

树脂绝缘干式变压器内部温度场的计算

邢雅¹樊博²康亚丽¹李伟²丁旭元¹杨秀川¹张浩淼²舒一飞²

(1. 国网宁夏电力公司培训中心 银川 750002;

2. 国网宁夏电力公司电力科研院研究院 银川 750002)

摘要: 树脂绝缘干式变压器内部局部温度过高会导致绝缘老化加速,大大降低变压器的使用寿命。以SC9系列一台低压箔绕单风道高压线绕无风道的树脂绝缘干式变压器为研究对象,建立了简化二维轴对称物理模型。利用该模型,通过ANSYS有限元软件仿真得到了干式变压器内部的稳态温度场。同时,还利用热路解析法,建立了干式变压器的等效热路模型。通过测量变压器表面周围空气的温度,分别对干式变压器内部的稳态温度场和暂态温度场进行了求解,并开发出基于Visual Basic的计算程序。

关键词: 树脂绝缘;干式变压器;温度场;ANSYS;热路法

中图分类号: TM413 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4017

Temperature field calculation of cast-resin dry-type power transformers

Xing Ya¹ Fan Bo² Kang Yali¹ Li Wei² Ding Xuyuan¹ Yang Xiuchuan¹ Zhang Haomiao² Shu Yifei²

(1. State Grid Ningxia Electric Power Company training center, Yinchuan 750002, China;

2. Power Science Research Institute of State Grid Ningxia Power Co., Yinchuan 750002, China)

Abstract: The local temperature of Cast-resin dry-type power transformer overheated can largely reduce the service life of dry-type power transformer. In this thesis, a SC9 cast-resin dry-type power transformer whose foil-type LV winding has one air duct and layer-type HV winding has no duct is investigated. A simplified 2D axisymmetric physical model of dry-type power transformer is established. A finite element analyzing software ANSYS is used to simulate the steady-state temperature field of the cast-resin dry-type power transformer. This thesis also establishes and analyzes the dry-type transformers' equivalent thermal circuit model by using the analytic method of thermal circuit. The transient temperature field and the steady-state temperature field of the dry-type power transformer are respectively solved by using the method of thermal circuit based on measured surrounding air temperature, furthermore, a computer program based on Visual Basic is developed.

Keywords: cast-resin insulation; dry-type transformers; temperature field; ANSYS; thermal circuit

1 引言

以环氧树脂作为绝缘介质的干式变压器与油浸式变压器相比,由于其具有体积小、损耗低、安全可靠、维护简单、可深入负荷中心等优点,所以近年来得到迅速发展^[1-2]。

到目前为止,变压器热设计一般是依据多年实际经验和一些实验研究成果进行计算^[3]。这种方法不能直观地反映变压器内部温度场的分布情况,特别是对于材料较多、结构比较复杂的干式变压器情况,设计值和实测值之间存在明显的误差,不能够反映铁芯和绕组温度场的所有温度数值。随着干式变压器绝缘系统温度等级的提高,最热点

温升和平均温升之差也增大。另外,为监视绝缘老化速度的热电偶的具体埋设地点也需要通过变压器内部的温度来确定。因此仿真计算干式变压器内部温度场,对于改进干式变压器热设计和安排温控装置的测点位置,具有十分重要的意义。

本课题采用两种方法来对干式变压器进行仿真计算,首先利用ANSYS有限元软件仿真计算树脂绝缘干式变压器内部的稳态温度场。其次建立和分析干式变压器的等效热路模型,从而分别对干式变压器内部的稳态温度场和暂态温度场进行求解,并开发出基于Visual Basic的计算软件。两种方法为树脂绝缘干式变压器的热设计及结构优化提供了依据。

2 干式变压器温度场有限元模型

2.1 变压器温度场的导热微分方程和求解边界条件

对于稳态、常系数、具有内热源的二维温度场,在圆柱坐标系下的导热偏微分方程可以表示如下^[4-5]。

导线所在部分:

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

绝缘材料所在部分:

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

式中: $t(r, z, \varphi)$ 为温度函数, q_v 为内热源体积生热率/(W/m³), λ 为材料的导热系数(W/(m·K))。

研究稳态温度场时,具有对流和辐射的热边界条件是典型的第 3 类边界条件,即:

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = h \cdot (t_w - t_f) \quad (3)$$

式中: h 为壁面综合换热系数(W/(m²·K)), t_w 为壁面平均温度(℃); t_f 为环境温度(℃); n 为表面的外法线方向。

2.2 变压器内部温度场的有限元模型

以 SC9 系列的某一台低压箔绕单风道高压线绕无风道树脂浇注干式变压器为例,由于变压器绕组在结构上三相对称,且每相绕组沿轴向对称,因此可将三维温度场转换为二维温度场来计算。某一相的结构简图如图 1 所示。

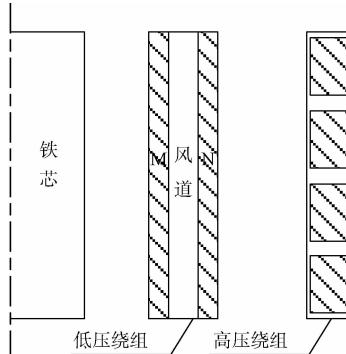


图 1 干式变压器某相的二维结构

2.2.1 变压器各组成部分的尺寸及物性参数

铁芯由冷轧硅钢片叠装而成,硅钢片的导热系数 λ 为 23.0 W/(m·K)。铁芯外层涂绝缘漆油,辐射率为 0.90。

低压绕组有两个包封,两个包封分别用绝缘树脂浇注成型,并且在端部浇注较厚的包封。高压绕组为分段线绕式,共分为 4 段。铜导线的导热系数 λ 为 398.0 W/(m·K)。绝缘树脂的导热系数 λ 为 0.207,辐射率为 0.90。变压器的其他结构参数如表 1 所示。

2.2.2 铁芯和绕组的生热率

铁芯中磁滞和涡流损耗是引起变压器铁芯温度升高的主要因素,由该系列变压器厂家提供的试验数据可知每相铁芯的空载损耗 P_0 约为 206.6 W。

表 1 干式变压器结构参数

结构名称	数值/mm	结构名称	数值/mm
铁芯直径	133.5	低压绕组外包封厚度	12
铁芯与低压绕组内包封之间气道厚度	15.25	低压绕组外包封与高压绕组之间气道厚度	18.6
低压绕组内包封厚度	10	高压绕组的厚度	25
低压绕组内外包封之间气道的厚度	15		

绕组的发热主要由电阻损耗引起。低压绕组内外包封在 120 ℃时的负载损耗分别为 358.7、462.0 W。高压绕组在 120 ℃时的损耗为 799.8 W。由于导线电阻率随温度的变化而变化。高、低压绕组的实际损耗可根据式(4)来计算^[6]。

$$P = P_{120} \frac{235 + t}{235 + 120} \quad (4)$$

式中: P_{120} 为绕组在 120 ℃时的损耗(W); t 为绕组的平均温度(℃)。

将铁芯和铜导线所在的部分作为发热源。单位体积发热量可由式(5)求得。

$$q_v = \frac{P}{V} \quad (5)$$

式中: V 为各部分热源的体积(m³)。

变压器在运行时,各组成部分的平均温度一般为 90~120 ℃^[7],取绕组的平均温度为 100 ℃,可得各部分的体积生热率如表 2 所示。

表 2 变压器各部分的平均损耗及体积生热率

结构名称	材料名称	平均损耗/W	体积生热率/(W·m ³)
铁芯	冷轧硅钢	206.6	16 268
低压绕组内包封	铜	337.18	66 927
低压绕组外包封	铜	434.28	55 899
高压绕组	铜	1 033.8	54 814

2.2.3 变压器实体模型建立及网格剖分

根据变压器的器身结构、材料属性,分别对铁芯、低压绕组内外包封和高压绕组采用四方型网格进行剖分。其中铁芯的节点数为 2 548。低压绕组内外包封的节点数均为 910。高压绕组各包封间绝缘树脂的节点数为 75,导体部分的节点数为 800。所建立的变压器的仿真模型以及网格剖分情况如图 2 所示。

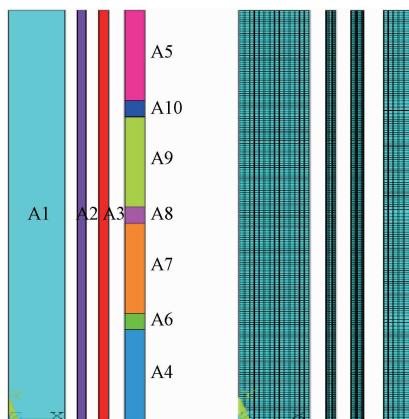


图 2 干式变压器仿真模型及有限元剖分图

2.2.4 边界条件的确定

变压器各部分热量的散发是通过表面对流和辐射两种形式来实现的。对于高压绕组外表面以及铁芯上下两个端面,由于其表面平均温度与外界环境温度相差较大,辐射换热和对流换热的效果相当^[8],由于热辐射为高度非线性,为了求解方便可以根据公式将辐射换热的效果换算为当量的

对流换热系数 Δh 。两表面之间的辐射换热量可简化为:

$$q_{1,2} = \epsilon_1 \times 5.67 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (6)$$

取铁芯的两个端面以及高压绕组外表面平均温度为 100 ℃,则:

$$\epsilon \times 5.67 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \Delta h \times (T_1 - T_2) \quad (7)$$

式中: T_1 为铁芯两端面或高压绕组外表面的绝对温度,373 K; T_2 为周围环境的绝对温度,298 K; ϵ 为辐射率。计算可得 $\Delta h \approx 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

而组成各个气道的侧面与周围气道内空气温度相差较小,这些侧面主要依靠对流换热方式,辐射换热可以忽略不计^[9]。实际对流换热系数值一般为 10~14 W/(m² · K)^[10]。文献[7]认为干式变压器中通过绕组上下两个端部散出的热量与从侧面散出的热量相比可以忽略不计,故计算温度场时将变压器绕组上下两个端面看成为绝热面。

由于沿着变压器高度的增加,绕组及气道内的温度逐渐升高,换热条件变差,换热系数从下到上逐渐减小,将各部分从上到下分成 6 段。折算后的综合换热系数如表 3 所示。

表 3 变压器各部分局部换热系数分布(从上到下)

分段编号	低压绕组内包封 局部换热系数 (内/外)/ (W · (m ² · K) ⁻¹)	低压绕组外包封 局部换热系数 (内/外)/ (W · (m ² · K) ⁻¹)	高压绕组局部 换热系数 (内/外)/ (W · (m ² · K) ⁻¹)	铁芯侧表面局部 换热系数/ (W · (m ² · K) ⁻¹)	铁芯上下表面局部 换热系数/ (W · (m ² · K) ⁻¹)
1	9/6	6/9	9/17	9	
2	10/7	7/10	10/18	10	
3	11/8	8/11	11/19	11	
4	12/9	9/12	12/20	12	22/22
5	13/10	10/13	13/21	13	
6	14/11	11/14	14/22	14	

气道的平均温度取进口温度和出口温度的算术平均值,取铁芯和低压绕组气道中空气的平均温度为 45 ℃。高压绕组取气道的平均温度为 55 ℃。低压绕组内外包封气道的平均温度为 70 ℃。外界环境的温度为 25 ℃。干式变压器各边界条件的施加情况如图 3 所示。

2.3 温度场仿真计算结果

计算得到的干式变压器及其各组成部分的稳态温度分布云图如图 4~8 所示。

铁芯、低压绕组内外包封和高压绕组沿高度方向的温度分布曲线如图 9~12 所示。

3 热路法计算干式变压器的温度场

3.1 变压器等效热路模型的建立

变压器在运行时,铁芯、低压绕组内外包封、高压绕组

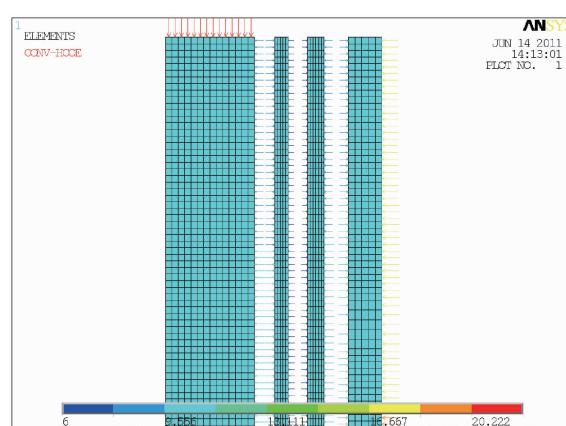


图 3 干式变压器边界条件的施加

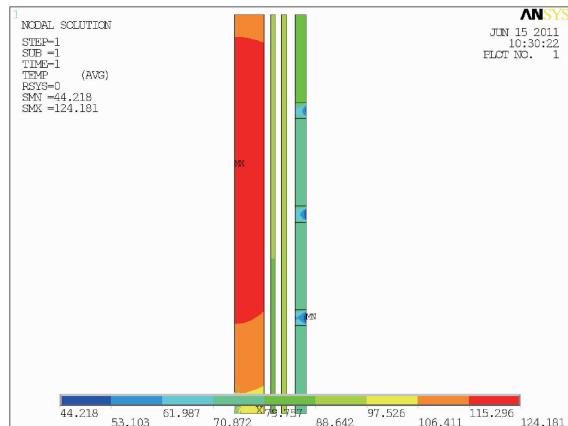


图 4 干式变压器稳态温度分布云图

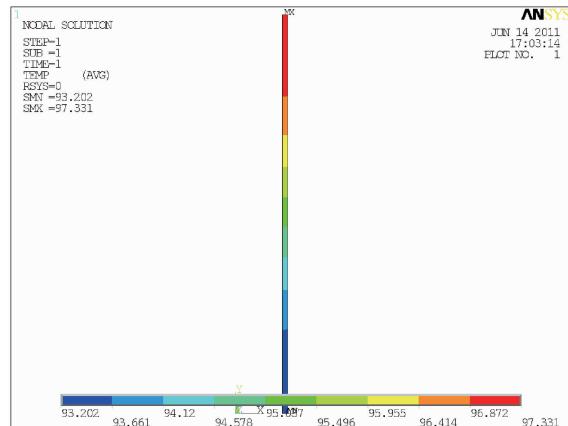


图 7 低压绕组外包封稳态温度分布云图

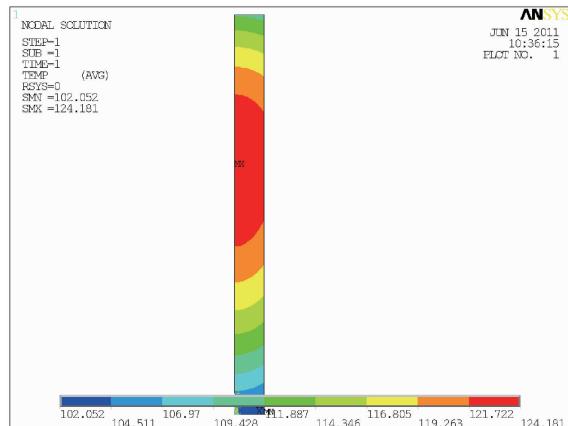


图 5 铁芯稳态温度分布云图

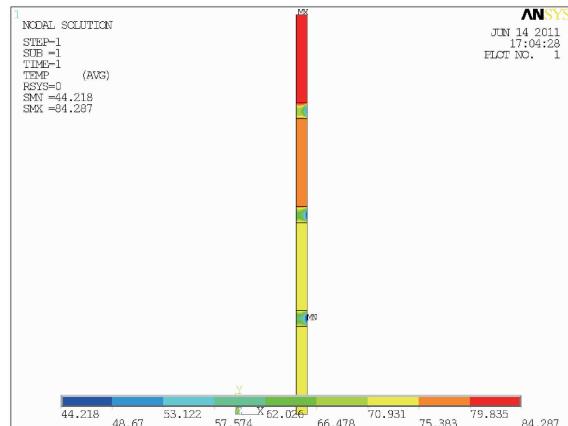


图 8 高压绕组稳态温度分布云图

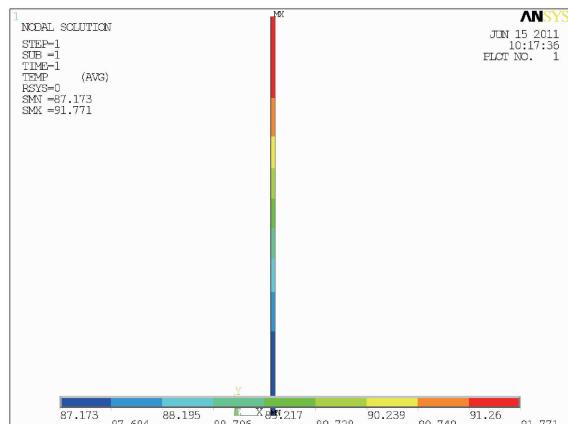


图 6 低压绕组内包封稳态温度分布云图

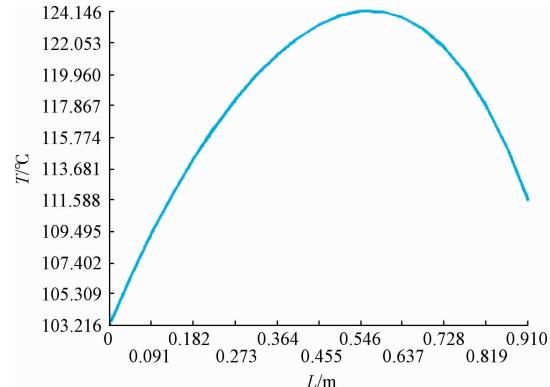


图 9 铁芯沿高度方向的温度分布曲线

等均会产生损耗,发出热量而建立热流场。热流场和热路中的物理量与电流场和电路中的物理量有相似的对应关系^[11]。干式变压器各层均为同轴圆柱结构,其横剖面示意图如图 13 所示。

将分布参数用集中参数的热路模型^[12-14]进行等效,考虑暂态过程时,每一层可用一个热阻 R 、热容 C 环节等效,忽略固体介质内部的传导热阻,气道内流体部分的热阻分别由传导热阻、对流热阻和辐射热阻并联组成。固体部分:

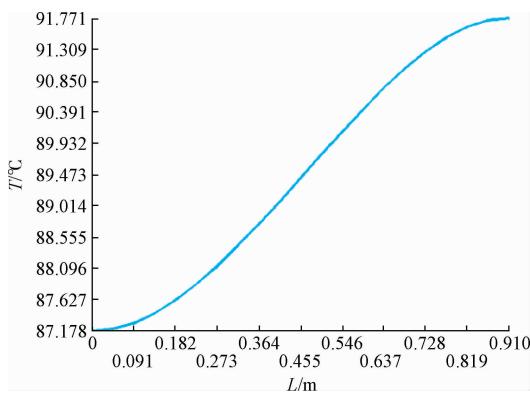


图 10 低压绕组内包封沿高度方向的温度分布曲线

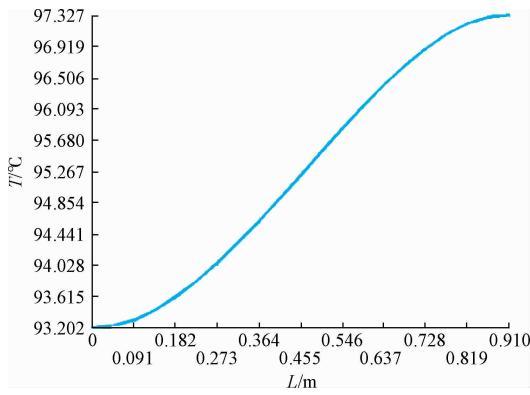


图 11 低压绕组外包封沿高度方向的温度分布曲线

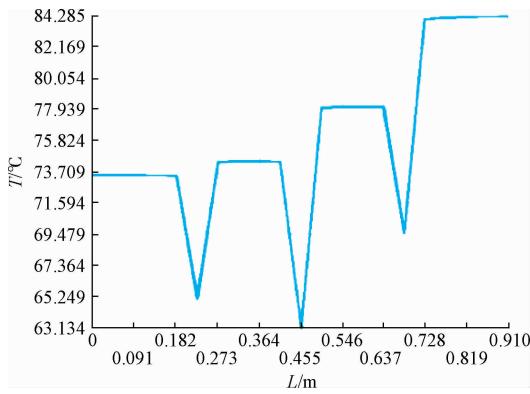


图 12 高压绕组沿高度方向的温度分布曲线

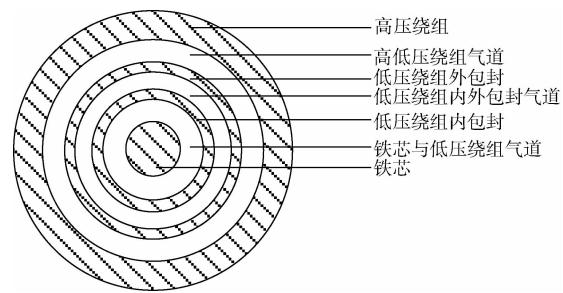


图 13 干式变压器横剖面

$$\begin{cases} R_i = \frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{2\pi\lambda_i l} \\ C_i = V_i \times c_i \end{cases} \quad (8)$$

流体(空气)部分:

$$\begin{cases} R_{\text{cond}} = \frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{2\pi\lambda_i l} \\ R_{\text{conv}} = \frac{1}{h\pi D_i l} \\ R_{\text{rad}} = \frac{T_i - T_{i+1}}{\varepsilon\sigma(T_i^4 - T_{i+1}^4)\pi D_i l} \\ C_i = V_i \times c_i \end{cases} \quad (9)$$

式中: D_i 为不同层的内径(m), σ 为一玻尔兹曼常数, c_i 为该层材料单位体积的热容值($J/(K \cdot m^3)$)。

3.2 稳态时的等效热路模型

当时间足够长时,热路将达到稳定状态,此时热容部分可视为开路,干式变压器稳态下的等效热路图如图 14 所示。

$T_e(t)$ 为周围环境温度,为可测量的已知量,列出各个节点的热流守恒方程:

$$\begin{cases} \frac{T_1 - T_2}{R_2} = Q_1 \\ \frac{T_2 - T_1}{R_2} + \frac{T_2 - T_3}{R_3} = Q_2 \\ \frac{T_3 - T_2}{R_3} + \frac{T_3 - T_4}{R_4} = Q_3 \\ \frac{T_4 - T_3}{R_4} + \frac{T_4 - T_5}{R_5} = Q_4 \\ T_5 = T_e(t) \end{cases} \quad (10)$$

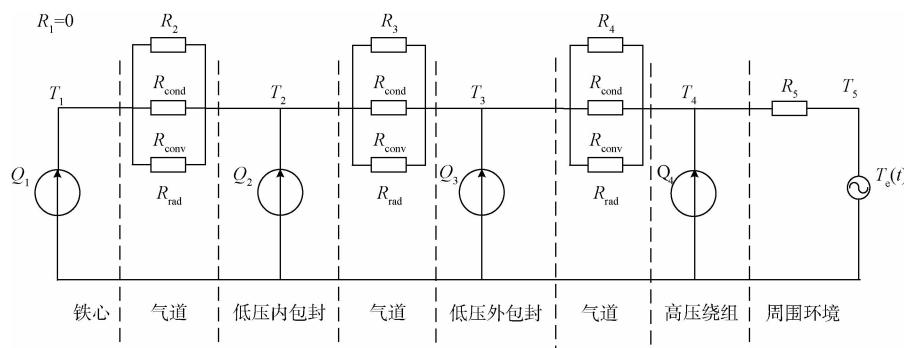


图 14 干式变压器稳态等效热路图

式中: $T_1, T_2, T_3, T_4, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$ 分别为铁芯、低压绕组内外包封、高压绕组的平均温度(℃)及平均损耗(W)。式(10)可用矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ T_e(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} & -\frac{1}{R_3} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_3} & \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_4} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_4} & \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} & -\frac{1}{R_5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

通过求解该矩阵式(11)便可得到变压器内部各部分的平均温度。

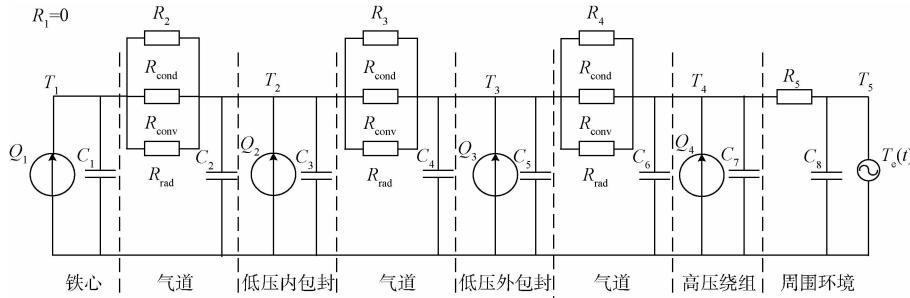


图 15 干式变压器暂态等效热路图

取离散时间间隔为 Δt , 则有:

$$\frac{dT_i}{dt} \approx \frac{T_i(t + \Delta t) - T_i(t)}{\Delta t} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{C_1}{\Delta t} + \frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{(C_2 + C_3)}{\Delta t} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} & -\frac{1}{R_3} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_3} & \frac{(C_4 + C_5)}{\Delta t} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_4} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_4} & \frac{(C_6 + C_7)}{\Delta t} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} - \frac{1}{R_5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

微分方程组(13)的初始条件为 $T_i(0) = T_e(0), i = 1, \dots, 5$, 依次迭代得变压器各层的温度。

3.4 Visual Basic 计算软件的开发

基于热路法编制了干式变压器内部稳态和暂态温度场的计算软件, 计算界面中的变压器参数取该干式变压器的基本参数, 详见表 1~3。分别点击“瞬态计算”和“稳态计算”, 在界面上便可显示出干式变压器各部分的暂态温

3.3 暂态时的等效热路模型

稳态下变压器内部温度的计算, 其前提是假设影响变压器温度变化的外界因素都不发生变化。这一假设并不具有普遍性, 变压器绕组中的电流是波动的^[15], 变压器外部周围环境温度也会随时间的不同而发生变化, 所以一般情况下需要考虑变压器温度变化的暂态过程。考虑暂态过程的计算是要计及各部分热容的作用。干式变压器暂态下的等效热路图如图 15 所示。

同稳态时的求解方法, 得到各个节点的热流守恒方程:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dT_1}{dt} + \frac{T_1 - T_2}{R_2} = Q_1 \\ (C_2 + C_3) \frac{dT_2}{dt} + \frac{T_2 - T_1}{R_2} + \frac{T_2 - T_3}{R_3} = Q_2 \\ (C_4 + C_5) \frac{dT_3}{dt} + \frac{T_3 - T_2}{R_3} + \frac{T_3 - T_4}{R_4} = Q_3 \\ (C_6 + C_7) \frac{dT_4}{dt} + \frac{T_4 - T_3}{R_4} + \frac{T_4 - T_5}{R_5} = Q_4 \\ T_5 = T_e(t) \end{cases} \quad (12)$$

$$T_5 = T_e(t)$$

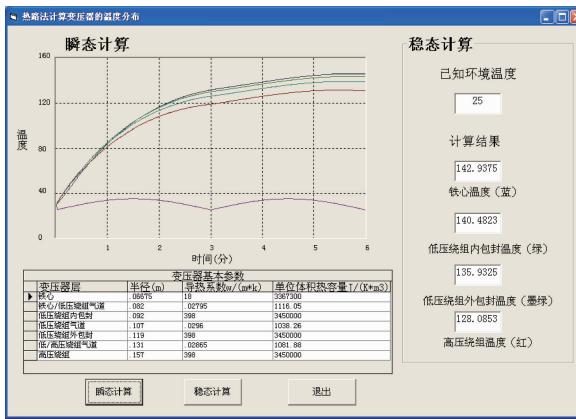


图 16 热路法计算干式变压器温度场的结果显示

的位置,这是由于铁芯上下表面都要通过对流和辐射进行换热,使得最高温度不在铁芯顶端。计算结果较符合干式变压器正常运行的平均温度 90~120 °C。

2) 低压绕组内外包封是由铜箔导线整张连续缠绕成型的,由于壁面换热条件的变化使得内部温度沿着轴向逐渐增高的,内包封温度的变化范围为 87~91 °C, 外包封温度的变化范围为 93~97 °C。对于分段结构的高压绕组,导线部位的温度沿着高度的增加而逐渐增高,导体内部温度的变化范围为 74~84 °C。这是由于随着高度的增加,壁面的散热条件变差所致。段与段之间存在较厚的树脂包封,包封的绝缘材料导热系数小,会形成较大的温度梯度,该段处的壁面温度要比轴向相邻导体所在部位温度值低。

3) 高压绕组的平均温度低于低压绕组的平均温度。这是由于高压绕组外表面同时存在对流和辐射两种换热机制,而低压绕组内外包封以对流换热为主,辐射换热可忽略,因此高压绕组的换热条件较好。在设计和运行时,低压绕组热点位置的温度值更应该受到重视。

4) 本文计算所得高低压绕组的平均温度比变压器正常运行温度低。这是由于实际干式变压器的绕组由多种导热介质组成,而在本文中将高低压绕组区域等效成一种均匀的铜材料,增加了绕组内部热传导的传热效果。

5) 由基于热路法的变压器温度场计算结果可知,铁芯的温度为 143 °C, 低压绕组内包封的温度为 140 °C, 低压绕组外包封的温度为 136 °C, 高压绕组的温度为 128 °C。由于热路法本身理论的欠精确性而导致计算结果比变压器正常运行温度高很多。使用热路法计算的干式变压器内部温度场的结果较使用 ANSYS 有限元仿真计算得到的结果的精确度要差,并且用热路法只能计算变压器的平均温度,而有限元法能够计算出变压器各个点的温度,该方法的计算结果更符合实际情况。

参考文献

[1] 赵振刚,高立慧,李川,等.基于 FBG 测温与热路模型

的绕组热点温度研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 294-300.

- [2] MOONHEE L, HUSSEIN A, JAN C, et al. Temperature distribution in foil winding for ventilated dry-type power transformers [J]. Electric Power Systems Research, 2010(80): 1065-1073.
- [3] 滕黎,陈伟根,孙才新,等.油浸式电力变压器动态热路改进模型[J].电网技术,2012,36(4):236-241.
- [4] 刘达,彭敏放,万勋,等.基于行波分析的变压器绕组匝间短路故障定位[J].仪器仪表学报,2015,36(9): 2091-2096.
- [5] 朱海兵,李晓健,吴奕,等.变压器温度场分布的热流耦合分析[J].南京工程学院学报:自然科学版,2015,13(3):74-78.
- [6] 彭积城,蔡金锭.油纸绝缘变压器老化特征分析[J].电子测量与仪器学报,2014,28(7):763-769.
- [7] 谢蓉,张星,关亮,等.强迫油循环冷却变压器内部温度场数值模拟[J].电力科学与工程,2012,28(10): 47-52.
- [8] 刘国坚,王丰华.油浸式电力变压器温度场分布的计算分析[J].科学技术与工程,2015,15(32):36-41.
- [9] 刘秉安.漏感与分布电容对单激式变压器输出波形影响[J].国外电子测量技术,2012,31(4):53-56.
- [10] 梁义明,敖明,朱大铭,等.变压器片式散热器传热特性优化分析[J].变压器,2015,52(4):32-34.
- [11] 赵志刚,李光范,李金忠,等.基于有限元法的大型电力变压器抗短路能力分析[J].高电压技术,2014,40(10):3214-3220.
- [12] 熊烂,赵艳龙,杨子康.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.
- [13] 唐建东.基于 ModbusRTU 的变压器油微水变送器设计[J].电子测量技术,2013,36(5):111-113.
- [14] 王宇翔,王建民,刘建新,等.油浸式变压器绕组涡流损耗及温升分布研究[J].电力科学与工程,2011,27(1):28-31.
- [15] 陈书敏,石玉美.变压器用散热器空气侧传热计算[J].变压器,2012,49(4):12-14.

作者简介

邢雅(通讯作者),1989 年出生,硕士研究生,主要从事变电站运行与维护技术。

E-mail: 651712274@qq.com

樊博,1989 年出生,硕士研究生,主要从事计量装置检测技术工作。

康亚丽,1985 年出生,硕士研究生,主要从事变电站运行与维护工作。

李伟,1966 年出生,高级工程师,本科,主要从事高压计量装置智能化检测与管理工作。

丁旭元,1985年出生,硕士研究生,主要从事电力营销工作。

杨秀川,1989年出生,硕士研究生,主要从事输电线路运行与检修工作。

(上接第29页)

参考文献

- [1] 王建明,伍光新,周伟光.盲源分离在雷达抗主瓣干扰中的应用研究[J].现代雷达,2010,32(10):45-49.
- [2] 王文涛,张剑云,刘兴华,等.JADE盲源分离算法应用于雷达抗主瓣干扰技术[J].火力与指挥控制,2015,40(9):104-108.
- [3] 柯熙政,刘娜.基于盲源分离的自适应抗干扰算法研究[J].电波科学学报,2011,26(3):587-592.
- [4] 周静雷,江浩,乔站仙.基于ARM与DSP的声频数据采集系统设计[J].电子测量技术,2015,35(10):102-106.
- [5] 石庆研,吴仁彪,钟伦珑.单通道最优恒模自适应干扰抑制方法[J].电子与信息学报,2011,33(5):1126-1130.
- [6] 高飞,吴瑛,张莉.解析恒模算法性能分析[J].现代雷达,2006,28(5):42-46.

(上接第33页)

- [12] 李志坚,胡金辉,陈小刚,等.船载雷达角度零值动态标定方法研究[J].电子测量技术,2013,36(1):26-28.
- [13] 刘敏,雷斌.靶场光电经纬仪测量数据的误差分析及数据处理[J].国外电子测量技术,2007,26(11):12-14.
- [14] 赵馨,王世峰,佟首峰,等.舰载雷达零位标校新法[J].火力与指挥控制,2010,35(2):169-171,176.
- [15] 王录,路建功,张维宁.精密测量雷达常规标校误差校正参数研究[J].雷达与对抗,2013,33(1):1-5,41.

张浩森,1978年出生,本科,主要从事互感器检定检测工作。

舒一飞,1989年出生,本科,主要从事计量装置检测技术工作。

- [7] 苏斌,刘畅.基于FPGA的脉冲压缩处理器设计与实现[J].电子测量技术,2014,37(7):57-61.
- [8] 罗德与施瓦茨(中国)科技有限公司.复杂电磁环境雷达干扰模拟器的实现[J].国外电子测量技术,2015,34(7):10-12.
- [9] 丑永新,张爱华,杨晓华.基于改进滑窗迭代DFT的动态脉率变异性提取[J].仪器仪表学报,2015,36(4):812-821.
- [10] 刘明亮,朱江森.数字信号处理对电子测量与仪器的影响研究[J].电子测量与仪器学报,2014,28(10):1041-1046.

作者简介

魏迅,1992年生,硕士研究生,主要研究方向为雷达信号处理及自适应抗干扰。
E-mail:13260905261@163.com

- [16] 房新兵,毛南平,刘向前,等.船载测控雷达无塔角度标校新方法[J].电讯技术,2010,50(12):116-120.
- [17] 马可.通用仪表在雷达试验中的应用[J].舰船电子工程,2016,36(5):136-139.
- [18] BARTON D K.雷达系统分析与建模[M].北京:电子工业出版社,2007.

作者简介

马可,1988年出生,硕士、工程师,主要研究方向为雷达总体工程