

变压器绕组和挡油板结构对热点温度的影响规律

邹德旭¹, 彭庆军¹, 黎文浩², 洪志湖¹, 代维菊¹

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650032; 2. 南方电网科学研究院, 广州 510663)

摘要: 变压器热点温度是评估变压器安全运行状况以及负荷能力的重要指标。在相同运行条件下变压器热点温度更低意味着变压器运行更安全, 带载能力更强。变压器绕组结构和挡油板形成的油道结构会给变压器的热点温度带来一定影响。因此, 需要构建变压器热点温度仿真模型, 在建模时绘制不同结构的绕组和挡油板形成的油道来探究变压器内部结构对热点温度的影响。提出了一种基于 SpaceClaim 脚本语言的参数化建模的方法, 将变压器相关结构和位置参数设置为可改变的变量, 并通过运行脚本语言自动建模, 从而实现变压器的快速建模。基于所提出的参数化建模方法绘制了不同绕组和挡油板结构的变压器模型, 并通过有限体积法计算得到不同绕组和油道结构下的变压器热点温度分布。研究成果对指导变压器绕组和油道结构的设计具有重大意义。

关键词: 变压器; 热点温度; 参数化建模; 结构参数; 有限体积法

Influence Law of Transformer Winding and Oil Baffle Structure on Hot Spot Temperature

ZOU Dexu¹, PENG Qingjun¹, LI Wenhao², HONG Zhihu¹, DAI Weiju¹

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650032, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The hot spot temperature of a transformer is a crucial indicator for assessing its safe operation and load capacity. Under the same operating conditions, a lower hot spot temperature signifies safer transformer operation and greater load-bearing capability. The winding structure of the transformer and the oil channel formed by the baffle plates can significantly influence the hot spot temperature. Therefore, it is necessary to establish a simulation model for the transformer's hot spot temperature. During modeling, oil channels formed by windings and baffle plates of different structures are drawn to investigate the impact of the transformer's internal structure on the hot spot temperature. A parametric modeling method based on SpaceClaim scripting language is proposed, where the transformer's relevant structural and positional parameters are set as variable inputs, and automatic modeling is achieved by running the script, enabling rapid transformer modeling. Based on the proposed parametric modeling method, transformer models with different winding and baffle plate structures are drawn, and the hot spot temperature distribution under various winding and oil channel structures is calculated using the finite volume method. The research findings are of great significance for guiding the design of transformer winding and oil duct structures.

Key words: transformer; hot spot temperature; parametric modeling; structural parameter; finite volume method

0 引言

随着社会用电需求的逐年增长, 电力系统规模呈现持续扩大的趋势^[1]。变压器作为电力系统中电能传输与分配的核心设备, 提升其负荷能力对增加

电力系统容量至关重要^[2-5]。热点温度是衡量变压器安全运行状态与负荷能力的关键指标^[6]。若变压器长期处于高温运行状态, 易引发过热故障, 不利于电力系统的安全稳定运行^[7]。通过合理方法预测变压器热点温度并调配负荷, 虽能在保障安全的前提下提高负荷利用率, 但此类方法对提升变压器安全运行水平与负荷能力的作用较为有限^[8-9]。优化变压器内部结构设计有助于降低热点温度, 对保障

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51777179)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51777179).

其安全运行及提升负荷能力具有重要意义^[10-12]。

变压器运行过程中,铁心与绕组产生的热量通过热传导、热对流及热辐射3种方式向环境散发^[13]。其中,油道在散热过程中发挥着关键作用,优化油道结构可有效提升散热能力^[14]。变压器油道的导油性能与绕组线饼尺寸、线饼间距、挡油板位置、水平挡板间的线饼数量等因素密切相关,探究线饼与挡油板结构对热点温度的影响,可为变压器结构优化设计提供理论指导^[15]。

在实际生产中,变压器线饼的绕制与绝缘挡板的布置难度较大,通过实验探究绕组及挡油板结构对热点温度的影响,不仅成本高昂,且耗时费力。部分学者通过构建变压器热点温度仿真模型,在建模过程中调整绕组与挡油板结构参数,分析其对热点温度的影响^[16]。然而,变压器绕组线饼与绝缘挡板的结构复杂多变,线饼尺寸、线饼间距的变化,绝缘挡板的位置及水平绝缘挡板间的线饼数量等因素,均会改变绕组油道结构,进而影响散热性能。若采用手绘绘制几何图形的方式构建不同油道结构的变压器模型,建模过程将耗费大量时间^[17]。为解决几何结构调整导致的建模耗时问题,可采用参数化建模方法,通过设置关键参数控制绕组线饼与绝缘挡板的尺寸,实现油道结构的快速调整^[18]。只需修改参数并运行代码,即可生成不同几何结构的模型,从而高效探究绕组与挡油板结构对热点温度的影响。

本文采用SpaceClaim脚本语言,通过编写代码构建变压器温度场仿真的几何模型。代码中设置全局变量以控制绕组线饼与绝缘挡板的结构参数,修改变量并运行代码即可生成不同油道结构的热点温度仿真模型,实现参数化建模。基于该方法,本文探究了绝缘挡板相对水平油道的位置、水平绝缘挡板的起始位置、水平绝缘挡板间的线饼数量、线饼间距形成的水平油道间距及线饼尺寸对变压器热点温度的影响,研究结果对变压器绕组线饼与油道结构的优化设计具有重要指导价值。

1 变压器热特性分析

要分析变压器内部绕组线饼和绝缘挡板的结构对变压器热点温度的影响,首先需要了解变压器内部的传热过程和变压器油流动的规律。

1.1 变压器温度场与流场数学模型

变压器温度场和速度场受质量传递、动量传递和能量传递的共同影响,均满足纳维-斯托克斯方程条件^[19]。

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

x 方向的动量微分方程为:

$$\rho \left(u \frac{\partial \mu}{\partial x} + v \frac{\partial \mu}{\partial y} + w \frac{\partial \mu}{\partial z} \right) = \mu \nabla^2 u - \frac{\partial P}{\partial x} + S_x \quad (2)$$

y 方向的动量微分方程为:

$$\rho \left(u \frac{\partial \mu}{\partial x} + v \frac{\partial \mu}{\partial y} + w \frac{\partial \mu}{\partial z} \right) = \mu \nabla^2 v - \frac{\partial P}{\partial y} + S_y \quad (3)$$

z 方向的动量微分方程为:

$$\rho \left(u \frac{\partial \mu}{\partial x} + v \frac{\partial \mu}{\partial y} + w \frac{\partial \mu}{\partial z} \right) = \mu \nabla^2 w - \frac{\partial P}{\partial z} + S_z \quad (4)$$

能量微分方程为:

$$\rho c \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \nabla^2 T + Q \quad (5)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; μ 为运动粘性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; k 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; u 、 v 、 w 分别为流体速度的 x 、 y 和 z 方向分量, m/s ; P 为流体压力, Pa ; T 为流体温度, K ; S_x 、 S_y 、 S_z 为动量方程中的源项, J/m^3 ; Q 为单位体积中的发热量, J/m^3 ; $\nabla^2 u$ 、 $\nabla^2 v$ 、 $\nabla^2 w$ 分别为 u 、 v 、 w 的拉普拉斯算子。

高、低压绕组及铁心温度场满足导热微分方程^[17],如式(6)所示。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0 \quad (6)$$

式中: λ 为材料热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; q_v 为内热源强度,即物体在单位时间内产生的热量, J/s ; r 为铁心半径, mm 。

1.2 油浸式变压器内部的热传递过程

油浸式电力变压器运行时的负载损耗与空载损耗会使绕组、铁心等金属构件的温度升高,热量传递至金属表面后温度较低的绝缘油受热升温、密度降低;热油在潜油泵驱动或自身浮力作用下向顶部流动,沿油路流经散热片与油箱壁冷却,降温后密度增大并向下流动,形成油流循环^[20-21]。当变压器内部产生的热量与散热量相等时便达到热平衡状态^[22]。热量传递主要包含以下4个过程^[23-26]。

1)热传导过程:绕组、铁心等金属构件的热量

由金属中心向周围传播,属于金属导热过程;

2)热对流过程:热量传递至金属表面后金属与温度较低的绝缘油因温差存在发生对流换热,使油温上升;

3)绝缘油在油箱和散热片内流动,将热量传递至油箱与散热片表面;

4)油箱壁和散热片通过热对流与热辐射方式向周围环境散热。

通过在变压器绕组附近安装绝缘挡板,使其与绕组线饼形成水平油道和竖直油道,可引导变压器油的流动,有利于绕组线饼的散热^[27]。因此,变压器绕组线饼的尺寸、间距以及绝缘挡板的位置均会对变压器热点温度产生影响。

2 参数化建模的原理

参数化建模是指通过人为将某些几何尺寸和几何结构的位置设置成参数,这样,通过改变这些参数就能调整某些几何的尺寸以及几何结构的位置^[28]。具体例子如图1所示的两个矩形所示。

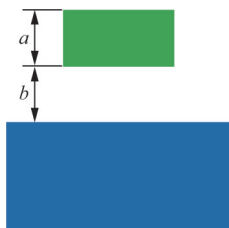


图1 参数化建模原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of parametric modeling principles

在如图1所示的例子中,假设需要控制小矩形的高度以及小矩形与大矩形的距离。可以将小矩形的高度设为 a ,小矩形与大矩形的距离设为 b 。通过将 a 和 b 设置成不同的值,就可以得到不同高度和距离的小矩形,实现小矩形的参数化建模。

为了更方便地进行参数化建模,可以使用SpaceClaim的脚本语言,通过编写绘制几何图形的代码,并运行代码,就能绘制出几何图形。在脚本语言代码中,可以人为设置某些几何结构的尺寸和位置为全局变量,通过改变这些全局变量的值就能轻松改变几何结构的尺寸和位置,构建出不同模型,更方便地实现参数化建模。

本文主要针对变压器线饼、油道、挡油板等结

构进行参数化建模,参数化建模脚本语言的主要代码结构如图2所示,通过参数化建模得到的变压器流-热场耦合二维等效模型如图3所示。

```
1 # Python Script, API Version = V23
2
3 ClearAll()
4 # 水平挡板的初始位置
5 position = 0
6 # 水平挡板间的绕组数
7 num = 10
8 # 绕组间距
9 d1 = (769-8.418*74)/73 # 低压绕组间距
10 d2 = (749-10.86*58)/57 # 中压绕组间距
11 # 绕组尺寸
12 l1 = 61 # 低压绕组宽度
13 h1 = 8 # 低压绕组高度
14 l2 = 62 # 中压绕组宽度
15 h2 = 10 # 中压绕组高度
```

(a) 控制变压器内部结构位置和尺寸的全局变量

```
235 # 低压绕组1号水平挡板
236 index = position
237 while index < 74:
238     point1 = Point2D.Create(MM(1560.42-D1-h1+D1/73*index),MM(278))
239     point2 = Point2D.Create(MM(1560.42-D1+D1/73*index),MM(278))
240     point3 = Point2D.Create(MM(1560.42-D1+D1/73*index),MM(274))
241     result = SketchRectangle.Create(point1, point2, point3)
242     index = index + num*2
243 # EndBlock
244
245 # 低压绕组2号水平挡板
246 index = position + num
247 while index < 74:
248     point1 = Point2D.Create(MM(1560.42-D1-h1+D1/73*index),MM(278+11))
249     point2 = Point2D.Create(MM(1560.42-D1+D1/73*index),MM(278+11+5))
250     point3 = Point2D.Create(MM(1560.42-D1+D1/73*index),MM(278+11))
251     result = SketchRectangle.Create(point1, point2, point3)
252     index = index + num*2
253 # EndBlock
```

(b) 水平挡油板控制的主要代码

```
131 # 草绘矩形, 低压绕组
132 point1 = Point2D.Create(MM(1560.42),MM(278))
133 point2 = Point2D.Create(MM(1560.42-h1),MM(278))
134 point3 = Point2D.Create(MM(1560.42),MM(278+11))
135 result = SketchRectangle.Create(point1, point2, point3)
136 # EndBlock
137
138 # 平移 Y 手柄
139 D1 = 73 * (d1 + h1)
140 selection = Selection.Create(Curve9, Curve10, Curve11, Curve12)
141 direction2D = -DirectionUV.DirU
142 options = MoveOptions()
143 options.CreatePatterns = True
144 result = Move.Translate2D(selection, direction2D, MM(D1), options, Info6)
145 # EndBlock
146
147 # 修改阵列
148 selection = Selection.Create(Curve9, Curve10, Curve11, Curve12)
149 data = LinearPatternModificationData()
150 data.CountX = 74
151 data.PitchX = MM(D1/73)
152 result = Pattern.ModifyLinear(selection, data, Info7)
153 # EndBlock
```

(c) 绕组控制的主要代码

图2 参数化建模脚本语言

Fig. 2 Parametric modeling script language

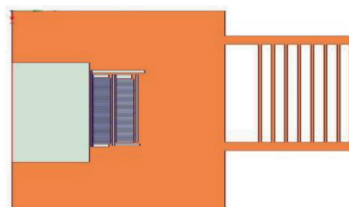


图3 油浸式变压器模型

Fig. 3 Model of oil-immersed transformer

2.1 水平挡油板初始位置的参数化建模

水平挡油板的初始位置是指变压器绕组附近的第一块水平挡板所处的线饼序号。本文设置全局变量 $position$ 来控制这一初始位置,其设置方式如图2(a)所示。

以第一个线饼的位置为基准, 叠加全局变量 $position$ 对应的线饼间距即可实现对水平挡油板初始位置的控制。需要注意的是, 随着 $position$ 值的增大, 最后一块水平挡油板可能超出绕组区域, 此时需减少水平挡油板的数量, 这一控制逻辑通过 $while$ 循环实现, 具体代码如图 2(b) 所示。通过脚本语言代码绘制的水平挡油板初始位置位于第 3 个线饼附近的示例, 如图 4 所示。

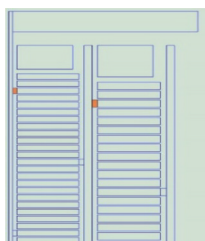


图 4 水平挡油板初始位置绘图结果

Fig. 4 Initial position drawing result of the horizontal oil baffle

2.2 水平挡油板间线饼数的参数化建模

在水平挡油板初始位置控制代码的基础上增设全局变量 num , 用于控制相邻水平挡油板之间的线饼数量, 具体如图 2(a) 所示。

将水平挡油板位置索引的增量设定为与全局参数 num 相关的可变数值后, 即可通过调整 num 的取值, 绘制出水平挡油板间线饼数量不同的竖直油道结构。具体代码如图 2(b) 所示, 其中水平挡油板间线饼数为 15 时的竖直油道结构绘制效果如图 5 所示。

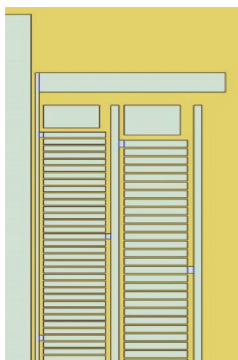


图 5 线饼数为 15 时的绘图结果

Fig. 5 Drawing result when the number of wire cakes is fifteen

2.3 水平油道宽度的参数化建模

变压器的水平油道由相邻两个线饼间的空隙形成, 因此可通过控制两个线饼间的间距来调节水平油道的宽度。为此, 本文引入两个全局变量 d_1 和

d_2 , 分别用于控制低压绕组和中压绕组的线饼间距, 具体如图 2(a) 所示。

在绕组绘制的代码中, 代表线饼平移距离的变量值被设定为与全局变量 d_1 、 d_2 相关的数值, 详细代码如图 2(c) 所示。当线饼间距为 2.3 mm 时对应的油道结构如图 6 所示。



图 6 线饼间距为 2.3 mm 时的绘图结果

Fig. 6 Drawing result when the spacing between lines is 2.3 mm

2.4 线饼尺寸的参数化建模

变压器绕组的线饼尺寸同样会影响油道结构, 其中线饼宽度会改变水平油道的宽度, 线饼高度则会影响水平油道的高度。为此, 本文引入全局变量 l_1 、 h_1 分别控制低压绕组线饼的宽度与高度, 同时引入全局变量 l_2 、 h_2 控制中压绕组线饼的宽度与高度, 具体如图 2(a) 所示。

在脚本语言代码中, 通过设定线饼矩形的 3 个顶点位置即可确定线饼的位置与尺寸。若将点坐标中的部分常量替换为与全局变量相关的值, 就能实现对线饼尺寸的参数化控制, 如图 2(c) 所示。通过参数化建模绘制出的线饼如图 7 所示。



图 7 控制线饼尺寸的绘图结果

Fig. 7 Drawing results of controlling the wire reel dimensions

3 变压器的流-热场耦合仿真

本文以一台 20 MVA/110 kV 的三相油浸式变压器为对象进行分析, 变压器的主要参数如表 1 所示。

3.1 网格剖分

在通过 SpaceClaim 完成不同绕组线饼与绝缘挡

表 1 变压器主要参数

Tab. 1 Main parameters of transformer

变压器参数	参数值
容量/MVA	20
额定电压/kV	110/10.5
额定电流/A	104.97/1 099.71
高/低压线圈内径/mm	357/278
高/低压线圈外径/mm	419/339
高/低压绕组高度/mm	749/769
油箱尺寸/(mm×mm×mm)	3 572×1 464×2 335
铁心叠片总厚度/mm	496
铁心高度/宽度/窗高/mm	1 990/2 860/950
铁心柱宽度/间距/mm	520/1 170
绕组额定热点温升/K	63.5

板结构的变压器参数化建模后, 首先对模型进行网格剖分。针对变压器绕组、绝缘挡板、铁心等规则区域, 采用四边形网格剖分以提升仿真计算速度; 针对变压器油这一不规则区域, 则采用三角形网格剖分以提高仿真计算精度。对于绕组、散热片、挡油板及其附近温度变化较快的区域, 网格尺寸控制在 1.2 mm 以内; 对于油箱附近及铁心等温度变化较慢的区域, 网格尺寸不超过 4.6 mm。整个模型的网格单元数量约为 45 万个, 铁心与绕组附近的局部网格剖分效果如图 8 所示。

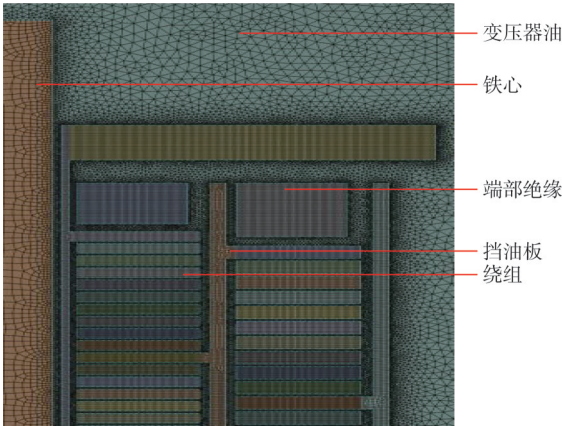


图 8 铁心和绕组附近的局部网格剖分结果

Fig. 8 Local grid subdivision results near the core and winding

在网格质量检查方面, 主要以网格单元质量、纵横比和偏度作为评估标准, 相关检查结果如表 2 所示。由表 2 可见, 本文所剖分的模型网格质量较高。

3.2 边界条件设置

对已完成网格剖分的模型进行边界条件设置,

表 2 网格质量检查结果

Tab. 2 Grid quality inspection results

质量标准	参考值	实际值
单元质量	平均值不低于 0.8, 最小值不低于 0.55	平均值: 0.97 最小值: 0.62
偏度	要求低于 5, 低于 3 更好	平均值: 1.06 最大值: 2.66
纵横比	最大值不超过 0.85	最大值: 0.63 平均值: 0.06

主要涵盖环境温度、壁面边界条件、对流换热系数及材料参数的配置。具体设置流程如下。

- 1) 将环境温度设定为 20 ℃至 40 ℃, 变压器油温、油箱及散热片壁面温度的初始值均与环境温度保持一致;
- 2) 油箱壁与铁心表面设置为无滑移边界, 绕组和散热片壁面则采用 Navier 滑移边界;
- 3) 油箱顶面与底面的对流换热系数 h 设为 4 W/(m²·K, 侧面的对流换热系数 h 设为 6 W/(m²·K, 散热片的对流换热系数 h 设为 12 W/(m²·K);
- 4) 油箱表面的热辐射系数 E 设置为 0.9;
- 5) 设置变压器的绕组、铁心、变压器油、油箱和挡油板的材料参数, 如表 3 所示。

表 3 材料参数

Tab. 3 Material parameters

材料	参数	数值
绕组	密度/(kg·m ⁻³)	8 987
	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	390
	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	381
铁心	密度/(kg·m ⁻³)	7 550
	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	51.9
	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	446
变压器油	密度/(kg·m ⁻³)	$1\,093 - 0.826 \cdot T + (3.612 \times 10^{-4}) \cdot T^2$
	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	$0.153\,8 - (7.645 \times 10^{-5}) \cdot T$
	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	$455.9 + 5.191 \cdot T - (1.522 \times 10^{-3}) \cdot T^2$
	动力黏度/(Pa·s)	$7.863\,e632 / (T - 176) \times 10^{-5}$
油箱	密度/(kg·m ⁻³)	7 840
	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	36.1
	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	472
挡油板	密度/(kg·m ⁻³)	1 400
	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.15
	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1 600

注: T 为绝对温度, K。

3.3 流-热场耦合仿真结果

设置好边界条件后,采用有限体积算法进行仿真计算,即可求取变压器内部的温度场和流场分布情况。负载率为 100 %,环境温度为 30 ℃时变压器内部温度分布情况和流场分布情况分别如图 9—10 所示。

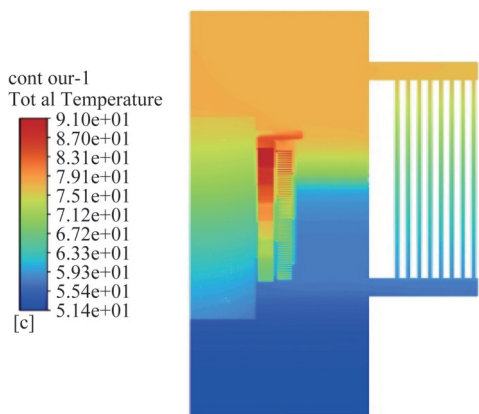


图 9 变压器热点温度仿真结果

Fig. 9 Simulation results of transformer hot spot temperature

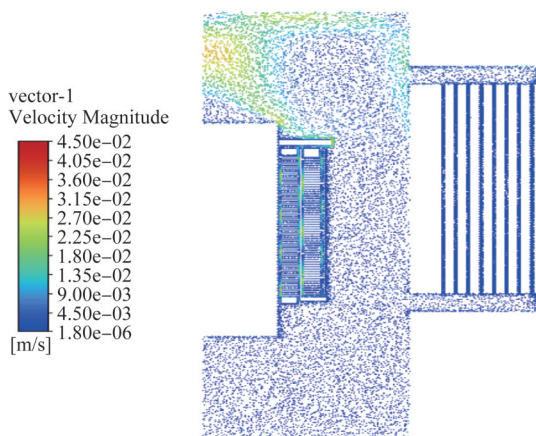


图 10 变压器流场分布仿真结果

Fig. 10 Transformer flow field distribution simulation results

由图 9—10 所示的仿真结果可知,变压器绕组和油中的温度随高度呈现上升趋势,变压器热点温度出现在低压绕组接近顶部的位置。变压器内部大部分区域油流速很低,小于 0.9 cm/s,较高的油流速主要分布在顶油区域、散热器入口以及绕组竖直油道。变压器内部最大油流速约为 4.5 cm/s。仿真得到的温度分布和油流速分布结果符合变压器正常运行时的情况。

3.4 模型有效性验证

为证明本文仿真模型具有较高计算精度,将仿

真求得的热点温升与变压器的额定热点温升进行对比。根据图 9 中的仿真结果及表 1 中的变压器参数可知,该变压器在额定工况下,仿真计算所得热点温升为 91 K,与变压器实际热点温升 93.5 K 相比仅相差 2.5 K,能够满足实际应用的误差要求,证明了本文仿真模型的准确性。

此外,还将本文的仿真建模及计算用时与常规方法进行比较。在仿真建模方面,本文采用参数化建模以提高建模速度;在仿真计算方面则采用 64 核超算以提升计算速度。本文方法与常规方法的用小时对比情况如表 4 所示。

表 4 仿真建模与计算用时

Tab. 4 Simulation modeling and calculation time

比较项目	仿真建模用时	仿真计算用时
常规方法	4~6 h	12 h 左右
本文方法	23~25 s	2 h 左右

由表 4 结果可知,采用参数化建模方法完成自动建模后,仿真建模用时大幅缩短,仅为 23~25 s;借助 64 核超算开展仿真计算后,仿真计算用时同样显著减少。这一结果证明,本文提出的方法能够有效节约仿真建模与计算的时间成本。

4 绕组和挡油板结构对热点温度的影响

4.1 水平挡油板初始位置对热点温度的影响

本文分析了水平挡油板初始位置位于 1 号线饼至 7 号线饼时形成的油道结构对热点温度的影响,热点温度和顶层油温的结果如表 5 所示。

表 5 不同挡油板初始位置时的温度

Tab. 5 Temperature at different initial positions of oil baffles

初始位置	热点温度/(℃)	顶层油温/(℃)
1	91.0	77.4
2	92.9	74.8
3	93.5	74.7
4	93.8	75.7
5	92.6	73.8
6	91.0	73.7
7	91.8	74.4

从表 5 结果可见,随着变压器水平挡油板起始位置向内移动,变压器热点温度整体呈现先升高后降低的趋势;顶层油温总体呈下降态势,但过程中也出现了短暂的上升波动。参数化分析结果表明,

当变压器水平挡油板初始位置处于 6 号线饼附近时变压器的散热性能最佳, 带负载能力最强。

4.2 水平挡油板间线饼数对热点温度的影响

本文分析了水平挡油板间的线饼数量为 8—15 时形成的油道结构对变压器热点温度的影响, 热点温度和顶层油温的结果如表 6 所示。

表 6 不同挡油板间线饼数时的温度
Tab. 6 Temperatures at different number of winding disk between oil baffles

线饼数量	热点温度/(℃)	顶层油温/(℃)
8	90.2	75.6
9	89.6	75.6
10	91.0	77.4
11	88.4	68.3
12	88.8	74.6
13	89.0	68.1
14	89.7	74.3
15	88.3	74.1

从表 6 的结果可以看出, 随着水平挡油板间线饼数量的增加, 变压器的热点温度与顶层油温并未呈现出固定的变化规律。挡油板间线饼数量的增加, 一方面会延长竖直油道的单节长度, 有利于竖直油道内油的流动; 另一方面, 却不利于更多油流入线饼的水平油道。因此, 水平挡油板间的线饼数量不宜过多, 也不宜过少。结合表中数据, 当水平挡油板间线饼数为 11 时, 变压器的总体散热效果最佳。

4.3 线饼间距对热点温度的影响

线饼的间距影响着水平油道的宽度, 也会给变压器热点温度带来影响。本文分析了线饼宽度为 2—3mm 时变压器热点温度的变化规律, 热点温度和顶层油温的结果如表 7 所示。

从表 7 结果来看, 线饼间距的增加会降低变压器的热点温度。不过在实际生产中, 变压器线饼间

表 7 不同线饼间距时的温度
Tab. 7 Temperatures at different cake spacing intervals

线饼间距/mm	热点温度/(℃)	顶层油温/(℃)
2.0	91.0	77.4
2.3	88.5	74.6
2.5	87.9	73.9
2.7	86.9	73.5
3.0	85.9	72.7

距过大, 一方面会使得绕组高度过高, 另一方面不利于支撑。因此在线饼间距的设计中, 应当在保证能够支撑和绕组高度不超过限制的前提下, 适当保证足够的线饼间距。

4.4 线饼尺寸对热点温度的影响

线饼的宽度的增大会增大水平油道宽度, 而线饼高度增大则会增大竖直油道的总长度。本文分析了不同线饼宽度和高度对变压器热点温度的影响, 热点温度和顶层油温的结果如表 8 所示。

表 8 不同线饼尺寸时的温度
Tab. 8 Temperatures at different winding sizes

线饼尺寸/mm	热点温度/(℃)	顶层油温/(℃)
$l_1=61, h_1=8.418; l_2=62, h_2=10.86$	91.0	77.4
$l_1=61, h_1=8; l_2=62, h_2=10$	89.0	74.7
$l_1=61, h_1=9; l_2=62, h_2=11.5$	90.9	76.4
$l_1=55, h_1=8.418; l_2=56, h_2=10.86$	92.6	78.9
$l_1=65, h_1=8.418; l_2=66, h_2=10.86$	89.9	75.9

表 8 中, l_1 、 h_1 分别为低压绕组线饼的长度和高度; l_2 、 h_2 分别为中压绕组线饼的长度和高度。由表 8 结果可知, 变压器热点温度与线饼高度之间无固定变化规律, 但线饼高度过低或过高均不利于散热; 当低压绕组线饼高度为 8 mm、中压绕组线饼高度为 10 mm 时散热效果最佳。线饼宽度的增加有助于绕组散热, 不过线饼过宽不仅会增加支撑难度, 还易导致绕组变形; 此外, 由于变压器油箱宽度有限, 线饼也无法做得过宽。因此, 线饼的高度与宽度应在确保有足够支撑空间、尽量避免绕组变形的前提下, 选择散热性能最优的结构。

5 结语

本文以油浸式变压器为研究对象, 通过 SpaceClaim 脚本语言实现参数化建模分别构建了不同水平挡油板初始位置、水平挡油板间线饼数、绕组线饼间距及绕组线饼尺寸下的变压器热点温度仿真模型。随后采用有限体积算法对变压器温度分布展开仿真分析, 获取了不同挡油板与绕组结构对应的热点温度及顶层油温, 探究了上述结构参数对变压器散热性能的影响。本文主要工作如下。

1) 利用 SpaceClaim 脚本语言编写代码进行参数化建模, 不仅大幅缩短了变压器仿真建模的耗时, 还能便捷地探究更多结构因素对变压器热点温度的

影响,为变压器散热结构的优化设计提供了有效指导。

2)将本文参数化建模方法的用时与常规方法对比,常规方法建模需4 h以上,而参数化建模方法用时在30 s以内,验证了本文提出的参数化建模方法的高效性。

本文的研究可为变压器结构设计的优化提供参考。

参考文献

- [1] 江秀臣, 许永鹏, 李曜丞, 等. 新型电力系统背景下的输变电数字化转型[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 1–10.
JIANG Xiuchen, XU Yongpeng, LI Yaocheng, et al. Digitalization transformation of power transmission and transformation under the background of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 1–10.
- [2] 郭红兵, 杨玥, 孟建英. 电力变压器典型故障案例分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019: 107–108.
- [3] 谢植飏, 王琛, 陈梁远, 等. 基于有限元法的变压器温度分布特性研究[J]. 高压电器, 2025, 61(7): 101–107.
XIE Zhibiao, WANG Chen, CHEN Liangyuan, et al. Research on temperature distribution characteristic of transformer based on finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(7): 101–107.
- [4] 赵鑫, 王东丽, 彭泓, 等. 基于多策略改进蜣螂算法优化的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 120–130.
ZHAO Xin, WANG Dongli, PENG Hong, et al. Transformer fault diagnosis based on a multi-strategy improved dung beetle optimizer[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 120–130.
- [5] 田双双, 李哲, 张晓星, 等. $C_6F_{12}O$ 与 CO_2/N_2 对变压器油分解气体火焰及 HF 的抑制作用[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 96–105.
TIAN Shuangshuang, LI Zhe, ZHANG Xiaoxing, et al. Inhibition effect of $C_6F_{12}O$ and CO_2/N_2 on transformer oil decomposition gas flame and HF[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 96–105.
- [6] CHI C, YANG F, XU C, et al. A multi-scale thermal-fluid coupling model for ONAN transformer considering entire circulating oil systems[J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 2022(135): 107614.1–107614.9.
- [7] 山浩强. 油浸式变压器故障诊断与定位方法研究[D]. 北京: 华北水利水电大学, 2022.
- [8] LI Y, WANG Y, CHEN Q. Optimal dispatch with transformer dynamic thermal rating in ADNS incorporating high PV penetration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 1989–1999.
- [9] 刘刚, 兰和潼, 姜雄伟, 等. 基于温升特性的强迫导向油循环风冷结构变压器负荷能力评估[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 232–241.
LIU Gang, LAN Hetong, JIANG Xiongwei, et al. Load capacity evaluation of forced guided oil circulation air-cooled transformer based on temperature rise characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 232–241.
- [10] 曾庆湖. 电力变压器优化设计方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [11] 杨冉, 石墨, 罗颖婷, 等. 基于气泡产生起始温度的变压器短期过载预警方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(8): 9–18, 28.
YANG Ran, SHI Mo, LUO Yinting, et al. Transformer short-term overload early warning method based on initial temperature of bubble formation[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(8): 9–18, 28.
- [12] 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.
- [13] 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. 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.
- [14] 张浩阳. OFAF型变压器绕组温升数值研究及结构改进[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [15] 张明辉. 隔离式蒸发冷却变压器结构优化及热性能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- [16] GONG R, RUAN J, CHEN J, et al. A 3-D coupled magneto-fluid-thermal analysis of a 220 kV three-phase three-limb transformer under DC bias[J]. Energies, 2017, 10(4): 1–10.
- [17] GONG R, RUAN J, CHEN J, et al. Analysis and experiment of hot-spot temperature rise of 110 kV three-phase three-limb transformer[J]. Energies, 2017, 10(8): 110–121.
- [18] ZHANG Y, HO S L, FU W, et al. Numerical study on natural convective heat transfer of nanofluids in disc-type transformer windings[J]. IEEE Access, 2019(7): 51267–51275.
- [19] 岳国良. 油浸式电力变压器负载能力在线评估及冷却控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [20] KEBRITI R, HOSSIENI SMH. 3D modeling of winding hot spot temperature in oil-immersed transformers[J]. Electrical Engineering, 2022, 104(5): 3325–3338.
- [21] ZHANG Y, WEI X, FAN X, et al. A prediction model of hot spot temperature for split-windings traction transformer considering the load characteristics[J]. IEEE Access, 2021(9): 22605–22615.
- [22] 高原, 刘文里, 王录亮. 大型油浸式风冷变压器绕组温度场及流场分析[J]. 黑龙江电力, 2012, 34(1): 37–40, 43.
GAO Yuan, LIU Wenli, WANG Luliang. Analysis of winding temperature field and fluid field of large-scale oil-immersed air-cooled transformer[J]. Heilongjiang Electric Power, 2012, 34(1): 37–40, 43.
- [23] YATSEVSKY V A. Hydrodynamics and heat transfer in cooling channels of oil-filled power transformers with multicoil windings[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 63(1): 347–353.
- [24] RODRIGUES T F, MEDEIROS L H, OLIVEIRA M M, et al. Evaluation of power transformer thermal performance and optical sensor positioning using CFD simulations and temperature rise test[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72(1): 1–12.

(下转第 114 页 Continued on Page 114)