

Study on Electromagnetic and Thermal Simulation of Dry-Type Transformer in the Cabin for Wind Turbine Application

Xiaodong Zhao¹, Chunguang Wang¹, Mu Zhang², Chuang Wang¹, Genhui Sun¹, Jie Chen¹

¹Tianjin TBEA Electric Transformer Co. Ltd., Tianjin

²School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin

Email: zhaoxiaodong@tbea.com

Received: Jun. 8th, 2020; accepted: Jun. 22nd, 2020; published: Jun. 29th, 2020

Abstract

The computer simulation software is used to simulate the actual environment in the wind turbine cabin, the electromagnetic and thermal simulation model of the transformer is established, and the reasonable simulation calculation is carried out to provide the calculation basis for the electromagnetic design and heat dissipation design of the transformer, and the accuracy of the simulation calculation is verified by comparing with the actual measured average temperature rise of the final transformer. In addition to the temperature rise of the transformer itself, the influence of the engine room top fan and the lower fan of the transformer as well as other heating parts in the engine room on the temperature rise of the transformer is also considered in this paper. This conclusion can be used as a guide for temperature rise design of dry type transformer and selection of cooling fan.

Keywords

Wind Power, Dry-Type Transformer, Electromagnetic Simulation, Thermal Simulation, The Average Temperature Rise

风力发电用机舱内置干式变压器电磁和热仿真研究

赵晓东¹, 王春光¹, 张 牧², 王 闯¹, 孙根会¹, 陈 杰¹

¹天津市特变电工变压器有限公司, 天津

²天津工业大学电气工程与自动化学院, 天津

Email: zhaoxiaodong@tbea.com

收稿日期：2020年6月8日；录用日期：2020年6月22日；发布日期：2020年6月29日

摘要

利用计算机仿真软件，模拟风力发电机舱内的实际环境，建立了变压器电磁和热仿真模型，并进行了合理的仿真计算，为变压器电磁设计及散热设计提供计算依据，并与最终变压器实测平均温升进行对比，验证仿真计算准确性。除了变压器本体温升，本论文还考虑了机舱顶部风扇和变压器下部风扇以及机舱内其他发热部件对于变压器的温升影响。本结论对于密闭外壳内干式变压器温升设计及散热风扇的选取有指导作用。

关键词

风力发电，干式变压器，电磁仿真，热仿真，平均温升

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

安装在风力发电机舱内变压器维护成本高，对变压器的可靠性要求高，因此对于干式变压器设计要求极为严格[1] [2]。研究机舱内干式变压器温度场分布，为变压器设计优化提供重要理论依据，也能够缩短项目开发周期同时提升变压器可靠性[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，其中张牧和高立业等采用三维面对称热传导模型对变压器温度场进行仿真[6]；刘峥和王春光对于多物理场耦合有限元仿真计算除了热传导和热对流，还考虑了热辐射和空气热力学及密度随温度的变化[7]；黄超洋和杨宗在变压器室内增加强迫风冷风路，使用热流分析软件进行建模仿真计算[8]；Ning, W. and Ding, X.Q.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[9]。

本文创新点如下：舱体顶部风扇实体建模对于风扇按照实际使用型号尺寸对风扇部件进行详细建模，热仿真网格主要划分思路流体区域大部分使用非结构化网格并局部加密，高压区和低压区发热源使用结构化网格，环氧树脂包裹层使用非结构化网格，在高压、低压和铁芯表面的空气面进行了局部加密。

综上根据现有平台风力发电机舱用干式变压器及机舱已有三维设计图、设备布置情况等，结合提供布置方案及参数，确定了计算模型及其参数，建立了变压器电磁和热仿真模型，并进行了合理的仿真计算，为变压器电磁设计及散热设计提供计算依据。

2. 电磁仿真

2.1. 变压器空载损耗

模型如图 1 所示蓝色表示铁芯，灰白表示线圈，外侧高压，内侧低压。拉杆、吊装、螺杆及孔、绝缘件等，与空载磁路关联不大，因此可以简化，输入铁芯材料 B-H 曲线及损耗曲线，其中 B-H 曲线用于分析磁芯磁化时的饱和特性，B-P 曲线用于分析计算磁芯的损耗。进行合理的网格划分，设置空载激励和边界条件，求解结果空载磁芯损耗 5103 W。

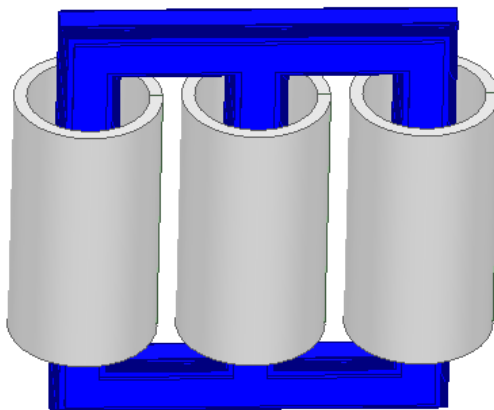


Figure 1. Analysis model of transformer no-load loss
图 1. 变压器空载损耗分析模型

2.2. 变压器负载损耗

模型如图 2 所示有所调整，线圈模型按照实际设计细化，高压线圈进行分段，图中蓝色表示铁芯，灰白表示线圈，外侧高压，内侧低压。

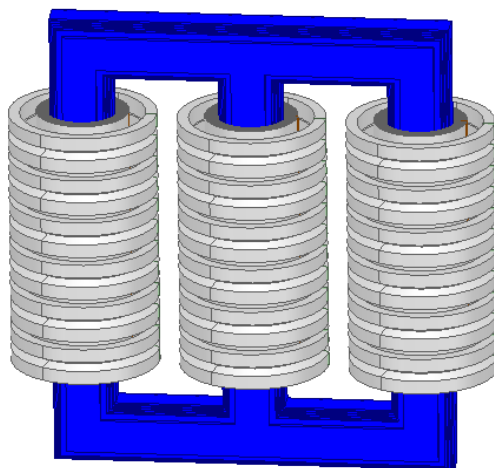


Figure 2. Analysis model of transformer load loss
图 2. 变压器负载损耗分析模型

分别设置高低压侧负载激励和边界条件，求解结果仿真收敛、网格达到要求，结果可取用。低压箔式绕组内侧两端受涡流影响较大，低压总的计算损耗 10,854 W，其中 AC 系数 1.6 左右，符合涡流效应的影响。由于高压侧绕组直径很小，漏磁产生的涡流损耗也非常小，损耗分布较为均匀，附加损耗按经验系数计算，高压绕组计算损耗 18,929 W。

基于本次电磁仿真得出，变压器空载损耗 5103 W，负载损耗 29,783 W。

3. 热仿真

变压器的热仿真条件如下：产热功率为变压器在额定电流工况的输出；变压器室内初始环境温度 55℃，机舱空气进口温度为 35℃；图 3 为变压器底部 6 个涡流风机 PQ 曲线。舱体顶部风扇实体建模，转速为 3479 r/min (364 rad/s)，风扇使空气流动，对变压器进行冷却。

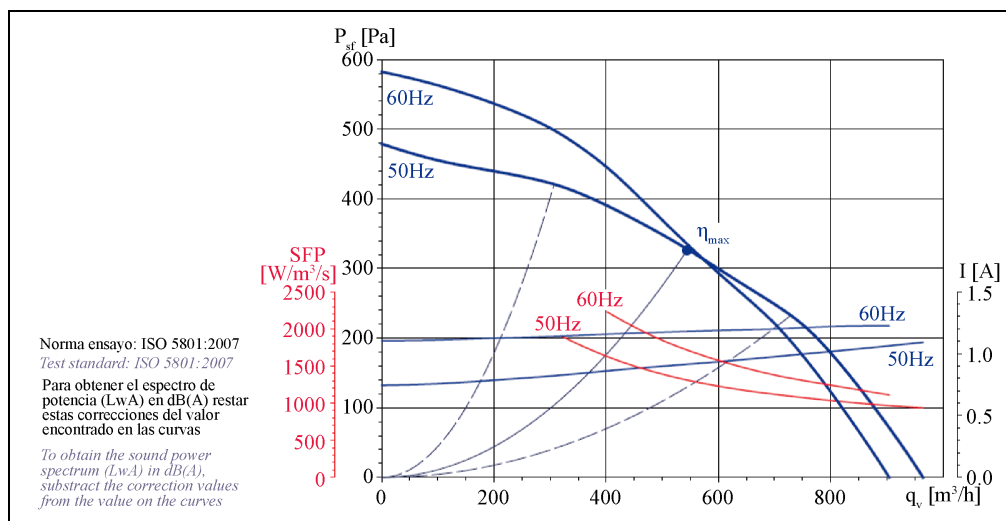


Figure 3. The p-q curve of the small fan at the bottom of the transformer
图 3. 变压器底部涡流风机 P-Q 曲线

在 SCDM 中对模型进行前处理，变压器原始模型和建模模型见图 4，主要包含了高低压、铁芯以及钣金件等零件。原始模型较复杂，将其中的螺栓、垫片等小零件去除，并对孔、倒角、圆角等进行修复，得到仿真计算的模型。考虑到高压部分环氧树脂较多，不可将其按照整体处理，故对绕组进行建模，获得分段绕组的高压模型；低压区域，铝箔之间绝缘很薄，故将其作为整体进行建模，外部使用一定厚度的环氧树脂包裹；将所有零部件去除，从变压器内部空腔去除，得到计算空气域，并按照变压器外形分割成内外两部分空气域，以方便减少网格尺寸，通过压印得到进口和出口面。各零件均通过压印来获得相互接触面生成接触面[10] [11]。

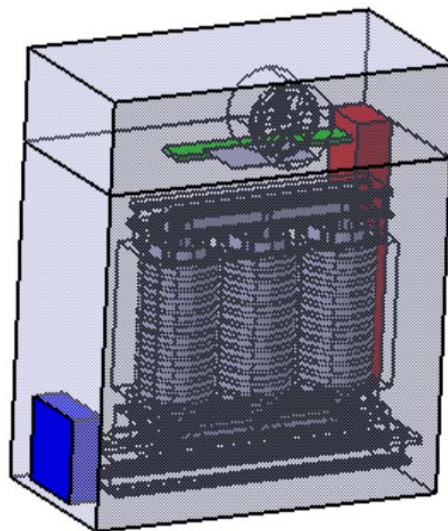


Figure 4. Original model
图 4. 原始建模模型

原始模型较复杂，将其中的螺栓、垫片等小零件去除，并对孔、倒角、圆角等进行修复，得到处理后的仿真计算模型，如图 5 所示。

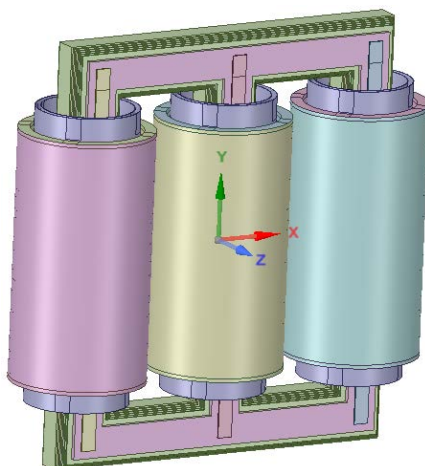


Figure 5. Simulation calculation model after processing

图 5. 处理后仿真计算模型

将所有零部件去除从变压器内部空腔去除，得到计算空气域，并按照变压器外形分割成内外两部分空气域，以方便减少网格尺寸，通过压印得到进口和出口面，整体空气域如图 6 所示。

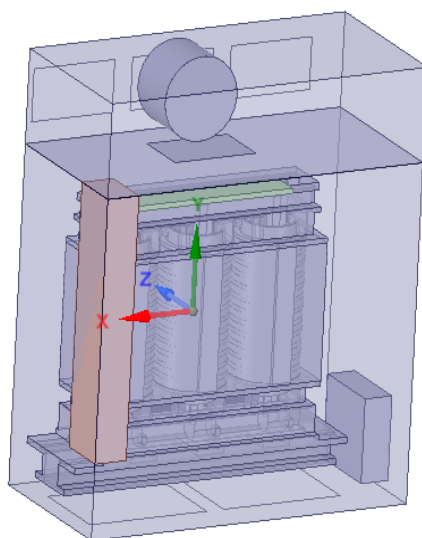


Figure 6. Global air domain

图 6. 整体空气域

变压器不同零部件之间通过热传导方式传播热量，和空气间通过热对流换热，其热传递效率受到材料属性影响。主要零部件物性参数为如下表 1 所示。

模型截面通过测量三维模型对空气域进行了初步计算，获得了在计算工况下其 $Y = 0$ 截面的流量、速度和 Y^+ ，参数如表 2 所示，将以上参数代入计算公式 1 可得到雷诺数为 19229，因此选择标准 k-e 湍流模型进行计算。辐射模型中 DO 模型使用性最广，选择此模型进行辐射计算。

$$R_e = \frac{2m}{\mu(a+b+c+d)} \quad (1)$$

Table 1. Material property sheet
表 1. 材料属性表

材料	密度[kg/m ³]	比热容[J/(kg·K)]	导热系数[W/m·k]	辐射系数
高压组件	2700	995	0.75 (XZ) 2.6 (Y)	0.9
低压组件	2700	983	0.75 (XZ) 150 (Y)	0.9
铁芯	7650	460	75 (XY) 50 (Z)	0.9
环氧树脂	2000	1550	0.2	0.9
Q235	7850	502	48	0.9
空气	1.225	1006	0.02	/

Table 2. Initial flow field parameter
表 2. 初始流场参数

截面	平均速度[m/s]	平均质量流量[kg/s]	平均 Y+
Y = -300	1.50	1.359	0.578
Y = 0	1.30	1.387	2.700
Y = 300	1.21	1.400	5.140
三截面平均值	1.337	1.382	2.806

边界层第一层厚度 Y 按照公式 2 进行计算。代入各参数计算得，Y 为 0.0005，因此第一层边界层网格厚度为 0.5 mm，考虑到减少网格数量，边界层数取 3。

$$y = \frac{y^+ \mu}{\rho v \sqrt{Re^{1/4}}} \quad (2)$$

模型下方进口使用压力进口类型；6 个涡流风扇进口使用质量流量进口类型；顶部出口使用压力出口类型；由于计算稳态，风扇旋转模型使用滑移网格模型，指定其转速为 364 rad/s。

采用 workbench 中的 meshing 进行网格划分，最终总网格数量为 1320 万。在 meshing 中，网格主要划分思路为：流体区域大部分使用非结构化网格并局部加密，高压区和低压区发热源使用结构化网格，环氧树脂包裹层使用非结构化网格，在高压、低压和铁芯表面的空气面进行了局部加密[12][13]，变压器整体网格示意如图 7 所示。

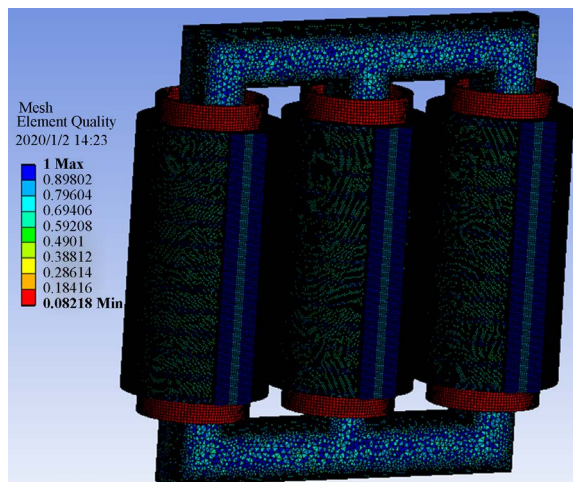


Figure 7. Transformer overall grid diagram
图 7. 变压器整体网格示意图

使用 Maxwell 仿真得到各发热元件损耗, 然后再使用 Fluent 进行热性能仿真, Fluent 得出的产热功率发热部件损耗如表 3 所示。

Table 3. Loss table for the parts
表 3. 发热部件损耗表

部件	产热功率(W)
高压	18929
低压	10854
铁芯	5103
辅变	3000
定子柜	2000
连接电缆	2000

4. 仿真结果

本仿真得到在额定功率运行情况下, 机舱环境温度为 55°C 时, 变压器整体温度分布云图, 如图 8 所示。

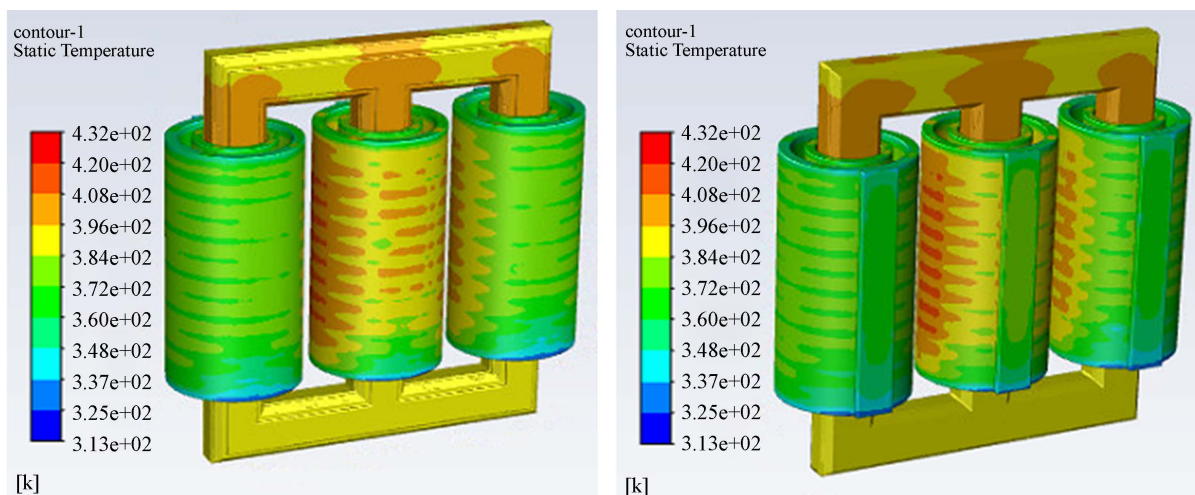


Figure 8. The overall temperature distribution cloud diagram of the transformer
图 8. 变压器整体温度分布云图

高压线圈整体分布云图, 如图 9 所示。

低压线圈整体分布云图, 如图 10 所示。

铁芯整体分布云图, 如图 11 所示。

整体区域流线图, 如图 12 所示。

变压器在 55°C 机舱环境下, 变压器温度仿真统计结果见表 4 所示。

由图 8 和表 4 可知温度高温区主要集中在部件上部及高压绕组之间区域, 表面温度最高达到 432.69 K。单独的高压绕组高温区域主要集中于绕组的上表面, 这是空气从下向上流动, 换热效果不断减小的缘故, 同时也受到高度方向环氧树脂包裹, 换热性差的影响, 其最高温度为 432.69 K, 平均温度为 412.8 K, 平均温升 84.8 K, 最高温升与平均温升系数为 1.235。

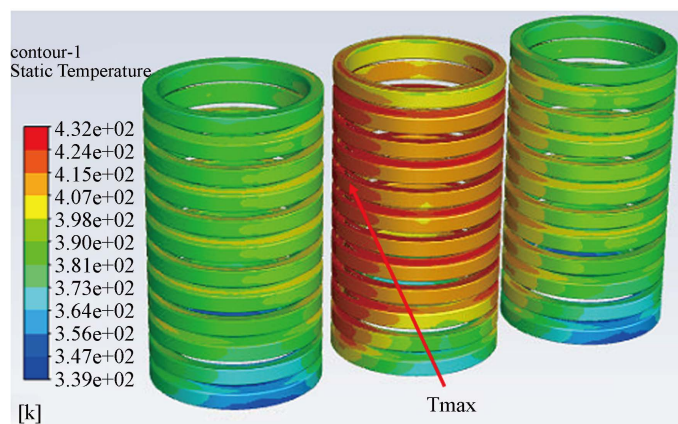


Figure 9. Cloud image of temperature distribution of high voltage coils
图 9. 高压线圈整体温度分布云图

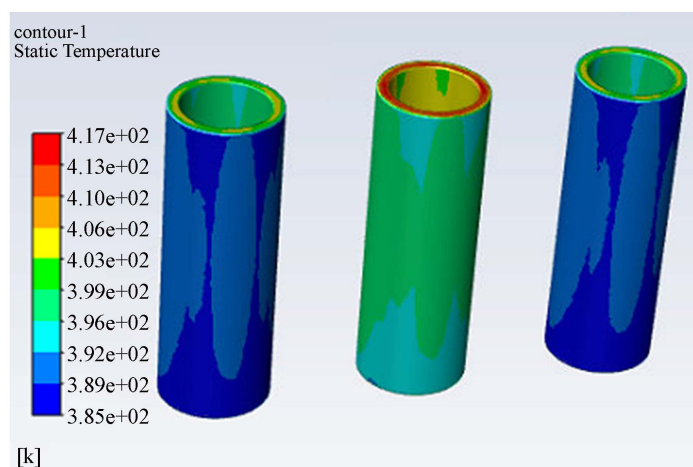


Figure 10. Cloud image of temperature distribution of low voltage coils
图 10. 低压线圈整体温度分布云图

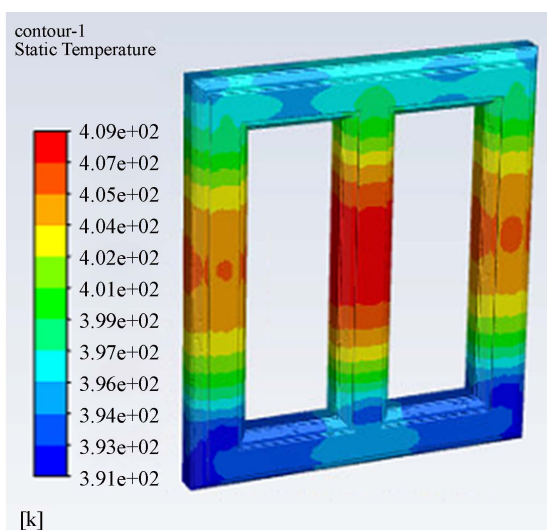


Figure 11. Cloud image of temperature distribution of core
图 11. 铁芯整体温度分布云图

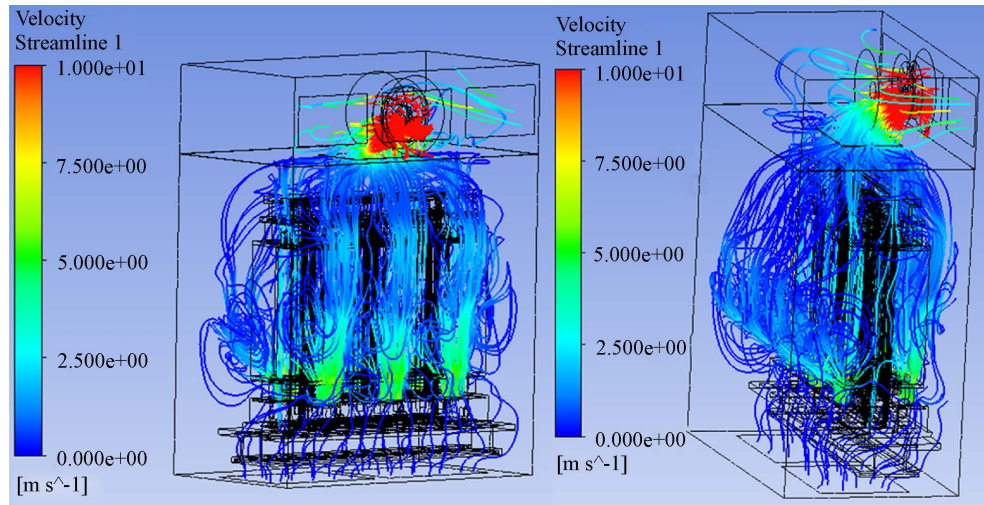


Figure 12. Overall area flow diagram
图 12. 整体区域流线图

Table 4. Statistical results of transformer temperature simulation
表 4. 变压器温度仿真统计结果

部件	平均温度(K)	平均温升(K)	最高温度(K)
低压 1	400.2	72.2	407.01
低压 2	409.3	81.3	417.52
低压 3	399.8	71.8	406.61
高压 1	398.5	70.5	413.84
高压 2	412.8	84.8	432.69
高压 3	398.5	70.5	413.85
铁芯	400.0	80.0	409.26

由图 9 所示高压 1 和 2、2 和 3 之间的区域为高温区，这是中间空气流动小，热量相对于两侧较难散出所导致的。

由图 10 所示低压线圈 2 由于其散热条件较差，所以相对于低压 1 和低压 3 温度最高，低压 2 最大温度为 417.52 K、平均温升 81.3 K，另外内外表面包裹的环氧树脂厚度很小，下端部空气温度较低，换热效果好，最高温度集中在上端部，底部出现低温区。

由图 11 所示铁心中间部分为其高温区，最高温度达到 409.26 K，平均温升 80.0 K，该温度与铁芯与低压之间距离大小及低压线圈与铁芯内部空气流动直接相关。

由图 12 所示是部分截面积机舱整体的流线图，从图中可知，由于上部风扇产生低压，引起底部空气进入机舱，并且底部 6 个涡流风扇不断进风，带来明显的空气向上流动；在出口区域，由于风扇作用，流线较密集；机舱空间较大、部件形状阻碍和上下部通道小等因素，导致了机舱内会产生一定涡流，但最终会进入上部区域，排出机舱为了显示效果将速度最大值设定在了 10 m/s。

高压绕组之间位置由于空气流动较小，最热点温度出现在该位置，本验证方案最高温升与平均温升系数为 1.235 满足要求，如大于 1.3 需要增加该位置空气流动，降低线圈温差范围，提高变压器长期运行可靠性。

5. 仿真结果验证

根据样机在机舱内试运行实测平均温升结果, 线圈实测温升依据 IEC 标准测量线圈 1 和 2 两相平均电阻值, 铁芯实测温升依据放置在铁芯中间相表面热电偶平均值, 以此验证仿真结果准确性, 比较结果见表 5 所示。

Table 5. Comparison of calculated and measured values

表 5. 计算温升与实测结果对比

部件	计算值(K)	实测值(K)	相对误差(%)
低压 1+2	76.8	77.6	1.04
高压 1+2	77.7	78.1	0.51
铁芯	80.0	81.4	1.75

6. 结论

模拟风力发电机舱内的实际环境, 建立了变压器电磁和热仿真模型, 并进行了合理的仿真计算, 为变压器电磁设计及散热设计提供计算依据, 并与最终变压器实测平均温升进行对比, 验证仿真计算准确性, 指导设计改进, 降低产品成本, 提高了产品设计的准确性和经济性。热仿真结果表明:

1) 模型下部速度场基本对称, 由于变压器一边靠近壁面, 导致流场有所区别, 两侧涡流风机吹风角度需要分别设置, 夹件对应风机位置需要增加开缺减少部件阻碍, 增加进入高低压线圈内部有效风量。

2) 由于出风口风扇区域速度和下部差异较大, 可以看出风扇上下速度分布基本对称, 平均速度达到了 30 m/s 左右, 最大速度集中在风扇罩区域, 据此选取出风口风扇罩位于变压器正上方位置。

3) 对于有低温升需求的变压器可以改进风机配置增加高压绕组之间位置风量, 可以有效降低高压线圈绕组之间位置温度, 对变压器整体温升水平实现有效降低, 可以作为后续其他项目课题进行研究。

参考文献

- [1] 梨剑锋. 风电机舱用干式变压器设计[J]. 大科技: 科技天地, 2011(6): 321-323.
- [2] 钟明, 薛利晨, 董丽萍, 等. 海上风电干式变压器设计和测试方法研究[J]. 可再生能源, 2010, 28(6): 125-128.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 王闯, 孙根会, 陈杰, 等. 风力发电机舱内干式变压器[P]. 中国专利, CN205828100U, 2016-06-29.
- [6] 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.
- [7] 刘峥, 王春光. 树脂浇注式干式变压器内部温度场的三维仿真计算[J]. 电气工程, 2018, 6(4): 332-339.
- [8] 黄超洋, 杨宗. 风冷变压器室热仿真计算及优化[J]. 中国科技信息, 2018(5): 77-78+15.
- [9] 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*. <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2012.128>
- [10] 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.
- [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] 杨弘熙, 张杰, 赵威. 风冷散热器仿真中对流换热系数的计算方法[J]. 河北工业大学学报, 2018, 33(1): 18-21.
- [13] 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.