

Simulation of Three-Dimensional Temperature inside Field of Cast-Resin Dry-Type Transformers

Zheng Liu¹, Chunguang Wang²

¹School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin

²Tianjin Special Transformer Factory, Tianjin

Email: 664213663@qq.com

Received: Nov. 20th, 2018; accepted: Dec. 4th, 2018; published: Dec. 11th, 2018

Abstract

In this paper, a three-dimensional axisymmetric heat transfer model for a specific type of resin cast dry transformer is established. And based on the Comsol Multiphysics simulation software, the three-dimensional fluid-solid coupling temperature field simulation was carried out for the dry-type transformer. Combined with the thermal properties of air-fluid, the temperature distribution in the temperature field and the hot-spot location and temperature have been determined. The result is compared with the measured temperature of the embedded sensor in the transformer so that we can see the simulation is right. Compared to tradition, in this paper, the effects of thermal radiation and air on three-dimensional temperature field with the changes of temperature, heat, mechanics and density are considered, also the effect of upper and lower clamps on heat generation and heat dissipation of dry transformers as well. It can guide the structural optimization and temperature monitoring of dry transformer and how to take measures to ensure safe operation.

Keywords

Dry-Type Transformers, Three-Dimensional Temperature Field, The Hot-Spot Temperature, Finite Element Simulation

树脂浇注式干式变压器内部温度场的三维仿真计算

刘 峥¹, 王春光²

¹天津工业大学电气工程与自动化学院, 天津

²天津特种变压器厂, 天津

Email: 664213663@qq.com

收稿日期: 2018年11月20日; 录用日期: 2018年12月4日; 发布日期: 2018年12月11日

摘要

本文对某一具体型号树脂浇注式干式变压器建立了三维传热模型, 并基于多物理场耦合有限元仿真计算软件Comsol Multiphysics对干式变压器开展流固耦合温度场仿真计算, 得出变压器温度场分布及热点的位置和温度, 并与变压器内埋传感器实测温度对比, 验证了仿真计算的准确性。除了热传导和热对流, 本论文还考虑了热辐射和空气热学、力学及密度随温度的变化, 以及上下夹件对干式变压器生热及散热对三维温度场的影响。本结论对干式变压器结构优化有指导作用。

关键词

干式变压器, 三维温度场, 热点温度, 有限元仿真

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

变压器温度异常会引发安全问题, 国内外每年都会因此造成安全事故, 酿成巨额财产损失和人员伤亡[1][2]。因此研究干式变压器温度场分布, 可为维护其安全运行提供重要数据, 同时为变压器结构优化提供重要理论依据, 在源头上减少安全问题[3][4][5]。

国内外研究者对干式变压器温度场分布进行了多年的研究, 其中刘国坚和王丰华对干式变压器依据热学原理对温度场进行了二维流固耦合仿真计算, 得出了温度场分布[6]; 顾昌、王文等建立了干式变压器二维瞬态数值仿真计算模型, 得出了接近正常运行实际的二维温度场[7]。Oliver A.J.通过分析了变压器高低压绕组线圈的温升, 建立热网络模型[8]。

本文的创新点如下: 在模型中加入夹件, 并考虑了空气在温度上升时物理特性的变化和热辐射在干式变压器三维温度场中的影响。

综上并根据树脂浇铸干式变压器某一具体型号的实际结构, 以其三相 1/2 为研究对象在 Comsol 平台建立了干式变压器三维温度场模型, 并对其展开仿真计算。结合传热学和流体动力学对干式变压器温度场分布情况进行分析, 找出干式变压器正常运行中温度在空间上的分部, 从而找出热点位置[9][10]。

2. 温度场仿真分析

本文对一台天津特种变压器厂产型号为 SCB35-1000/35 的树脂浇铸干式变压器进行建模和仿真计算, 此变压器电压等级为 $35 \pm 3 \times 2.5\%/10.5$ kV, 绝缘等级为 F 级。低压绕组置于铁芯和高压绕组之间, 由铜箔绕制。高压绕组采成四段多层圆筒式, 层间浇筑绝缘树脂, 在高、低压绕组两端均有一定厚度的绝缘端封。上下夹件处于绝缘端封之外, 铁芯两侧。

以干式变压器铁芯纵截面为对称平面建立对称模型, 即为变压器实际的二分之一, 变压器结构中的各部分简化为:

1) 变压器内部热源为铁芯、低压绕组、高压绕组和夹件, 并将其分别等效为具有一定数值的均匀发热体。

2) 假定变压器置于一个气流方向竖直向上, 且流速随气体密度变化的空间中, 气体的特性随温度变化, 见表 1 [11]。

干式变压器三维仿真模型如图 1 所示。

Table 1. Air property sheet

表 1. 空气属性表

物理性质	公式
密度/(kg/m^3)	$\rho = 1.263 \times e^{[-0.003 \times (T - 273)]}$
动力粘度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	$\eta = +8.3e^{-8}T - 7.7e^{-11}T^2 + 4.6e^{-11}T^3 - 1.1e^{-17}T^4 - 8.3e^{-7}$
导热系数/($\text{W}/\text{m} \cdot \text{c}$)	$K = 1.15e^{-4}T - 7.91e^{-8}T^2 + 4.12e^{-11}T^3 - 7.44e^{-15}T^4 - 0.00237$
比热容/[$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]	$C_p = -0.372T + 9.45e^{-4}T^2 - 6.02e^{-7}T^3 + 1.28e^{-10}T^4 + 1046.7$

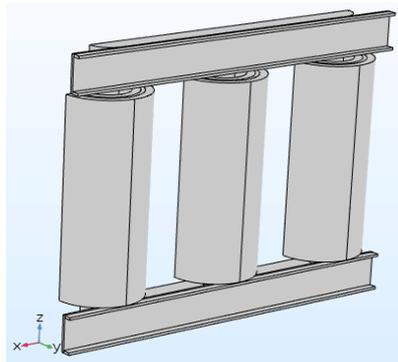


Figure 1. Dry type transformer solid model

图 1. 干式变压器实体模型

2.1. 干式变压器材料属性设定

根据型号为 SCB35-1000/35 的变压器各部分所使用的材料设置材料的物理属性参数, 如表 2 所示。

Table 2. Dry transformer material property sheet

表 2. 干式变压器材料属性表

材料	比热容[$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]	导热系数[$\text{W}/\text{m} \cdot \text{c}$]	密度[kg/m^3]
铜	385	368	8700
铁芯	40	21	7550
环氧树脂	0.25	0.22	980

2.2. 网格划分

干式变压器的流固耦合温度场模型较为复杂。为了统筹兼顾仿真计算的精度和速度, 本文采用分区域的网格划分方法。更本着准确计算出干式变压器温度场分布的目的, 对铁芯、低压绕组、高压绕组和绝缘树脂设定不同的网格划分尺寸。其中高压绕组、低压绕组与绝缘树脂的接触面尤为精细。网格剖分如图 2 所示。

本文完整网格包含 190,863 个域单元。

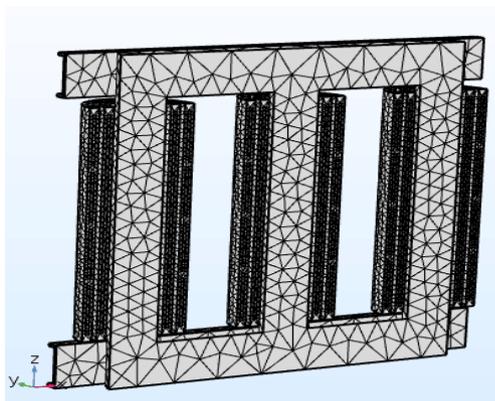


Figure 2. Dry type transformer meshing diagram
图 2. 干式变压器网格划分图

2.3. 设定空气流速

干式变压器运行过程中散热方式主要靠空气的流动, 因此, 准确的空气流速将提高仿真的精度, 设定空气自然移动, 由变压器底部进入, 顶部流出。即空气流动的驱动力是由变压器生热导致空气受热膨胀, 在与外部空气压力之下流出, 称为体积力, 表达式为式(1)。

$$F = g(\rho_h - \rho_l) \quad (1)$$

式中: g 为重力加速度(N/m^3), ρ_h 和 ρ_l 分别为上方空气和下方空气的密度(kg/m^3)。当空气在壁面上流动时, 靠近壁面时流速逐渐减小, 最后停止, 因此初始设定变压器底部空气与外界环境之间压强为 0 Pa , 顶部空气于外界环境空气同样为 0 Pa 。在变压器正常满载运行时, 空气流速如图 3 所示。

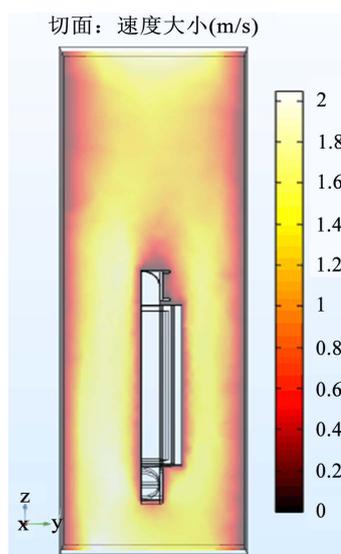


Figure 3. Fan side air velocity profile
图 3. 变压器侧面空气流速分布图

由于热空气上升且单位质量下体积变大, 所以变压器上侧空气流速明显变大, 且越接近便捷的顶端流速越大。变压器周边最靠近变压器的空气与气道内空气流速很低, 这是由于空气受热后温度升高, 体积膨胀, 会沿着气道和变压器表面向上自由流动。

气流流动时因空气粘滞阻力以及与气道壁面和变压器表面摩擦力降低了流速, 且越靠近接触面, 流速降低的越明显。因此在流速最低处, 即接触面处形成气流停滞的换热薄层。因此换热薄层在接触面粘滞阻力影响下逐步变厚, 向气流内部堆积。同时换热热阻随换热薄层厚度的增加而增加, 导致局部换热系数逐步减少, 因此温度逐步上升。同时空气的粘性系数随温度的升高而增大, 薄层会进一步加厚, 因此流速减慢, 直至停滞[12] [13]。

2.4. 设定热辐射相关参数

在变压器实际运行中, 热辐射也是传热的重要途径之一, 经研究发现, 仿真计算中忽略热辐射产生的温度场与实际检测到的温度场误差较大。热辐射主要存在于高低压绕组间和低压绕组与铁芯之间。为了保证仿真结果的可靠性, 并依据材料自身特性, 在每相高低压绕组间和低压绕组与铁芯之间设定黑体辐射常数为 0.9, 热辐射如图 4 所示。

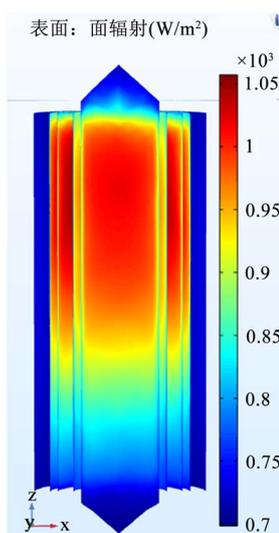


Figure 4. Thermal radiation profile of transformer
图 4. 变压器剖面热辐射分布图

图 4 为干式变压器 B 相热辐射分布图, 可以看出在低压绕组与铁芯之间的, 低压绕组距上顶端约 25% 处辐射值最大, 且顶端辐射值高于底端。具体原因见下节。

3. 仿真结果

本仿真模拟型号为 SCB35-1000/35 树脂浇铸干式变压器在额定功率运行情况下, 干式变压器三维流-固耦合温度场的分布特性。整体温度场分布如图 5 所示。

由图 5 可得, 干式变压器 B 相温度明显高于 AC 两相, 且最热点处于 B 相低压绕组距上顶端约 25% 处, 温度为 98.9 度。由式(3)可得, 热辐射量与温度成正比, 所以温度越大, 热辐射量越大。因此, 从整体上看, 每一相低压绕组处温度高于高压绕组处, 并远远高于铁芯处。每一相的温度趋势随着高度的增加先增加后减小, 且顶端温度高于底端温度。由于 B 相温度最高, 绝缘面临的挑战最大, 所以本文选取 B 相来研究温度场分布。绘制 B 相温度分布曲线, 如图 6 所示。

由图 5 可知干式变压器 B 相低压绕组温度最高, 这是因为低压绕组在自身发热的同时, 从气道方向接受了铁芯和高压绕组辐射来的热量。并且由于温度升高导致附近空气的粘性系数随温度的升高而增大, 而且由于上夹件的对气流的遮挡, 导致流速减慢, 单位时间内由空气带走的热量减少。

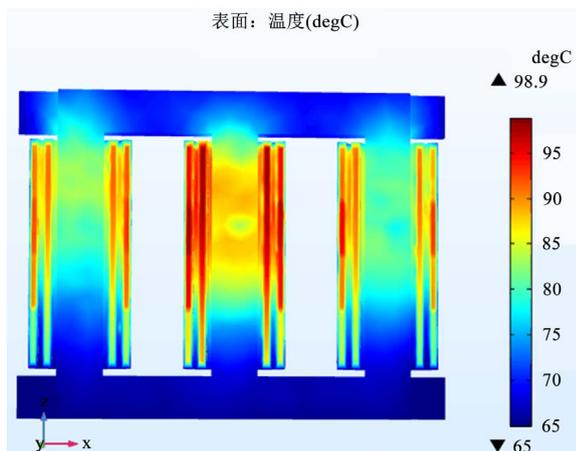


Figure 5. Temperature field distribution diagram
图 5. 温度场分布图

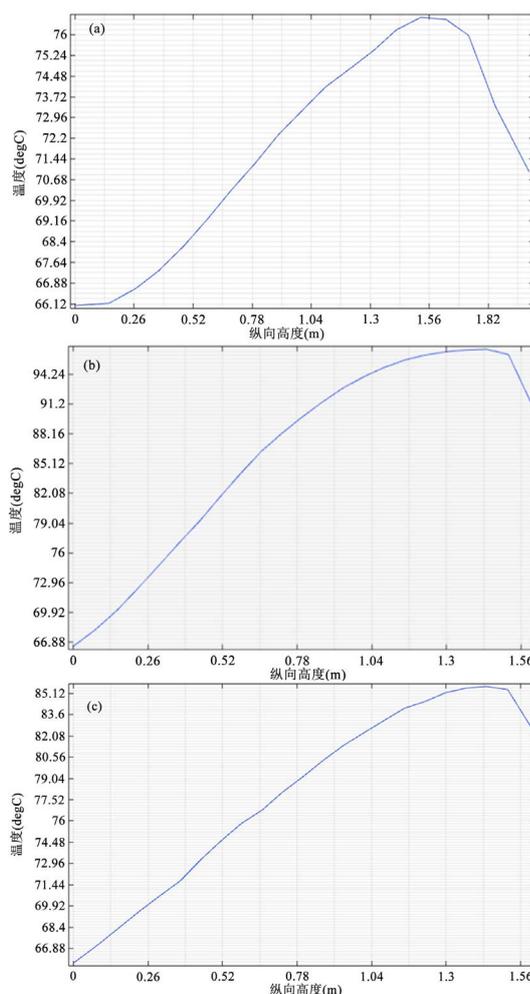


Figure 6. Temperature distribution curves of b-phase core, low voltage and high voltage winding of dry transformer, (a) Core temperature profile, (b) Low voltage winding temperature distribution curve, (c) High voltage winding temperature distribution curve

图 6. 干式变压器 B 相铁芯、低压和高压绕组温度分布曲线, (a) 铁芯温度分布曲线, (b) 低压绕组温度分布曲线, (c) 高压绕组温度分布曲线

由图 6(a)可知, 铁芯温度在上三分之一处到达最大值, 最顶处温度较低, 这是因为铁芯受低压绕组影响较大, 并且靠近顶端处因无绕组阻挡并且由于和上夹件充分接触增大了散热面积, 因而温度较低。

由图 6(c)可知高压绕组的温度趋势与低压绕组相同, 最热点均处在各自轴向接近绕组顶端的位置, 因为空气粘性系数的原因导致顶端温度低于最高点温度。并且由于高压绕组外部通过绝缘树脂和空气直接接触导致在最热点附近温度上升曲线斜率低于低压绕组。

最热点部位绝缘性能正常与否直接关系到干式变压器安全运行状况。对于本实验, B 相绕阻距底端 1.46 m 附近是绝缘薄弱点, 应加强此处散热, 增加气道数和气道宽度, 增加通风量以及适当增强绝缘性能均可提升变压器长久稳定安全运行的能力。

4. 仿真结果验证

利用天津特种变压厂运行中的 SCB35-1000/35 树脂浇注干式变压器中的温度传感器采集值与本仿真模型中同样的部位温度计算值比较。以此来验证仿真结果是否与实际情况相同。试验热电偶布置情况如图 7 所示。

比较结果如表 3 示。

由表 3 可知, 仿真计算的结果和实测值误差均小于 2%, 满足实际要求。

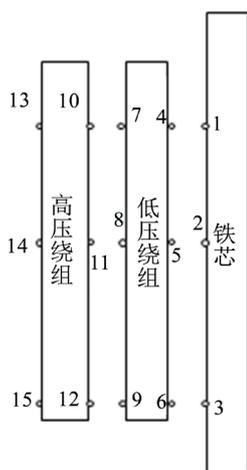


Figure 7. Configuration of the left side thermocouple of phase B
图 7. B 相左侧热电偶布置情况

Table 3. Comparison of calculated and measured values

表 3. 计算值与实测值的比较

序号	计算值(°C)	实测值(°C)	相对误差(%)
1	76.91	76.06	0.11
2	73.34	72.99	0.48
3	66.69	66.03	1.00
4	93.96	92.53	1.55
5	89.30	88.70	0.68
6	69.92	70.02	0.14
7	91.59	93.01	0.15
8	85.33	86.55	0.13
9	67.52	68.32	0.12

Continued

10	83.41	82.91	0.60
11	78.66	79.82	0.15
12	67.74	68.31	0.83
13	75.66	76.77	0.14
14	70.13	71.21	1.51
15	67.01	68.05	1.53

5. 结论

本文针对干式变压器二维温度场仿真不能全面反映干式变压器热点温度场, 以及部分三维温度场模型忽略情况及简化结构过多导致实验结果不准确的问题, 基于 Comsol 平台对树脂浇铸式干式变压器建立了三维轴对称传热模型并开展温度场仿真计算, 在模型中加入了上下夹件对变压器生热和散热的影响, 且加入了热辐射对温度场传热的影响。仿真结果表明:

1) 将仿真计算的结果与实测值比较, 数值基本一致, 并且最大相对误差为 1.55%, 不超过 2%, 满足工程应用的要求, 有很强的实用性。

2) 变压器从底部到顶部温升情况是先升高再降低, 顶部温度高于底端, 内侧温度高于外侧, 干式变压器最热点位于低压绕组与铁芯之间距低压绕组顶端 25%处附近, 最热点温度为 97.38℃, 高压绕组最热点在轴向 83%处, 温度为 85.31℃。表明两处是变压器绝缘薄弱点, 设计时应注意, 且运行时应加强监测和维护。

参考文献

- [1] 张牧, 高立业, 魏娟, 等. 树脂浇注干式变压器三维温度场仿真计算[J]. 天津工业大学学报, 2015, 34(3): 62-66.
- [2] 路长柏, 郭振岩, 刘文里, 等. 干式电力变压器理论与计算[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2003.
- [3] 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.
- [4] 陈世省, 陈秀菊. 树脂浇注干式变压器绕组最热点位置的分析[J]. 变压器, 2002, 39(9): 8-12.
- [5] 刘小波, 姚芳. 干式变压器漏磁场及温度场的分析与研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2011.
- [6] 刘国坚, 王丰华. 树脂浇注干式变压器温度场分布的计算分析[J]. 高压电器, 2016, 52(8): 83-89.
- [7] 王文, 顾昌, 陈汝庆. 温度场的数值模拟法在干式电力变压器热设计中的应用[J]. 变压器, 1997(9): 18-22.
- [8] Ning, W. and Ding, X.Q. (2012) Three-Dimensional Finite Element Analysis on Fluid Thermal Field of Dry-Type Transformer. 2012 *Second International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control*.
- [9] 王珊珊, 肖黎, 廖才波. 110 kV 环氧浇注干式变压器流体 - 温度场的有限元仿真计算[J]. 变压器, 2016, 53(1): 1-5.
- [10] Ebrahim, R. and Davood, A. (2007) Analysis of Temperature Distribution in Cast-Resin Dry-Type Transformers. *Electrical Engineering*, **89**, 311-319.
- [11] 任思锦, 王秀春. 干式变压器轴向气道强化散热研究[J]. 节能, 2016, 35(12): 38-41.
- [12] 邢雅, 樊博, 康亚丽, 等. 树脂绝缘干式变压器内部温度场的计算[J]. 电子测量技术, 2017, 40(1): 34-40.
- [13] 田慕琴, 朱晶晶, 宋建成, 等. 基于流固耦合分析的矿用干式变压器温度场仿真[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3972-3981.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2333-5394，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jee@hanspub.org