。变压器绕组导线材料为铜,油箱材料为钢,绕组端部绝缘的材料为绝缘纸板。变压器内部其他固体材料的物理参数如表2所示。

表1 变压器油物理参数

Table 1 Physical parameters of transformer oil

物理参数	参数值
密度/(kg·m ⁻³)	880
比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1433+5.233 T
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.105

表2 固体材料物理参数

Table 2 Physical parameters of solid material

材料	物理参数		
	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
铜	401	8933	385
钢	60.5	7854	434
铁芯	51.9	7550	446
绝缘纸板	0.19	930	1340

2 变压器绕组材料参数热等效

本文10 kV配电变压器绕组结构如附录中图A1所示。绕组导线被油浸绝缘纸层层包裹,同时绕组高度方向上没有设置中间油道,只在水平方向的高、

低压绕组之间以及高、低压绕组内部设置了层间油道。由配电变压器绕组结构可知,绕组导线和油浸绝缘纸的精细化建模十分复杂,同时网格剖分困难,本文提出基于热参数等效的方法对变压器绕组结构进行简化。热参数等效即通过建立简化的块状变压器导率和比热容与实际绕组结构参数等效。

2.1 等效热导率计算

变压器绕组结构简化示意图如图1所示。图中, x 、 y 分别表示径向、轴向; H 、 d 分别为高度、厚度。变压器绕组在轴向和径向上的等效热导率可由等效热阻模型获得,具体说明如下。

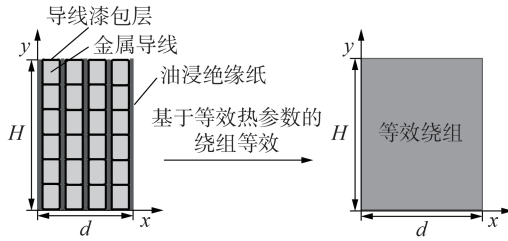


图1 变压器绕组结构简化示意图

Fig.1 Simplified diagram of transformer winding structure

单位面积条件下,材料热阻 R_{th} 与材料本身的厚度和热导率的关系为^[20]:

$$R_{th} = d/k \quad (12)$$

油浸绝缘纸包裹在绕组导体层上,变压器绕组在径向上整体的等效热阻 R_{thr} 为:

$$R_{thr} = R_{thr1} + R_{thr2} + R_{thr3} \quad (13)$$

其中, R_{thr1} 为变压器绕组径向导体层金属导体热阻; R_{thr2} 为变压器绕组径向导体层绝缘漆热阻; R_{thr3} 为变压器径向油浸绝缘纸热阻。

绕组径向整体厚度 d_r 为:

$$d_r = d_{r1} + d_{r2} + d_{r3} \quad (14)$$

其中, d_{r1} 为变压器绕组径向导体层金属导体总厚度; d_{r2} 为变压器绕组径向导体层绝缘漆总厚度; d_{r3} 为变压器径向油浸绝缘纸总厚度。

通过式(12)~(14)可以得到:

$$\frac{d_r}{k_r} = \frac{d_{r1}}{k_1} + \frac{d_{r2}}{k_2} + \frac{d_{r3}}{k_3} \quad (15)$$

其中, k_r 为变压器绕组在径向上的等效热导率; k_1 为变压器绕组导体层金属导体热导率; k_2 为变压器绕组导体层绝缘漆热导率; k_3 为变压器油浸绝缘纸热导率。

则变压器绕组在径向上的等效热导率 k_r 为:

$$k_r = \frac{k_1 k_2 k_3 d_r}{d_{r1} k_2 k_3 + d_{r2} k_1 k_3 + d_{r3} k_1 k_2} \quad (16)$$

变压器绕组在轴向上整体的等效热阻 R_{tha} 为:

$$R_{tha} = R_{tha1} + R_{tha2} \quad (17)$$

其中, R_{tha1} 为变压器绕组导体层金属导体热阻; R_{tha2}

为变压器绕组导体层绝缘漆热阻。

绕组轴向整体厚度 d_a 为:

$$d_a = d_{a1} + d_{a2} \quad (18)$$

其中, d_{a1} 为变压器绕组轴向导体层金属导体总厚度; d_{a2} 为变压器绕组轴向导体层绝缘漆总厚度。

通过式(12)、(17)、(18)可以得到,变压器绕组在轴向上的等效热导率 k_a 为:

$$k_a = \frac{k_1 k_2 d_a}{d_{a1} k_2 + d_{a2} k_1} \quad (19)$$

绕组导线绕制方向的热导率取金属铜导线的热导率 $401 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。结合变压器材料和结构参数,计算得到变压器高、低压绕组各方向的等效热导率如表3所示。

表3 变压器绕组等效热导率

Table 3 Equivalent thermal conductivity of transformer windings

绕组方向	等效热导率 / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	
	高压绕组	低压绕组
轴向	4.79	6.17
径向	3.09	1.76
导线绕制方向	401	401

2.2 等效比热容计算

变压器绕组油浸绝缘纸包裹在绕组导体层上,因此有:

$$c_e m \Delta T = c_1 m_1 \Delta T + c_2 m_2 \Delta T + c_3 m_3 \Delta T \quad (20)$$

其中, c_e 为变压器绕组等效比热容; m 为变压器绕组整体总质量; ΔT 为变压器绕组温度变化量; c_1 为变压器绕组导体层比热容; c_2 为变压器油浸绝缘纸比热容; c_3 为变压器绕组绝缘漆比热容; m_1 为变压器绕组导体层总质量; m_2 为变压器油浸绝缘纸总质量; m_3 为变压器绕组绝缘漆总质量。

结合变压器材料和结构参数,计算得变压器高、低压绕组的等效比热容分别为 391 、 $396 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

3 变压器温升试验

3.1 温升试验对象

本文选用的S13-M-200 kV·A / 10 kV型三相油浸式配电变压器结构如附录中图A2所示,其额定容量为200 kV·A、额定电压为10 kV / 0.4 kV,绕组连接型式为Dyn11,冷却型式为ONAN,48片散热片在箱体中呈对称分布。

3.2 温升试验方法

温升试验之前,在额定条件下进行变压器空载和负载试验,确定该变压器的空载损耗为228 W、负载损耗为2620 W。依照GB/T 1094.2—2013《电力变压器 第2部分:液浸式变压器的温升》中的短路温升试验方法^[21],温升试验接线如图2所示。

温升试验过程中,分接开关放置在额定分接头

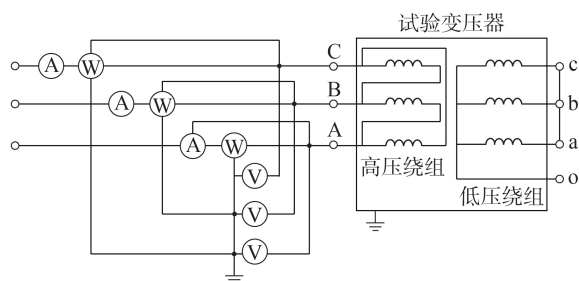


图2 基于短路法的温升试验接线图

Fig.2 Wiring diagram of temperature rise test based on short circuit method

位置,试验过程中持续监测变压器顶层油温、底层油温以及外界环境温度。试验分为施加总损耗阶段和施加额定电流阶段。

(1)施加总损耗阶段应施加实测变压器总损耗2.848 kW,当变压器顶层油温变化率小于1 K/h并至少持续3 h时,结束本阶段试验。本阶段试验测得的变压器油平均温度 θ_m 的表达式为:

$$\theta_m = (\theta_o + \theta_b) / 2 \quad (21)$$

其中, θ_o 为顶层油温度; θ_b 为底层油温度。

(2)在施加总损耗阶段结束后立即进入施加额定电流阶段。本阶段试验持续时间为1 h,试验过程中施加额定电流11.55 A,试验结束后立即测量变压器高、低压绕组的电阻以得到变压器高、低压绕组的平均温升。本阶段测得变压器绕组温度 θ_2 的表达式为:

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} (235 + \theta_1) - 235 \quad (22)$$

其中, θ_1 为整体温升试验前的环境温度; R_1 为整体温升试验前的绕组电阻; θ_2 为整体温升试验后的绕组平均温度; R_2 为整体温升试验后的绕组电阻。

3.3 温升试验结果

环境温度为10.8℃时,温升试验测得的变压器绕组平均温度和变压器油温度如表4所示。

表4 变压器油温度和绕组平均温度试验结果

Table 4 Test results of temperature of transformer oil and average temperature of transformer windings

参数	参数值/℃
总损耗下变压器顶层油温	53.1
总损耗下变压器底层油温	31.1
总损耗下变压器油平均温度	42.1
额定电流下高压绕组平均温度	63.1
额定电流下低压绕组平均温度	67.2

根据GB/T 1094.7—2008《电力变压器 第7部分:油浸式电力变压器负载导则》^[22],绕组热点温度 θ_h 的计算公式如式(23)所示。由式(23)可计算得到S13-M-200 kV·A/10 kV型三相油浸式配电变压器的绕组热点温度为80.7℃。

$$\theta_h = H(\theta_2 - \theta_m) + \theta_o \quad (23)$$

其中, H 为绕组热点系数,对于配电变压器 $H=1.1$ 。

4 基于等效热参数的变压器温度流体场计算

4.1 变压器建模和剖分

结合图A1和图1可知,对精确考虑绕组导线和油纸绝缘结构的变压器绕组三维模型进行剖分将产生大量单元,对导线和绝缘结构进行粗略剖分,单相绕组也将产生百万级的剖分单元数量,变压器整体模型的剖分单元数量将在千万级,因此本文采用热导率各向异性、比热容等效的块状导体来代替实际的变压器绕组结构,该绕组结构忽略了绕组外包绝缘纸和撑条,同时由于高压分接绕组分布在高压绕组外侧,而额定分接条件下对应分接头在最外层绕组中部,因此绕组建模时忽略绕组分接头位置对高压绕组大小的影响。本文建立变压器绕组模型如图3所示,包括高/低压绕组、端部垫块绝缘、内部金属结构件、铁芯、油箱和散热片结构的变压器整体三维仿真模型如附录中图A3所示。

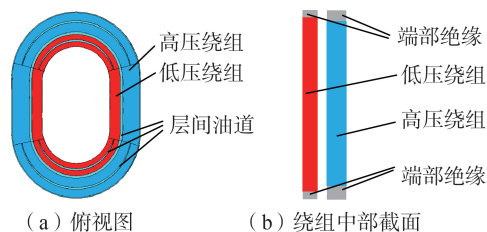


图3 变压器绕组模型

Fig.3 Model of transformer winding

对变压器的绕组、绝缘、油道等对称结构采用扫描映射剖分,对变压器外壳、变压器油以及变压器内部结构件等不规则结构采用自由剖分。变压器内部结构整体和绕组结构剖分如附录中图A4所示,单相绕组剖分的单元数量为 1.87×10^5 ,变压器整体三维模型的单元数量为 3.224×10^6 。

4.2 仿真计算中热源加载

温升试验中加载在变压器内的总损耗是空载损耗和负载损耗之和,因为温升试验采用短路法,所以变压器内部损耗具体由变压器绕组铜耗和变压器内部金属结构件以及外壳上的杂散损耗组成。配电变压器上的杂散损耗较小^[23],因此在额定负载条件下,仿真中将损耗全部加载到变压器绕组上,该损耗为变压器空载损耗与负载损耗之和。

4.3 等效热参数下变压器温度流体场计算

根据绕组结构材料热等效计算得到的绕组等效比热容和各向异性热导计算变压器温度流体场。在环境温度为10.8℃的额定负载无风条件下,计算得到变压器外壳及内部结构件温度分布如附录中图A5和图A6所示,高、低压绕组温度如附录中图A7

所示。由绕组的温度分布可知,变压器绕组整体温度随绕组高度的增加而升高,这是因为绕组附近的变压器油受热膨胀,热油受热浮升力的作用由下往上流动,再经散热片降温后回流至绕组底部形成循环,因此绕组附近变压器油的平均温升随着绕组高度的增加而增大,而绕组内部发热较为均匀,导致绕组整体温度随绕组高度的增加而升高。

三相绕组的温度分布规律基本一致,其中B相绕组的温度略高于其他两相,这主要是因为B相绕组位于A、C两相中间,散热条件相对较差。同时由于低压绕组内层紧邻铁芯,散热条件最差,绕组热点出现在B相低压绕组的内层绕组上沿。提取得到B相高、低压绕组温度的轴向分布如图4所示。因为绕组顶端直接与变压器油相接触,相比绕组顶端下部的绕组,散热条件较好,因此绕组热点温度 78.1°C 出现在低压绕组95%高度处,热点温升为 67.3 K ,热点温度仿真结果与温升试验结果温差为 -2.6°C ,相对误差不超过4%。

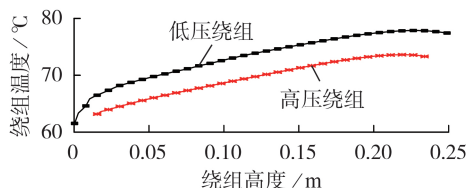


图4 B相高、低压绕组温度的轴向分布

Fig.4 Temperature distribution along axis of phase-B high and low voltage windings

提取变压器宽边截面上的流体场分布,截面设置如附录中图A8所示,截面上的流体场分布如附录中图A9所示。由流速分布可知,变压器油流经绕组油道加热后到达顶层,顶层热油流入散热片形成规律的层流流动,经散热片散热降温后流出散热片进入变压器底层,最后进入绕组油道加热完成油流循环。变压器绕组附近和顶部的油流流速较大,提取变压器AB相绕组间油道的油流流速分布如图5所示,可知绕组附近油流的平均流速约为 0.02 m/s 。

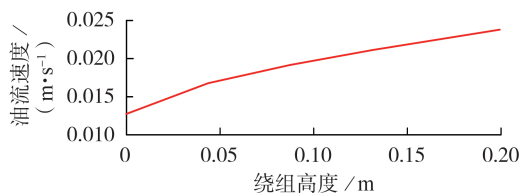


图5 AB相绕组间油道油流速度

Fig.5 Oil flow velocity of oil passage between phase-A and phase-B windings

4.4 金属导线热参数下的温度场计算

为验证绕组各向异性等效热参数分析模型的准确性,本节对绕组加载各向同性的金属导线热导率

和比热容,绕组导线由铜构成,因此绕组热导率加载为 $401\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、比热容加载为 $385\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 。

在环境温度为 10.8°C 的无风额定负载条件下,变压器外壳的温度分布如附录中图A10所示。由图可见,加载热等效参数和金属导线热参数条件下,变压器外壳温度分布基本一致,这是由于外壳温度基本与变压器外壳的散热条件以及绕组上加载的热功率大小相关,变压器绕组材质的变化对外壳温度变化影响不大。

加载金属导线热参数条件下,高、低压绕组温度分布如附录中图A11所示。由图可见,绕组整体温度随着绕组高度的增加而升高,同时B相绕组温度相比其他相绕组的温度更高,绕组热点温度出现在B相低压绕组的上端。B相高、低压绕组温度的轴向分布如图6所示。由图可见,B相高/低压绕组的上、下端温差较小,均在 3°C 左右,难以体现实际绕组结构的温度分布,同时计算得到绕组热点温度为 70.9°C ,远低于变压器热点温度试验值 80.7°C ,因此简单地给绕组加载金属导线热参数无法准确计算变压器绕组热点温度,原因是加载金属导线热参数未考虑变压器绕组导线附近的绝缘漆和油浸绝缘纸等绝缘结构对绕组散热的影响,在实际仿真中应结合变压器绕组结构加载各向异性的热等效参数。

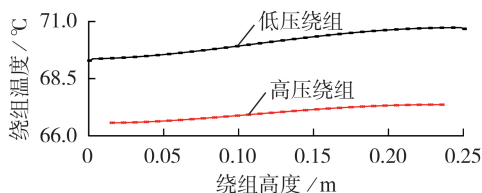


图6 B相高、低压绕组温度的轴向分布

Fig.6 Temperature distribution along axis of phase-B high and low voltage windings

5 结论

本文研究了基于参数热等效的 10 kV 配电变压器温度流体场三维仿真计算方法,结合变压器温升试验验证了仿真分析方法的准确性,得到了如下结论:

(1)给简化后的绕组块状导体直接加载金属导线热参数无法准确反映绕组温度分布,同时无法准确计算绕组热点温度,这是因为加载金属导线热参数无法考虑变压器绕组导线附近的绝缘漆和油浸绝缘纸等绝缘结构对绕组散热的影响,在实际仿真中应结合变压器绕组结构加载等效比热容以及各向异性的等效热导率等参数;

(2)采用热导率各向异性、比热容等效的块状导

体来代替实际的变压器绕组结构,大幅减少了变压器三维仿真网格剖分数,同时热等效参数方法温度场计算结果能有效反映绕组轴向温度分布,绕组热点出现在B相低压绕组轴向95%高度处,热点温度计算值与温升试验值的温差相对误差不超过4%,验证了本文方法的准确性与有效性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

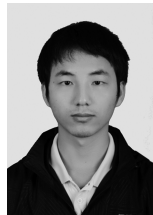
- [1] 郑含博,张懿议,刘捷丰,等.一种油浸式电力变压器纸绝缘老化评估新特征量[J].电力自动化设备,2018,38(10):147-152.
ZHENG Hanbo,ZHANG Yiyi,LIU Jiefeng,et al. Novel characteristic products of paper insulation aging assessment for oil-immersed power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(10):147-152.
- [2] 王伟,魏菊芳,王楠,等.有限元和有限体积法结合的油浸式变压器温度场计算方法[J].电测与仪表,2017,54(18):42-47.
WANG Wei,WEI Jufang,WANG Nan,et al. The calculation method of temperature field of oil immersed transformer with FEM and FVM combined[J]. Electrical Measurement and Instrumentation,2017,54(18):42-47.
- [3] 陈伟根,赵涛,江淘莎,等.改进的变压器绕组热点温度估算方法[J].高压电器,2009,45(1):53-56.
CHEN Weigen,ZHAO Tao,JIANG Taosha,et al. Improved method for calculation of hot-spot temperature in power transformer[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(1):53-56.
- [4] 杨志超,吴奕,王坚,等.一种主变压器热点温度实时计算解析模型[J].电力自动化设备,2016,36(11):147-151.
YANG Zhichao,WU Yi,WANG Jian,et al. Analytical model for real-time calculating hot-spot temperature of main transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):147-151.
- [5] TORRIANO F,CAMPELO H,QUINTELA M,et al. Numerical and experimental thermofluid investigation of different disc-type power transformer winding arrangements[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow,2018,69:62-72.
- [6] PARAMANE S B,JOSHI K,WIM V D V,et al. CFD study on thermal performance of radiators in a power transformer: effect of blowing direction and offset of fans[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(6):2596-2604.
- [7] AMOIRALIS E I,TSILI M A,KLADAS A G,et al. Distribution transformer cooling system improvement by innovative tank panel geometries[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(3):1021-1028.
- [8] SMOLKA J. CFD-based 3-D optimization of the mutual coil configuration for the effective cooling of an electrical transformer[J]. Applied Thermal Engineering,2013,50(1):124-133.
- [9] 苏小平,陈伟根,胡启元,等.基于解析-数值技术的变压器绕组温度分布计算[J].高电压技术,2014,40(10):3164-3170.
SU Xiaoping,CHEN Weigen,HU Qiyuan,et al. Calculation for transformer winding temperature distribution by numerical analytical technology[J]. High Voltage Engineering,2014,40(10):3164-3170.
- [10] 刘刚,靳艳娇,马永强,等.油浸式变压器流场和温度场的数值分析[J].变压器,2017,54(5):22-26.
LIU Gang,JIN Yanjiao,MA Yongqiang,et al. Numerical analysis of fluid field and temperature field of oil-immersed transformer[J]. Transformer,2017,54(5):22-26.
- [11] 谢裕清,李琳,宋雅吾,等.油浸式电力变压器绕组温升的多物理场耦合计算方法[J].中国电机工程学报,2016,36(21):5957-5965.
XIE Yuqing,LI Lin,SONG Yawu,et al. Multi-physical field coupled method for temperature rise of winding in oil-immersed power transformer[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(21):5957-5965.
- [12] 周利军,唐浩龙,王路伽,等.基于多面体网格剖分的油浸式变压器三维温度场及油流场仿真[J].高电压技术,2018,44(11):3524-3531.
ZHOU Lijun,TANG Haolong,WANG Lujia,et al. Simulation on three-dimensional temperature field and oil flow field of oil-immersed transformer based on polyhedral mesh[J]. High Voltage Engineering,2018,44(11):3524-3531.
- [13] 井永腾,王宁,李岩,等.电磁-热-流弱耦合的变压器绕组温升研究[J].电机与控制学报,2019,23(10):41-48.
JING Yongteng,WANG Ning,LI Yan,et al. Research on temperature rise of transformer windings with electromagnetic-thermal-flow weak coupling[J]. Electric Machines and Control,2019,23(10):41-48.
- [14] 邹明继,吴琦,马璐瑶,等.三相三柱式配电变压器负载特性对其空载损耗在线检测的影响[J].电工技术学报,2019,34(S2):493-500.
ZOU Mingji,WU Qi,MA Luyao,et al. Influence of load characteristics of three-phase and three limbs distribution transformer on on-line detection of no-load loss[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(S2):493-500.
- [15] LIAO Caibo,RUAN Jiangjun,LIU Chao,et al. 3-D coupled electromagnetic-fluid-thermal analysis of oil-immersed triangular wound core transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2014,50(11):1-4.
- [16] 陆彪,汤凯,陈德敏,等.低压开关柜母线温度场数值计算与分析[J].电工电能新技术,2020,39(10):65-71.
LU Biao,TANG Kai,CHEN Demin,et al. Thermal field calculation and analysis of low-voltage switchgear busbar[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2020,39(10):65-71.
- [17] CORDOBA P A,SILIN N,DARI E. Natural convection in a cubical cavity filled with a fluid showing temperature-dependent viscosity[J]. International Journal of Thermal Sciences,2015,98:255-265.
- [18] CORDOBA P A,DARI E,SILIN N. A 3D numerical model of an ONAN distribution transformer[J]. Applied Thermal Engineering,2019,148:897-906.
- [19] 张静,李峻峰,何军,等. DSC法测变压器油比热容的研究[J].变压器,2012,49(10):48-50.
ZHANG Jing,LI Junfeng,HE Jun,et al. Research on specific heat capacity of transformer oil measured by DSC[J]. Transformer,2012,49(10):48-50.
- [20] 刘菊. 固体界面接触热阻及导热系数测量的实验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
LIU Ju. The experimental research on measurement of thermal contact resistance of two contacted solids and thermal conductivity[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2011.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 电力变压器 第2部分:液浸式变压器的温升:GB/T 1094.2—2013[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.

管理委员会. 电力变压器 第7部分:油浸式电力变压器负载导则:GB/T 1094.7—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[23] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京:机械工业出版社,2014: 91-92.

作者简介:

邓永清(1992—),男,江西贵溪人,博士研究生,主要研究方向为高电压与绝缘技术、变压器多物理场分析与热点温度反演检测(E-mail:1481200109@qq.com);



邓永清

阮江军(1968—),男,浙江绍兴人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为高电压与绝缘技术、电磁场数值分析及其工程应用(E-mail: ruan308@126.com);

龚宇佳(1995—),女,湖北咸宁人,硕士,主要研究方向为高电压技术与多物理场耦合计算(E-mail:970311867@qq.com)。

(编辑 任思思)

Three dimensional thermal fluid field simulation of 10 kV transformer based on parameter thermal equivalence

DENG Yongqing¹, RUAN Jiangjun¹, GONG Yujia², HUANG Daochun¹, ZHAO Qingyuan³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

3. Benxi Power Supply Company of Liaoning Electric Power Co., Ltd., Benxi 117000, China)

Abstract: The three-dimensional simulation of transformer temperature fluid field is an important method to accurately calculate the winding hot spot temperature. As the winding structure is complex, the winding modeling and mesh generation considering the detailed conductor and insulation are difficult, and the calculation efficiency is low, which is difficult to meet the actual engineering needs. A simplification method based on parameter thermal equivalence for the winding structure of 10 kV distribution transformer is proposed. The block conductor with anisotropic thermal conductivity and equivalent specific heat capacity are used to replace the actual winding structure, and the method is applied to calculate the three dimensional thermal fluid field of a S13-M-200 kV·A / 10 kV oil immersed transformer. In order to verify the simulation model, the transformer temperature rise test based on the short circuit method is carried out. The results show that thermal equivalent parameter method can greatly reduce the mesh number of transformer, and the temperature calculate results can effectively reflect the axial winding temperature distribution, the maximum error between simulation and test result is less than 4%, which proves the validity and accuracy of the proposed method.

Key words: oil-immersed transformer; thermal fluid field; thermal equivalence; hot-spot temperature

附录



(a) 正视图 (b) 俯视图

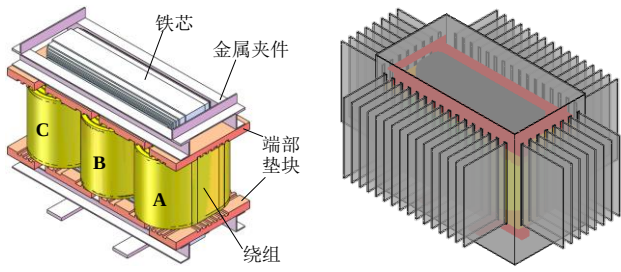
图 A1 10kV 配电变压器绕组结构

Fig.A1 Structure of 10 kV distribution transformer winding



图 A2 S13-M-200kV A/10kV 配电变压器

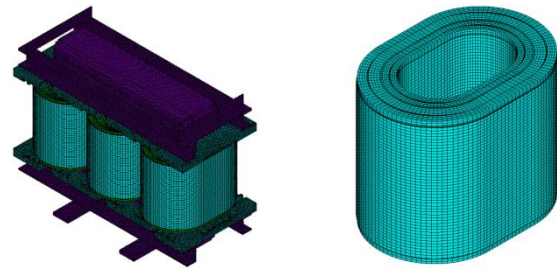
Fig.A2 S13-M-200kV A/10kV transformer



(a) 内部结构整体 (b) 外壳结构

图 A3 变压器三维仿真模型

Fig.A3 Transformer overall internal structure model



(a) 内部结构整体网格 (b) 绕组映射剖分

图 A4 变压器内部结构剖分

Fig.A4 Mesh grid of transformer internal structure

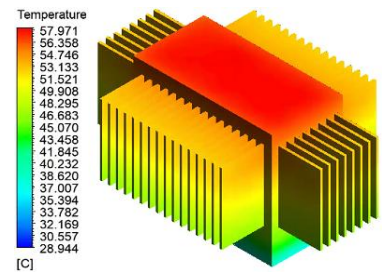
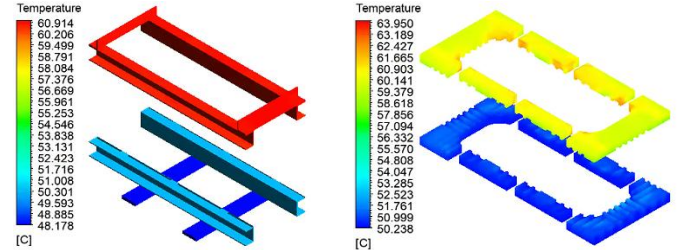


图 A5 变压器外壳温度场分布

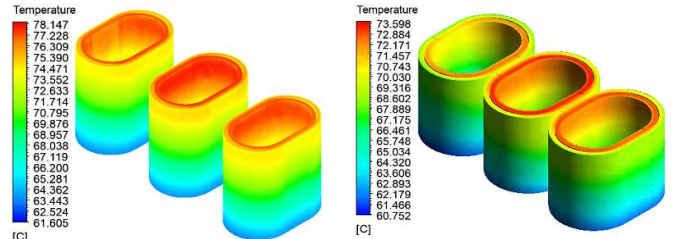
Fig. A5 Temperature field distribution of transformer shell



(a) 金属夹件 (b) 绕组端部垫块

图 A6 变压器内部结构件温度分布

Fig.A6 Winding temperature distribution of transformer internal structure



(a) 低压绕组 (b) 高压绕组

图 A7 高、低压绕组温度分布

Fig.A7 Winding temperature distribution of HV and LV winding

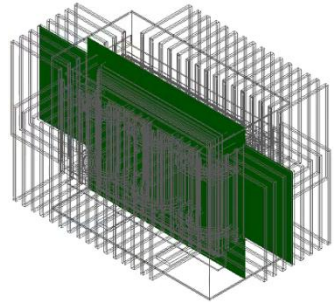


图 A8 变压器宽边截面设置

Fig.A8 Setting of transformer wide side section

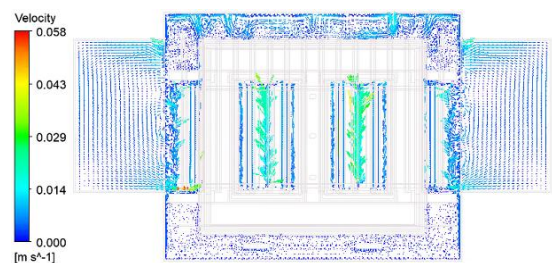


图 A9 变压器内部流体场分布

Fig.A9 Fluid field distribution inside transformer

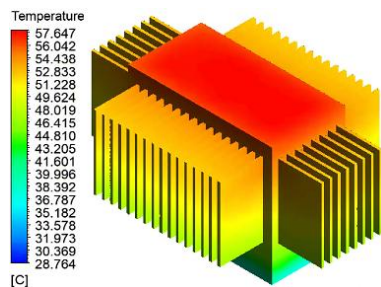
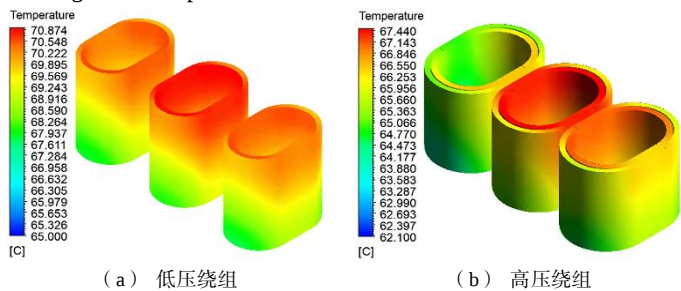


图 A10 变压器外壳温度场分布

Fig. A10 Temperature field distribution of transformer shell



(a) 低压绕组

(b) 高压绕组

图 A11 高低压绕组温度分布

Fig.A11 Winding temperature distribution of HV and LV winding