

基于参数等效及改进混合剖分的变压器绕组 温升研究

刘振邦^{1,2}, 杜志叶³, 黎鹏^{1,2}, 李根³, 牛航^{1,2}, 李炳昊⁴

(1. 湖北省输电线工程技术研究中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443300; 3. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072; 4. 南方电网科学研究院, 广州 510663)

摘要: 变压器绕组热点温度是制约其带负载能力和运行寿命的决定性因素。以一台 S20-M-630 kVA/10 kV 油浸式配电变压器为研究对象, 建立了包含外壳散热片在内的三维电磁-温度-流体耦合模型。针对其绕组内部结构复杂、流固边界层网格质量差、计算效率低下等问题, 提出了绕组参数等效方法与结合映射剖分和自由剖分的混合网格剖分技术。该方法不仅显著提升了绕组热点温度的计算精度, 还优化了流固边界层的网格质量, 大幅提高了计算效率。结果表明: 绕组参数等效方法能有效反映变压器实际工作中绕组的温度分布, 混合剖分相比与全自由剖分达到相同结果下的整体三维网格数量和仿真时间分别减少了 73.60%、82.50%, 绕组热点温度仿真值与试验值相对误差不超过 1%。

关键词: 油浸式变压器; 热点温度; 混合剖分; 耦合模型; 参数等效

Research on Temperature Rise in Transformer Windings Based on Parameter Equivalence and Improved Hybrid Profiling

LIU Zhenbang^{1,2}, DU Zhiye³, LI Peng^{1,2}, LI Gen³, NIU Hang^{1,2}, LI Binghao⁴

(1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Load capacity and operating life are governed by the hot spot temperature of the transformer windings. A three-dimensional electromagnetic-temperature-fluid coupling model including the shell heat sink is established with an S20-M-630 kVA/10 kV oil-immersed distribution transformer as the research object. Aiming at the problems of complex internal structure of the winding, poor mesh quality of the fluid-solid boundary layer, and low computational efficiency, a winding parameter equivalence method and a hybrid mesh profiling technique combining mapping profilings and free profilings are proposed. The method not only significantly improves the accuracy of the calculation of the winding hot-spot temperature, but also optimises the mesh quality of the fluid-solid boundary layer, which significantly improves the calculation efficiency. The results show that in actual transformer operation, the winding temperature distribution can be effectively reflected by the winding parameter equivalence method, and compared with free profiling, hybrid profiling reduces the overall number of 3D meshes and simulation time by 73.60% and 82.50%. The relative error between the simulated and experimental values of the winding hot-spot temperature shall not exceed 1%.

Key words: oil-immersed transformer; hot-spot temperature; hybrid profiling; coupling model; parameter equivalence

0 引言

变压器在电力输送中起着关键作用,其内部温度分布决定其带负载能力和使用寿命,精确获取内部温度分布能够提高变压运行的安全性与可靠性^[1-4]。

目前变压器温升计算方法总体上可以分为两类:第一类是基于热电类比的热网络法^[5-6]。文献[7]对油材料参数做出修正,提出了基于顶层油温的绕组热路模型。文献[8-10]建立了更为准确的基于底层油温的绕组热路模型。热路模型法虽然易于理解,但受限于变压器的运行数据,且无法准确描述变压器内部温度分布。

第二类是基于数值分析的计算机模拟法^[11-14]。数值分析法的优点在于计算精度和计算效率较高,因此在仿真领域中得到了广泛的应用。文献[15]采用数值计算的方法分析了绕组内部油流分布。文献[16]考虑了温度对材料的传热系数和电导率的影响并计算了不同工况下绕组内部温度分布结果。文献[17]采用电磁-温度-流体多物理场耦合的方法计算了一台自耦变压器的温度流体场,仿真结果与试验结果的相对误差在3.5%以内。文献[18-20]使用有限元方法对变压器进行了多物理场耦合分析,获取了绕组热点温度。文献[21]提出了基于有限差分和有限体积相结合的多物理场耦合分析方法,计算了三维下绕组的温升。文献[22]建立了一台单相变压器的四分之一模型,在剖分网格时采用多面体网格剖分方法,该方法下的仿真结果与试验结果最大温差为3.71℃,最大程度上减少了网格数量,提高了计算效率。文献[23]采用最小热阻力法则对绕组进行等效,二维下等效绕组的温升与热点位置与考虑了绕组匝间绝缘的结果基本吻合。对于三相变压器,研究二维模型难以准确描述实际变压器内部温度流体分布,由于变压器内部结构复杂,难以建立三维精细化模型,并在剖分网格时会造成网格数量达到数千万级,不利于变压器仿真计算。因此对变压器内部结构的合理简化并选择合适的网格剖分方法对变压器温度多物理场计算的准确性和速度具有重要意义。

本文以一台额定容量为630 kVA/10 kV的油浸式配电变压器为研究对象,首先建立了该变压器三维磁场模型,使用有限元法计算了变压器外壳和夹

件上的杂散损耗,而后将损耗作为热源,再通过有限体积法求解变压器内部温度场以及流体场。在温度-流体场分析中,本文采用了热导率等效的方法对绕组进行等效,简化了绕组模型,并提出一种网格剖分的新方法,通过对仿真结果的对比分析,验证了该方法的有效性和准确性。

1 理论基础

本文采用间接耦合的方法对变压器进行了电磁-温度-流体场耦合分析,即将电磁场的计算所得的各损耗作为热源载荷施加到变压器温度-流体场中以达到耦合目的。

1.1 电磁场损耗计算理论

在变压器运行过程中,变压器热源主要来自于铁心以及绕组损耗,其中铁心损耗大小与铁心内部的磁通密度分布密切相关,因此需要先对变压器内部磁场分布进行求解计算,其本质就是对麦克斯韦方程组在特定条件下进行求解,结合麦克斯韦方程组及磁通连续性原理可以推导出电磁场控制方程^[24],如式(1)所示。

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J} - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (1)$$

式中: ∇ 为纳布拉微分算子; μ 为磁导率; $\mathbf{A}$ 为矢量磁位; $\mathbf{J}$ 为电流密度; σ 为电导率; t 为时间。

变压器热源损耗 Q 可由式(2)获得^[25]。

$$Q = \frac{1}{\sigma} \int_V \mathbf{J}^2 dV \quad (2)$$

式中 V 为电流密度所在区域的体积。

1.2 温度-流体场控制方程

变压器油作为油浸式变压器内部的流体散热介质,其温度-流体场控制方程可以使用质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程描述。当忽略流体密度的时间变化时,可以得到微分形式的控制方程如式(3)~(5)所示^[14]。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = \rho \mathbf{f} + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{v}) = \rho q + \nabla \cdot (k \nabla T) - P \nabla \cdot \mathbf{v} + S \quad (5)$$

式中: $\mathbf{v}$ 为流体流速; ρ 为流体密度; $\mathbf{f}$ 为流体体积力; μ 为流体的动力粘度; q 为流体热源; P 为流体压力; e 为流体内能; k 为流体导热系数; T 为流体温度; S 为流体热能。

1.3 油箱边界条件

本文考虑了外部环境因素和变压器油箱外壳对外辐射的影响，并在变压器外壳以及散热片上添加等效的对流换热系数，以描述变压器与外界环境的热交换过程。竖直板的努谢尔数 N_{uv} 和水平板的努谢尔数 N_{uh} 可表示为^[26-29]：

$$N_{uv} = \{ 0.825 + \frac{0.387 R_a^{1/6}}{[1 + (0.492/P_r)^{9/16}]^{8/27}} \}^2 \quad (6)$$

$$N_{uh} = 0.27(R_a)^{1/4} \quad (7)$$

式中： P_r 为普朗特数； R_a 为瑞利数。

求得努谢尔数后代入对流换热公式中，如式(8)所示。

$$h = (N_u \cdot k)/L \quad (8)$$

式中： N_u 为努谢尔数； k 为空气热导率； h 为对流换热系数； L 为油箱外壳特征长度。

变压器外壳辐射产生的热量 q_r 可通过式(9)表示。

$$q_r = \alpha \varepsilon (T_1^4 - T_2^4) \quad (9)$$

式中： α 为斯忒藩-玻尔兹曼常数； ε 为物体表面辐射率； T_1 和 T_2 分别为热辐射物体与被辐射物体的温度。

2 变压器损耗计算

2.1 仿真模型

本文研究对象为S20-M-630 kVA/10 kV油浸式配电变压器，变压器实际结构如图1所示。



图1 S20-M-630 kVA/10 kV 变压器

Fig. 1 S20-M-630 kVA/10 kV transformer

图2为铁心以及绕组区域的结构图，高压绕组为扁铜线绕制而成，低压绕组则为箔式绕组，高低压绕组内外侧均有绝缘纸筒包裹，为了考虑绕组间油流的影响，在高压与高压、低压与低压以及高低压绕组之间用撑条相隔开，绝缘端部位于绕组上下两端，油箱四周共安装46块散热片，其中正面14片，侧面9片。绕组及整体模型图如图3所示。

相关变压器参数如表1所示。

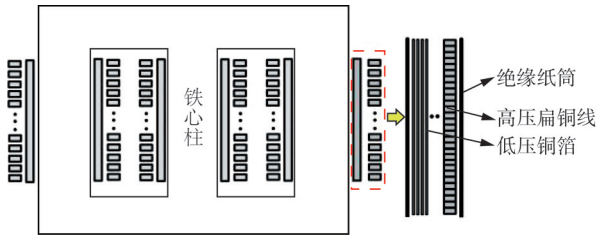


图2 铁心及绕组基本模型

Fig. 2 Basic model of iron core and winding

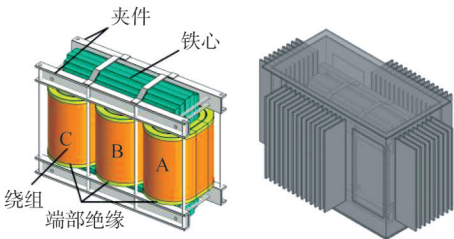


图3 变压器仿真模型

Fig. 3 Transformer simulation model

表1 变压器相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of transformers mm

部位	数值	部位	数值
低压内/外径	85/119	铁心窗高	505
高压内/外径	124/163	油箱长	1 130
绕组高度	389	油箱宽	530
铁心总长	815	油箱高	900
铁心总高	765		

2.2 变压器损耗分析及计算

变压器空载损耗主要由铁心损耗构成，在变压器工作时，反复交变的磁场会导致磁性材料发生磁滞现象，这种磁滞现象会导致材料内部分子自由度发生变化，从而产生磁滞损耗。此外，铁心导体在随时间变化的磁场中，导体内部还会感应出电流，使导体发热而产生损耗，这一部分损耗为涡流损耗，异常损耗是一种特殊的涡流损耗，在铁心损耗中的占比非常小，涡流损耗和异常损耗在本次仿真研究中忽略。变压器绕组损耗以及金属夹件杂散损耗等称为变压器负载损耗。

本文采用有限元法计算变压器额定状态下的外壳以及夹件上的杂散损耗，铁心的空载损耗根据实际变压器测试获得，通过仿真与实际测试获得各部位额定状态下的损耗分布情况如表2所示。

表 2 额定负载下变压器损耗分布

Tab. 2 Distribution of transformer losses under rated load

		W	
部位	损耗	部位	损耗
低压绕组	1 787.29	夹件	6.84
高压绕组	2 318.79	油箱	17.35
铁心	472		

3 温度-流体场分析

3.1 传热分析与散热分析

在变压器正常运行中, 由电磁场作用下产生的铁损和铜损等视作变压器热源作用于温度一流体场, 热量交换过程如图 4 所示。图 4 中各种损耗会产生大量的热量, 此热量以固体热传导方式传递至绕组、铁心表面, 继而通过对流换热的方式将热量再次传递到变压器油中, 变压器油受热膨胀后向上流动, 再与外壳进行热交换, 油流经冷却后流向散热片并向下流动, 再次受热后继续向上流动进而形成循环, 热量最终通过此路径传递至油箱外壳与散热片壁面并散发到空气中。

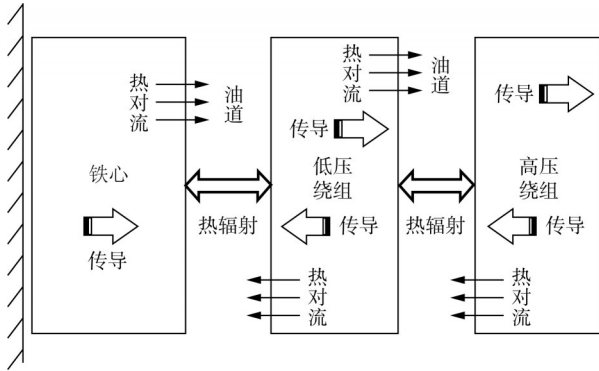


图 4 变压器热量传递方式

Fig. 4 Heat transfer method of transformer

3.2 绕组参数匀质化等效计算

由于绕组内部结构复杂, 仿真时需要对其内部结构进行简化, 高压绕组采用铜扁线并以多层圆筒式绕制, 共 909 匝, 低压绕组则采用铜箔绕制, 共 20 层, 每两层铜箔之间还有绝缘油纸相隔, 为加强散热, 高压绕组中间与低压绕组中间都存在半油道, 高低压绕组之间有全油道, 油道中均匀布有撑条, 在绕组上下布置绝缘端部加强绝缘。

若将以上结构采用精细化建模并剖分会导致网格数量达到数千万级, 难以进行求解计算, 并且不

利于仿真计算。因此, 本文考虑将绕组部分等效, 即将绕组导体和绕组导体表面漆包层以及绕组层间绝缘的绝缘油纸等效成一个整体, 考虑到仿真的精确性, 就需要对绕组材料进行参数等效, 绕组等效示意图如图 5 所示。

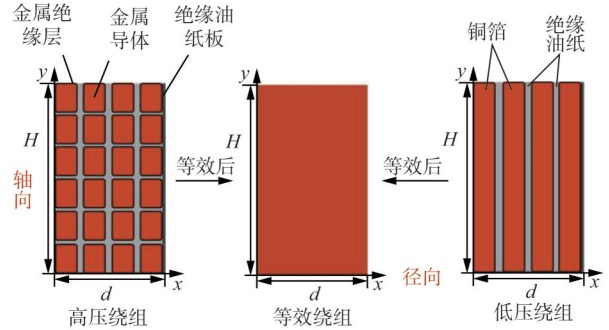


图 5 绕组等效示意图

Fig. 5 Equivalent schematic diagram of winding

材料在单位面积下的热阻 R_{th} 和厚度 d 与热导率 k 的关系如式(10)所示^[30]。

$$R_{th} = d/k \quad (10)$$

高压绕组采用铜扁线绕制, 绕组层与层之间填有 4 张绝缘油纸, 则其高压绕组径向等效热阻如式(11)所示。

$$R_{thr} = R_{thr1} + R_{thr2} + R_{thr3} \quad (11)$$

式中: R_{thr} 为绕组径向等效热阻; R_{thr1} 为导线铜导体热阻; R_{thr2} 为导线绝缘漆热阻; R_{thr3} 为绝缘油纸热阻。由式(11)可得到高压绕组整体的径向热导率 K_r 如式(12)所示。

$$K_r = \frac{d_r k_1 k_2 k_3}{d_{r1} k_2 k_3 + d_{r2} k_1 k_3 + d_{r3} k_1 k_2} \quad (12)$$

式中: d_r 为绕组径向总厚度; d_{r1} 为径向铜导体总厚度; d_{r2} 为径向绝缘漆总厚度; d_{r3} 为径向绝缘油纸总厚度; k_1 为变压器绕组铜导体热导率; 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。

高压绕组轴向方向上由于不存在绝缘油纸, 故其在轴向上的等效热阻如式(13)所示。

$$R_{tha} = R_{tha1} + R_{tha2} \quad (13)$$

式中: R_{tha} 为高压绕组轴向等效热阻; R_{tha1} 为铜导体热阻; R_{tha2} 为铜导线绝缘漆热阻。

同理可得高压绕组整体轴向等效热导率 K_a 如式(14)所示。

$$K_a = \frac{k_1 k_2 (d_{a1} + d_{a2})}{d_{a1} k_2 + d_{a2} k_1} \quad (14)$$

式中： d_{a1} 为轴向铜导体总厚度； d_{a2} 为轴向绝缘漆总厚度。

由于低压绕组为铜箔绕制，铜箔表面没有绝缘漆涂层，故低压绕组径向等效热阻如式(15)所示。

$$R_{\text{thrd}} = R_{\text{thrd1}} + R_{\text{thrd2}} \quad (15)$$

式中： R_{thrd} 为低压绕组径向等效热阻； R_{thrd1} 为铜箔导体层热阻； R_{thrd2} 为绝缘油纸热阻。

由式(15)可得低压绕组在径向上的等效热导率 K_{rd} 如式(16)所示。

$$K_{\text{rd}} = \frac{d_{\text{rd}} k_1 k_3}{d_{\text{rd1}} k_1 + d_{\text{rd2}} k_3} \quad (16)$$

式中： d_{rd} 为低压绕组径向总厚度； d_{rd1} 为低压径向铜导体总厚度； d_{rd2} 为低压径向绝缘油纸总厚度。

铜箔在轴向上是连续的导体，故低压绕组轴向等效热导率就是铜导体的热导率。

经过等效后高低压绕组都被分成两部分，中间被撑条及油道隔开，如图6所示。

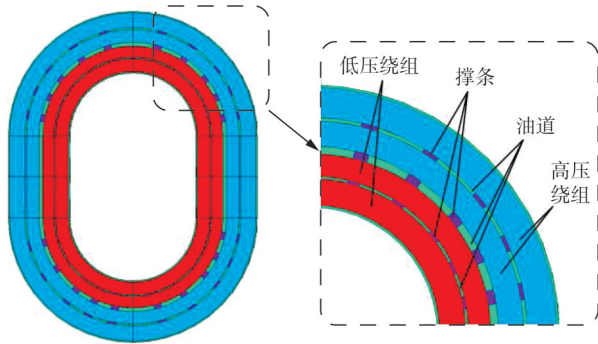


图6 高低压绕组及油道结构示意图

Fig. 6 High and low-voltage windings together with oil channels

根据式(10)—(16)可以计算出绕组的等效热导率参数，如表3所示。

表3 绕组等效热导率

Tab. 3 Equivalent thermal conductivities of winding

	$W \cdot (mK)^{-1}$	
热导率方向	高压绕组	低压绕组
轴向热导率	2.856	401
径向热导率	0.879 6	0.934 8
导线绕制方向热导率	401	401

3.3 混合网格剖分方法

在进行仿真计算时，无论是磁场还是流体场等，网格对仿真收敛性的影响很大。本文提出了一

种新的网格剖分方法，即混合网格剖分，此方法将重点关注部位优化成可以进行映射剖分的模块，若进行流体场仿真，可以将绕组及其附近的油流一同考虑成重点部位进行映射剖分，即六面体网格剖分。该方法剖分的网格形状均匀，网格质量高，且可以控制整体网格数量，其他非重点关注部位采用自由四面体网格剖分。全自由剖分方法是对整个变压器都采用自由四面体网格进行剖分。

针对本文模型，将绕组等效后与附近的边界层流体一同进行映射剖分，考虑流固边界层流体的流动特性，需保证绕组边界层流体的网格至少为3层。完成剖分后绕组网格剖面图如图7所示，除绕组及其油道外，变压器其他部件等都采用自由三角形网格剖分，以节省计算资源。整体网格剖分图如图8所示。

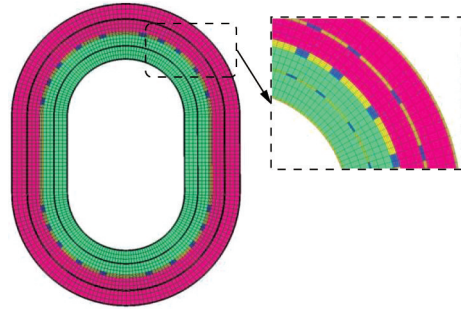


图7 绕组网格剖面图

Fig. 7 Cross section diagram of winding grid

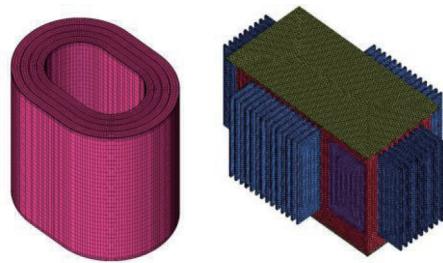


图8 绕组及整体网格剖分

Fig. 8 Winding and overall grid partitioning

剖分完成后的整体网格数量为 4.51×10^6 ，其中映射剖分下单相绕组与其边界层油网格数量为 2.404×10^5 。

3.4 温度-流体场仿真结果

在额定负载、环境温度为 25°C 的情况下，施加绕组等效热导率并计算得到高、低压绕组的温度分布如图9(a)、(b)所示，铁心、夹件及油箱外壳的温度分布分别如图10—12所示。

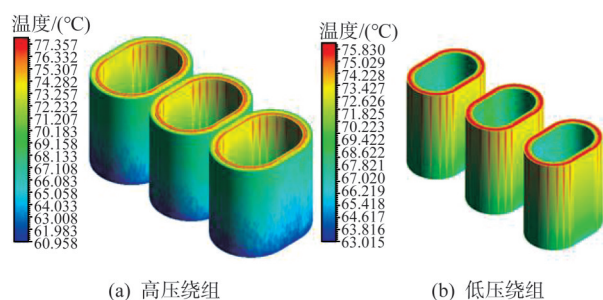


图 9 绕组温度分布

Fig. 9 Temperature distribution of windings

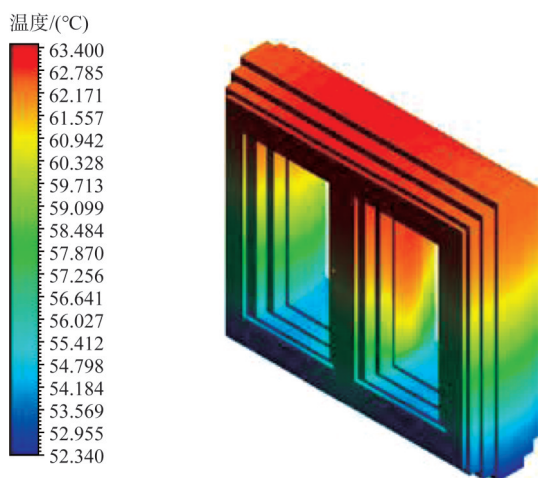


图 10 铁心温度分布

Fig. 10 Temperatures distribution of iron core

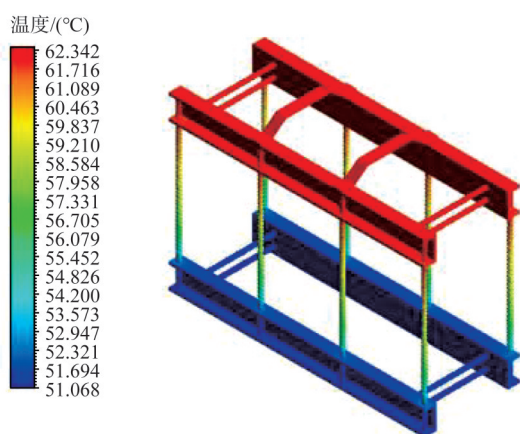


图 11 夹件温度分布

Fig. 11 Temperatures distribution of clamp

从图9绕组的温度分布可以看出, 绕组温度随绕组沿轴向升高, 这是由于绕组底部附近的油流吸收热量后向上流动, 导致绕组顶部散热条件相比底部较差。油箱外壳、铁心以及夹件上的温度都呈自下而上升高的趋势, 夹件紧贴铁心, 故而二者的温相差较小。绕组内部与撑条连接处出现局部发热的

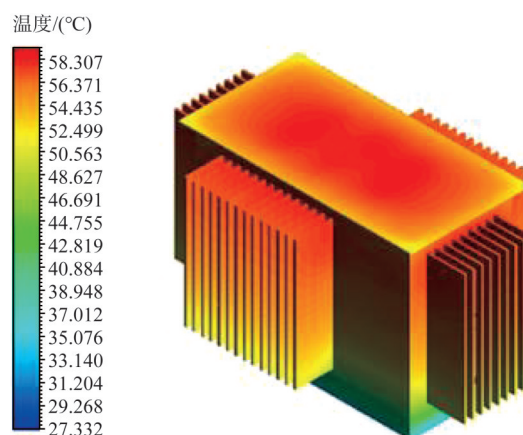


图 12 油箱外壳温度分布

Fig. 12 Temperatures distribution of transformer shell

情况是因为绕组与撑条紧密贴合, 导致绕组与撑条连接处的温度和周围油道的温度会产生明显温差。中间B相绕组的热点温度稍高于A、C相, 主要体现在A相与B相、B相与C相绕组的中间部分, 其油道狭窄, 散热较差。对于B相绕组来说, 其热点出现在B相高压绕组的上沿。

进一步提取图13所示的B相高、低压绕组中心轴向截线的温度分布, 如图14所示。由于低压绕组为箔式绕组, 在轴向上的传热较好, 故其中心轴向温度曲线较为平滑, 最热温度为75.76 °C, 出现在绕组顶端, 与最低温度相差2.32 °C; 而高压绕组为扁铜线绕制, 其轴向的温度分布与低压略有区别, 温度呈先增后减的趋势, 热点温度76.64 °C出现在绕组90 %高度处, 热点温升为51.64 °C, 满足设计要求, 绕组最高温度与最低温度相差11.08 °C。

此外, 提取了变压器宽边截面流速分布如图15

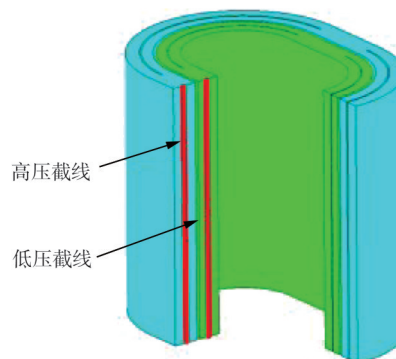


图 13 B相高低压绕组截线

Fig. 13 B-phase high and low voltage winding intercept

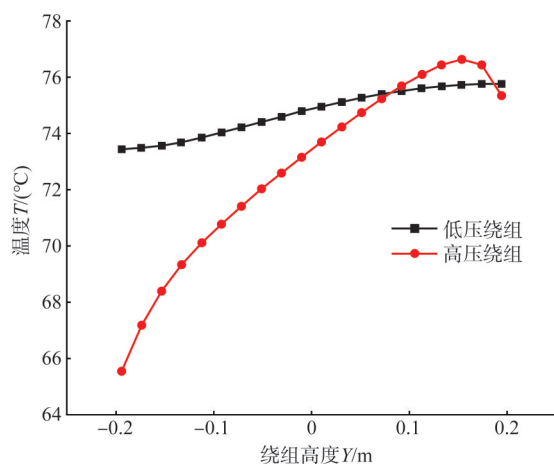


图 14 绕组轴向温度曲线

Fig. 14 Axial temperature curves of windings

所示。变压器油路的最高流速为 0.043 m/s，绕组层间油道的最高流速为 0.029 3 m/s，绕组层间油道中的油受热后向上流动，一部分油到达油箱顶部经过散热后流入散热片中再次散热并往下流动至油箱底部形成循环。

为了验证该绕组等效方法的有效性，对比了等效后施加各向异性热导率与未等效施加各向同性热导率绕组的温度分布，在保证环境温度、热源等其他边界条件都一致的情况下，将未等效绕组的热导率大小设置为 401。经过仿真后提取未等效 B 相绕

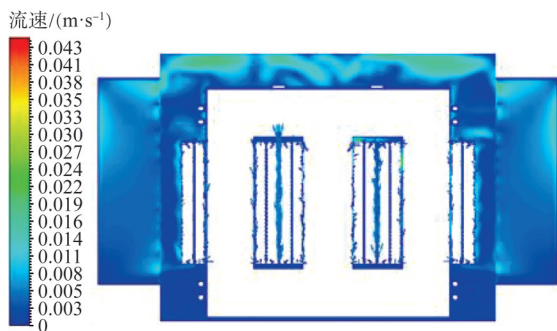


图 15 变压器截面流速

Fig. 15 Section speeds of transformer

组轴向上的温度分布曲线如图 16 所示，加载了各向同性热导率下高、低压绕组的温度都沿着绕组轴向方向升高，高低压绕组上下两端温度差分别为 1.26 °C、1.73 °C，这远远小于加载了各向异性热导率下高低压绕组上下两端的温差 11.08 °C 和 2.32 °C。绕组在施加热导率时需要考虑铜导线表面绝缘漆、绝缘油纸等影响因素。

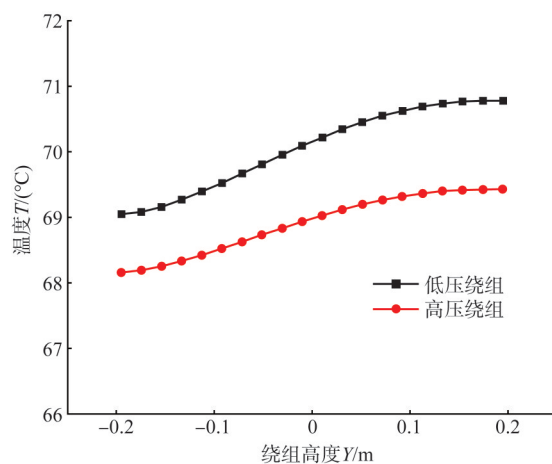


图 16 各项同性绕组轴向温度曲线

Fig. 16 Isotropic axial temperature curves of windings

在绕组施加各向同性热导率时，整个绕组都将被视作铜导体，这忽略了绕组导线漆包层、绝缘油纸等的影响，这些结构同样会影响对绕组的内部传热。实际中，绕组上下两端的温差较大，故在仿真分析时需要给绕组加载各向异性热导率，以更好地反映绕组的实际温度分布特征。

4 改进的混合网格剖分方法验证

4.1 网格剖分对比

为了验证自由与映射混合网格剖分方法的有效性，对比了全自由剖分方法与混合剖分方法，对比结果表明，混合网格剖分方法在于改变了绕组及其附近零部件以及绕组油道的网格，在全自由剖分的情况下要保证其他部位剖分尺寸与混合剖分尺寸一致，只能对绕组等设置不同的剖分尺寸，关键在于绕组油道及其流固边界层油的尺寸大小，由于绕组间油道本就狭小，故其剖分尺寸超过 0.008 7 m 就会导致剖分失败或者网格质量极差。选择剖分尺寸为 0.008 7 m 同样可以完成网格剖分，但考虑到 0.008 7 处在网格剖分失败的边缘，可能会导致仿真计算出现误差，所以选取 0.008 5 m 的油道剖分尺寸为最大剖分尺寸。

表 4 展示了绕组及其边界层油的剖分尺寸以及网格数量，在油道剖分尺寸为 0.004 m 时整体网格数量已经达到了 1 710 万，再细化整体网格数量就会过于庞大，影响仿真效率。

4.2 全自由剖分下的温度-流体场仿真结果

本次仿真仅展示网格数量为 571 万的结果，其

表 4 全自由剖分下的模型网格数量

Tab. 4 Number of model grids under fully free meshing

参数	数值					
绕组尺寸/m	0.01					
油道尺寸/m	0.008 5	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004
网格数量/万	511.12	571.25	677.88	805.42	1 088.39	1 710.26

他结果均以数据形式展示, 在网格数量为 571 万下高低压绕组的温度分布云图如图 17 所示。

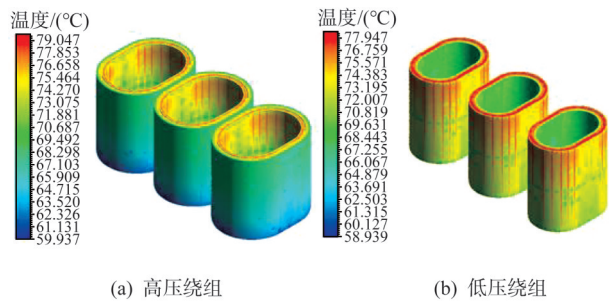


图 17 自由剖分绕组温度分布

Fig. 17 Temperatures distribution of free profiling windings

全自由剖分的仿真结果显示, 高低压绕组的热点温度相比于混合剖分高了 1~2 °C, 且高低压绕组表面的温度分布十分不均匀, 这是因为剖分边界油道时选择的网格太大, 导致在流固边界上的传热不稳定, 致使绕组表面温度出现“斑状”的现象。随着边界层网格尺寸的细化, 这一现象有较为明显的改善, 直到网格数量达到了 1 710.26 万时, 这一现象才会消失。随着网格数量的增加, 不仅耗费计算机资源, 也增加了仿真计算的时间, 降低了计算效率。

表 5 对比了改进混合剖分与全自由剖分下的绕组热点温度与仿真时长的关系。仿真结果显示, 改进混合剖分与全自由剖分 1 710.26 万网格下温度分布近似, 改进混合剖分的网格数量和仿真时间相比于全自由剖分分别减少了 73.60 %、82.50 %。

图 18 为变压器宽边截面的流速分布图, 绕组中最大流速达到了 0.053 m/s。与图 15 混合剖分方法下的截面流速对比, 图 15 中混合剖分下绕组油道中油流向上流动, 而图 18 中绕组油道中的油流以径向流动为主, 这也是由于绕组油道网格过大, 难以描述流固边界层的复杂结构和流动特性, 直接影响仿真中流固交互的准确性。

4.3 试验验证

本次变压器温升试验验证采用短路法^[31]对 S20-M-630 kVA/10 kV 油浸式配电变压器进行负载温升

表 5 混合剖分与全自由剖分仿真结果对比

Tab. 5 Comparison of simulation results between mixed partitioning and fully free partitioning

剖分方式	网格数量/ 万个	热点温度/°C		仿真时间/ min
		高压绕组	低压绕组	
全自由剖分	511.12	79.542	78.105	685
	571.25	79.047	77.947	799
	677.88	78.636	77.532	951
	805.42	78.103	76.522	1 136
	1 088.39	77.526	75.602	2 033
	1 710.26	77.168	75.411	3 062
改进混合剖分	451.48	77.357	75.830	536

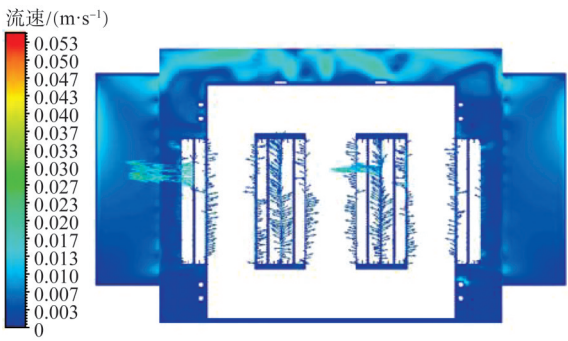


图 18 全自由剖分下变压器宽边截面流速

Fig. 18 Flow velocities of transformer wide side section under full free splitting

试验, 试验接线原理图如图 19 所示。

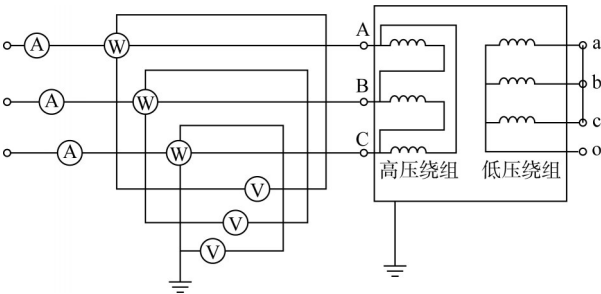


图 19 短路法试验接线图

Fig. 19 Short circuit method temperature rise test wiring diagram

本次试验采用光纤测温法对变压器绕组进行测温, 为使光纤探头测量所得温度更贴近绕组热点温度, 光纤上测温点位置就选择安装在绕组 90 % 高度处, 即最有可能是绕组热点的位置。绕组光纤安装示意图如图 20 所示。

本次试验共加载 0.9 倍额定负载率以及 1.0 倍额定负载率, 当测温点在 1 h 内温升变化小于

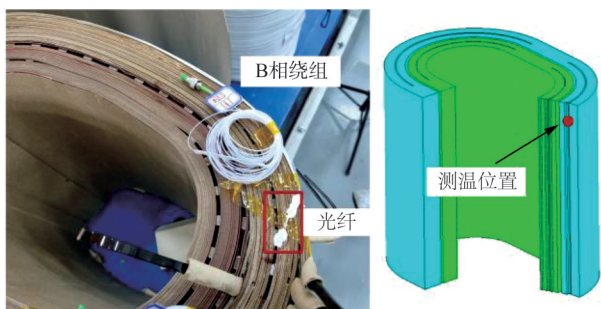


图 20 B相绕组光纤安装位置

Fig. 20 B-phase winding fibre optic installation position

0.5℃时认为温升已稳定,取稳定后的温度与仿真进行对比如表6所示。

表 6 仿真与试验结果对比

Tab. 5 Comparison of simulation and test results

环境温度/℃	负载率	仿真与试验值	B相热点温度
30.6	0.9倍	仿真值/℃	91.662
		试验值/℃	92.274
		相对误差/%	0.663
30.1	1.0倍	仿真值/℃	95.622
		试验值/℃	94.740
		相对误差/%	0.931

在0.9倍额定负载率情况下,B相热点温度仿真值为91.662℃,与试验值92.274℃仅相差0.612℃,相对误差为0.663%;在1.0倍额定负载率下,B相绕组热点温度相对误差也不超过1%,验证了本文方法的有效性与准确性。

综上所述,绕组参数等效方法目的在于简化模型,便于分析和计算,对于多层且具有均匀分布结构的物体,结合混合网格剖分方法能够得到较为准确的近似结果,在保证计算精度的同时提高计算效率。结合映射剖分和自由剖分的混合网格剖分方法具有明显的优势。这种方法可以更好地描述复杂的物理过程,如绕组的温度分布和狭小油道的流速。相比之下,全自由剖分方法存在一些限制和缺陷,可能导致网格的不稳定,局部流速异常等,影响计算结果的准确性。因此,在实际应用中,混合剖分方法是更好的选择。

5 结论

本文建立了油浸式变压器多物理场计算模型,使用有限元法与有限体积法对其进行了多物理场耦合温升计算,针对绕组参数匀质化等效、网格剖分

方法会对仿真结果产生怎样的影响作出了讨论,并进行了试验验证,对于今后变压器绕组温升研究具有一定的参考价值。

1)本文首先建立了三维电磁场模型,计算了变压器各部位的损耗分布,考虑了夹件以及油箱外壳的涡流损耗与杂散损耗,再将损耗加载到温度-流体场模型中进行计算,使计算结果更为准确。

2)计算温度-流体场时,先对绕组进行简化处理,并计算简化后绕组的各向异性热导率,对比了仅加载各向同性热导率和加载各向异性热导率下的绕组温度分布情况,仿真结果表明:加载绕组材料各向异性热导率后绕组整体温度分布符合实际情况,是十分有必要的,仅加载各向同性热导率并不能考虑绝缘油纸、漆包线等对绕组整体温度分布的影响。

3)本文采用映射剖分与自由剖分相结合的混合剖分方法对变压器整体进行剖分,对比分析了混合剖分方法与全自由剖分方法并进行了试验验证,结果表明:混合剖分方法比全自由剖分方法网格数量减少了73.60%,仿真时间减少了82.50%,B相绕组热点温度的试验值与仿真值误差不超过1%,验证了本方法的有效性与准确性。

参考文献

- [1] 杜志叶,肖湃,郝兆扬,等.基于绕组热点温度反馈的特高压交流变压器低频加热干燥方法研究[J].电工技术学报,2022,37(15):3888-3896.
DU Zhiye, XIA Pai, HAO Zhaoyang, et al. Study on low-frequency heating and drying method of UHVAC transformer based on temperature feedback of winding hot spot[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15): 3888 - 3896.
- [2] 邓永清,阮江军,董旭柱,等.基于自适应网格控制的10 kV油浸式变压器多物理场仿真计算[J].高电压技术,2022,48(8):2924-2933.
DENG Yongqing, RUAN Jiangjun, DONG Xuzhu, et al. Simulation of multi-physical field of 10 kV oil-immersed transformer based on adaptive grid control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 2924 - 2933.
- [3] 欧小波,周丹,林春耀,等.油浸式电力变压器老化及寿命评估研究综述[J].南方电网技术,2015,9(9):58-70.
OU Xiaobo, ZHOU Dan, LIN Chunyao, et al. Review of aging and life assessment of oil-immersed power transformer[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(9): 58 - 70.
- [4] 马秉伟,陈晓国,郑宇,等.电力变压器环保绝缘油研究进展与趋势[J].南方电网技术,2024,18(5):12-21,30.

- MA Bingwei, CHEN Xiaoguo, ZHENG Yu, et al. Research progress and trends of eco-friendly insulating oil for power transformer[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(5): 12–21,30.
- [5] SWIFT G, MOLINSKI T, LEHN W. A fundamental approach to transformer thermal modeling—part I: theory and equivalent circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 171–175.
- [6] 刘兴鹏. 基于热电类比理论的油浸式电力变压器热点温度计算模型[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [7] 陈伟根, 苏小平, 周渠, 等. 基于顶层油温的变压器绕组热点温度计算改进模型[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(5): 69–75. CHEN Weigen, SU Xiaoping, ZHOU Qu, et al. An improved dynamic model of transformer hot spot temperature based on top oil temperature [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(5): 69–75.
- [8] 杨平, 刘佳. 一种电力变压器热点温度计算模型[J]. 变压器, 2013, 50(12): 24–28. YANG Ping, LIU Jia. Calculation model of hot spot temperature of power transformer[J]. Transformer, 2013, 50(12): 24–28.
- [9] 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]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1635–1640. JIANG Taosha, LI Jian, CHEN Weigen, Thermal model for hot spot temperature calculation in oil-immersed transformers [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1635–1640.
- [10] 王丰华, 周翔, 高沛, 等. 基于绕组热分布的改进油浸式变压器绕组热点温度计算模型[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 895–901. WANG Fenghua, ZHOU Xiang, GAO Pei, et al. Improved thermal circuit model of hot spot temperature in oil-immersed transformers based on heat distribution of winding [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 895–901.
- [11] LIU C, RUAN J, WEN W, et al. Temperature rise of a dry-type transformer with quasi-3D coupled-field method[J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(7): 598–603.
- [12] 傅晨钊, 汲胜昌, 王世山, 等. 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. FU Chenzhao, JI Shengchang, WANG Shishan, et al. 2D numerical calculation of temperature field of winding in transformer[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(5): 10–12.
- [13] 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. 中国电机工程学报. 2016, 36(21): 5957–5965. XIE Y, LI L, SONG Y, 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.
- [14] 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.
- [15] TENBOHLEN S, SCHMIDT N, BREUER C, et al. Investigation of thermal behavior of an oil-directed cooled transformer winding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1091–1098.
- [16] PREIS K, BIRO O, BUCHGRABER Get al. Thermal-electromagnetic coupling in the finite-element simulation of power transformers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 999–1002.
- [17] 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.
- [18] JIA X, LIN M, SU S, et al. Numerical study on temperature rise and mechanical properties of winding in oil-immersed transformer[J]. Energy, 2022(239): 121788.1–121788.8.
- [19] SANTISTEBAN A, DELGADO F, ORTIZ A, et al. Numerical analysis of the hot-spot temperature of a power transformer with alternative dielectric liquids [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2017, 24(5): 3226–3235.
- [20] DASARA S, MISHRA V P. Shielding measures of power transformer to mitigate stray loss and hot spot trough coupled 3D FEA[J]. High Voltage, 2017, 2(4): 267–273.
- [21] 王永强, 马伦, 律方成, 等. 基于有限差分法和有限体积法相结合的油浸式变压器三维温度场计算[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3179–3185. WANG Yongqiang, MA Lun, LÜ Fangcheng, et al. Calculation of 3D temperature field of oil immersed transformer by the combination of the finite element and finite volume method[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3179–3185.
- [22] 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.
- [23] 沈楠, 刘刚, 王晓晗, 等. 基于最小热阻力法则的油浸式变压器绕组等效导热系数计算方法及应用[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(4): 60–68. SHEN Nan, LIU Gang, WANG Xiaohan, et al. Calculation and application of equivalent thermal conductivity of oil-immersed transformer windings based on the law of least thermal resistance [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2023, 50(4): 60–68.
- [24] 杜志叶. 工程电磁场数值分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2023.
- [25] 张伟, 咸日常, 刘焕国, 等. 出口短路故障对配电变压器绕组电热特性的影响[J]. 南方电网技术, 2025, 19(8): 141–149. ZHANG Wei, XIAN Richang, LIU Huanguo, et al. Impact of outlet short-circuit fault on the electrical-thermal characteristics of distribution transformer windings [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(8): 141–149.
- [26] 杜太行, 陈帆, 孙曙光, 等. 基于多物理场耦合的交流接触器动态特性研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 181–187. DU Taihang, CHEN Fan, SUN Shuguang, et al. Research on dynamic characteristics of AC contactor based on multi-physics coupling [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 181–187.
- [27] 龚嘉豪, 唐文虎, 蓝海娟, 等. 基于本征正交分解的SCB11–800/10型干式变压器温度场降阶模型及其过负荷绝缘热安全评估[J]. 广东电力, 2025, 38(7): 86–98.