

## PSM 高压电源干式变压器的热分析计算\*

夏于洋, 李 青, 毛晓惠

(核工业西南物理研究院, 成都 610225)

**摘 要:** 多绕组干式整流变压器作为托卡马克装置加热系统中高压电源的一个重要设备, 其性能优良与否直接关系到高压电源的输出品质。开展变压器的功率损耗与散热分析研究, 减少变压器因温度上升造成的性能影响, 对保证变压器的良好工作状态是十分重要的。通过 MATLAB 对干空气下的比热容、传热系数等热物理性质与温度的关系进行拟合分析, 得到相关的关系方程, 对变压器的对流传热与热辐射进行分析计算, 得到仅在空气自然对流和热辐射的情况下, 不能使变压器的温度控制在满足性能的温度范围之内。在强迫空气对流的情况下, 实现了变压器良好的散热。进一步利用 ANSYS 对变压器的温度场分布进行分析, 利用温度场的分布趋势图观察强迫风冷相对于自然冷却的优点, 强迫风冷降低了整体的温度, 使热量更快地散发到周围大气中, 减少了变压器受高温的危害。

**关键词:** 干式变压器; 拟合分析; 强迫对流; ANSYS; 温度场

中图分类号: TM4

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190294

## Thermal analysis calculation of dry-type transformer in PSM high voltage power supply

Xia Yuyang, Li Qing, Mao Xiaohui

(Southwest Institute of Physics, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** Multi-winding dry rectifier transformer is an important equipment for high voltage power supply in Tokamak heating system. Its excellent performance is directly related to the output quality of high voltage power supply. Carrying out research on power loss and heat dissipation of transformers, reducing the performance impact of transformers due to temperature rise, is very important to ensure the good working condition of the transformer. In this paper, the relationship between thermophysical properties and temperature is fitted by MATLAB. The convective heat transfer and thermal radiation of the transformer are analyzed and calculated by the equations. In the case of natural convection and heat radiation of the air, the temperature of the transformer cannot be controlled within a temperature range that satisfies the performance, and the temperature rise is about 200 °C. In the case of forced air convection, the good heat dissipation of the transformer is realized, and finally the forced air cooling at a wind speed of 2 m/s is achieved, and the temperature rise of the transformer is less than 75 °C, ensuring the good working condition of the transformer. The article further uses ANSYS to analyze the temperature field distribution of the transformer. Forced air cooling reduces the overall temperature and allows heat to be released to the surrounding atmosphere more quickly, reducing the damage of the transformer under high temperature.

**Key words:** dry-type transformer; fitting analysis; forced convection; ANSYS; temperature field

中国聚变工程实验堆(CFETR)是中国自主设计的下一代超导托卡马克。该装置中辅助加热系统包括NBI(中性束注入加热)、LHCD(低混杂波电流驱动与加热)、ICRF(离子回旋共振加热)、ECRH(电子回旋共振加热)。CFETR辅助加热系统所需的高压电源计划采用统一的拓扑结构设计,采用直流电源构成基本模块单元,通过串联迭加达到所需高压。电压调节控制采用直接级联与PWM调节相结合的方式,即采用PSM高压电源技术。

LHCD高压电源系统是辅助波加热单套电源系统中输出电压、加热功率最高的电源系统,其主要组成单元为

\* 收稿日期:2019-08-12; 修订日期:2019-09-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFE0300504)

作者简介:夏于洋(1992—),男,硕士,从事波加热辅助高压电源技术工作;xiayy@swip.ac.cn。

交流配电单元、变压器单元、直流模块单元、控制系统单元、保护单元等。多绕组干式变压器作为 PSM 高压电源系统中的一个重要设备,其变压器的性能对高压电源的输出品质影响较大,对此研究变压器在各种工作条件下对其自身的影响很有必要。温度对于电气设备的性能影响很大,一旦温度过高,变压器的负载损耗会增加,且长时间处于高温状态,变压器组件的寿命会缩短,其绝缘性能降低,影响变压器的运行安全和性能。所以有必要对变压器的发热与散热进行分析。变压器是一种不均匀的发热体,其内部热量流动和传递的过程是非常复杂的,这些都增加了变压器的发热计算的难度。变压器产生的各种损耗均以热量的形式从热源内部传递到热源的表面,然后通过对流和热辐射的形式传递到周围空间中<sup>[1-3]</sup>。因此需要讨论三种传热方式,传导、对流和辐射。在进行温度分析时需对每一实体的材料属性进行研究,包括热导率、辐射系数、密度、吸收率、对流换热系数、比热容等。

## 1 变压器的模型与参数

PSM 高压电源系统中的干式变压器是一个常规的圆柱式变压器。在进行 PSM 干式变压器的热分析是采用简化的变压器模型,通过对流传热原理对变压器的结构温度与散热进行分析估计,简化的变压器模型如图 1 所示。图 1(a)表示的是变压器的简化柱状图,其外面的红色部分表示的是风道,内部绿色表示的是变压器铁芯和绕组。图 1(b)中的  $T_{ai}$ ,  $T_{ao}$  分别表示空气流进风道的进口温度和出口温度,  $T_o$  表示外壁温度,一般认为外壁温度和周围环境温度一样,在本文中,选择外壁温度为 25 °C。  $T_{fo}$  表示变压器的外壁温度,即铜导体与铁磁材料等各种变压器损耗的能量转化为热能进行散发的表面温度<sup>[4]</sup>。

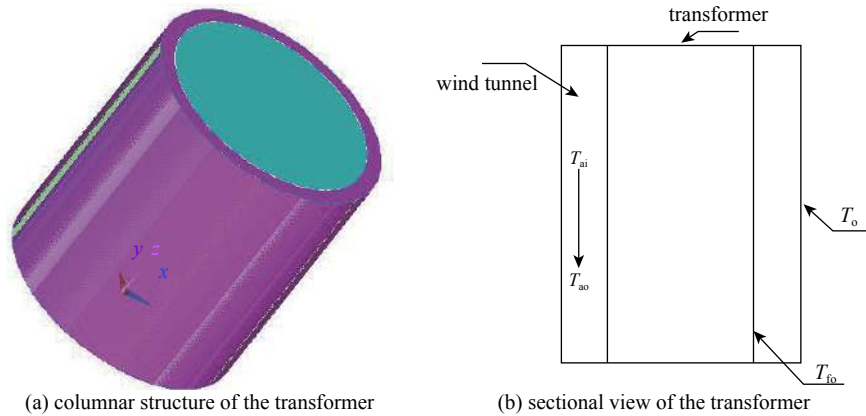


Fig. 1 Simplified transformer diagram

图 1 简化的变压器图

LHCD 辅助电源系统输出参数为 -80 kV/100 A。辅助低杂波高压电源系统中,变压器的额定容量为 6 000 kV,运行时间 3 600 s,变压器的短路阻抗不大于 8%。变压器的其他基本参数如表 1 所示,其中  $R$  表示变压器外半径,  $r$  表示变压器内半径,  $P_{Cu}$  为变压器铜损,  $P_{Fe}$  为变压器铁损,  $H$  为变压器的高度,  $T_{fo}$  为变压器外壁温度,  $D$  为风道宽度,  $A$  为变压器散热面积。干式变压器的损耗为 PSM 高压电源系统工作在输出直流电压 -80 kV, 电流 100 A 时其稳态过程中的损耗。

表 1 变压器的基本参数

Table 1 Basic parameters of the transformer

$R/m$	$r/m$	$P_{Cu}/W$	$P_{Fe}/W$	$H/m$	$T_{fo}/^{\circ}C$	$D/m$	$A/m^2$
0.98	0.74	39 823	10 770	1.8	25	0.20	7.49

## 2 变压器的换热分析

### 2.1 变压器的对流换热

对流是由于温度不同的各部分流体之间发生相对运动所引起的热量传递方式,与高温部件相接触的空气部分,由于吸收传递出来的热量而膨胀,密度降低,从而向上运动,密度较大的冷空气将下降代替原来因受热而上升的热空气而引发空气对流现象。空气的对流情况有自然对流和强迫对流<sup>[5]</sup>。

热对流的换热能量公式

$$Q = hA(T_1 - T_2) \quad (1)$$

式中： $h$ 为平均换热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； $A$ 为换热表面积， $m^2$ ； $A = \pi H(R+r)$ ； $T_1$ 为固体表面温度， $K$ ； $T_2$ 为周围流体温度， $K$ 。

自然对流散热是最普遍发生的现象，在本文中，变压器周围空间空气产生的自然对流的换热系数相对于其他环境来说，其值较小，因几台变压器在实际运行之中都处于室内，这一条件限制了空气的自然对流<sup>[6-7]</sup>。所以取自然对流的换热系数 $\tilde{h} = 10 W/(m^2 \cdot K)$ 。

平均换热系数

$$h = \frac{N_{ul}k}{L} \quad (2)$$

式中： $N_{ul}$ 为平均努塞尔数； $k$ 为热传导系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； $L$ 为变压器的竖直壁高度，本文采用 $L = H$ 。

由干空气下的空气导热系数与温度的关系可以近似的表达为

$$100k = 2.319 \times 10^{-6}T^2 + 0.007T + 2.385 \quad (3)$$

而平均换热系数与导热系数成正比，依据相关环境条件可以对强迫对流中的换热系数进行如下近似

$$h_{force} = 0.125T + 25 \quad (4)$$

## 2.2 变压器的辐射

热辐射是指物体发射电磁能，并被其他物体吸收转变为热的热量交换过程。热辐射过程中不需要任何介质，系统中的每个物体同时吸收和辐射热量。它们之间的热量传递可以用斯蒂芬-玻耳兹曼方程来计算

$$Q_r = \varepsilon\sigma A(T_3 - T_4) \quad (5)$$

式中： $\varepsilon$ 为辐射率(黑度)，本文取 $\varepsilon = 0.7$ ； $\sigma$ 为黑体辐射常数， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K)$ ； $T_3$ 为辐射面 1 的绝对温度， $K$ ； $T_4$ 为辐射面 2 的绝对温度， $K$ 。

## 2.3 干空气的基本参数

对于干式变压器采用的是在自然条件下的干空气进行散热，因此把握干空气的热物理性质对 PSM 干式变压器的热分析处理将会具有十分重要的意义。干空气的基本参数见表 2，其中 $T$ 为温度， $\rho$ 为空气密度， $c_p$ 为标准大气压下的比热容， $\mu$ 为动力粘度， $k$ 为导热系数。

表 2 干空气的热物理性质

Table 2 Thermophysical properties of dry air (  $p = 100 \text{ kPa}$  )

$T/^\circ\text{C}$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^3)$	$c_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\mu/(10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s})$	$k/(\text{mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
20	1.164	1.013	18.24	25.24
40	1.092	1.013	19.22	26.52
60	1.025	1.017	20.40	28.03
80	0.968	1.022	20.99	2.931
100	0.916	1.022	21.77	30.70
120	0.870	1.026	22.75	31.98
140	0.827	1.026	23.54	33.26
160	0.789	1.030	24.12	34.42
200	0.732	1.034	25.89	36.98
250	0.653	1.043	27.95	39.77
300	0.596	1.047	29.71	42.91

根据干空气的热物理性质可以得到其空气密度、比热容、动力粘度、导热系数等与温度之间的关系。利用 MATLAB 的曲线拟合进行分析，可以得到这四个物理性质的大致曲线方程。干空气的空气密度、比热容、动力粘度、导热系数等与温度之间的关系图与拟合曲线如图 2 所示。

在进行热设计分析的时候，由于温度的不同将引起空气的参数值的不同，利用图 2 中拟合得到的各参数与温度的关系式，代入热分析的计算公式中，可以简化计算过程，得到更加精确的结果。

## 3 变压器的热分析

当采用空气自然散热时，变压器达到稳定温度时，对空气温升进行计算。

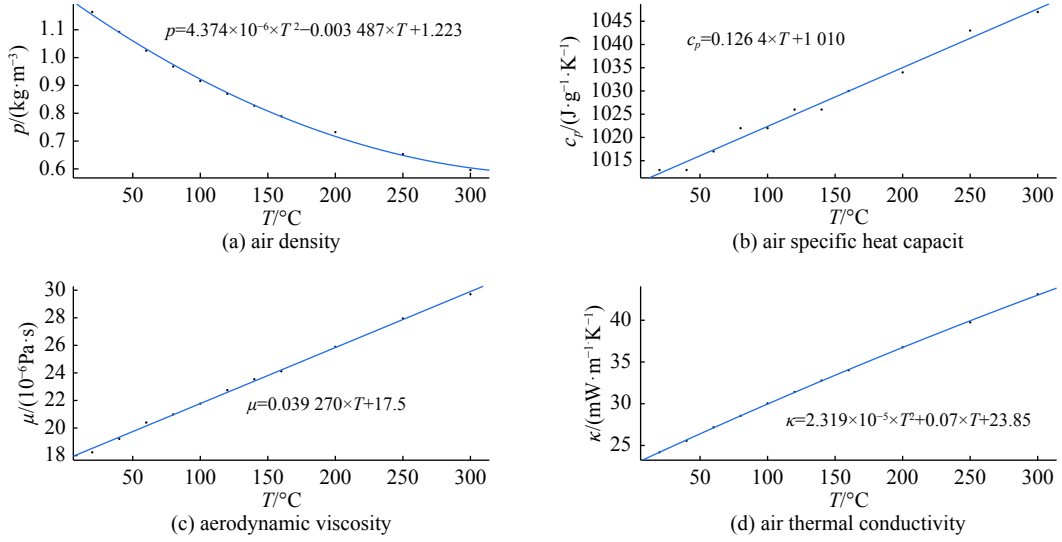


Fig. 2 Relationship between air density, specific heat capacity, dynamic viscosity, thermal conductivity, and temperature of dry air  
图 2 干空气的空气密度、比热容、动力粘度、导热系数等与温度之间的关系

绕组的热流密度

$$q_Q = \frac{\Delta P_{Cu}}{3F_Q} = \frac{39\ 832}{3 \times 5.24} \text{ W/m}^2 = 2\ 534 \text{ W/m}^2 \quad (6)$$

绕组对周围空气的温升

$$\theta_Q = 0.36q_Q^{0.8} = 0.36 \times 2\ 534^{0.8} \text{ }^\circ\text{C} = 190 \text{ }^\circ\text{C} \quad (7)$$

铁芯的热流密度

$$q_x = \frac{\Delta P_{Fe}}{3F_x} = \frac{10\ 770}{5.9} \text{ W/m}^2 = 1\ 825 \text{ W/m}^2 \quad (8)$$

铁芯对周围空气的温升

$$\theta_x = 0.36q_x^{0.8} = 0.36 \times 1\ 825^{0.8} \text{ }^\circ\text{C} = 146 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9)$$

变压器整体的热流密度

$$q_b = \frac{Q_b}{A} = \frac{31\ 779}{7.49} \text{ W/m}^2 = 4\ 242 \text{ W/m}^2 \quad (10)$$

变压器对空气的温升

$$\theta_b = 0.36q_b^{0.8} = 287 \text{ }^\circ\text{C} \quad (11)$$

PSM 干式变压器对空气的整体温升将达到 287 °C，因此仅在自然冷却的工作状态下，变压器的温升效果非常的明显。因此对于该 PSM 高压电源系统中的干式变压器只采用空气自然散热的方法，将会使变压器的环境温度达到一个影响其性能的值，必须采用其他措施来进行散热，保障变压器的良好性能。通过热力学可知，增加空气的流通速度将会增大换热系数，使热量更快的散发到周围空气中，减小变压器的温升。对此，分析 PSM 高压电源系统中干式变压器采用强迫风冷进行散热，研究得到其变压器的温升小于变压器规定的温度条件。

根据热力学可知，对于变压器的总共热量除辐射散热的热量外，其余通过强迫风冷的方法将其热量散发掉，从而避免变压器的过高温升导致变压器的性能受到影响和造成更大的变压器损耗。强迫空气对流的平均温度取出口温度和入口温度的平均值进行计算<sup>[8-10]</sup>。

强迫对流空气平均温度

$$T_a = (T_{ai} + T_{ao})/2 \quad (12)$$

强迫对流换热能量

$$Q_k = h_{force}A(T_{fo} - T_a) \quad (13)$$

强迫空气的温升热能

$$Q_T = \rho A D c_p (T_a - T_{ai}) \quad (14)$$

在根据其强迫换流的能量等于空气温升所吸收的能量:  $Q_k L / v = Q_T$ ,  $v$  表示空气速度。

通过利用 MATLAB 编程计算可以得到热辐射能量为  $Q_r = 6\,969\text{ W}$ , 此时的变压器剩余热量

$$Q_b = Q_{Cu} + Q_{Fe} - Q_r = 39\,832\text{ W} + 10\,770\text{ W} - 6\,969\text{ W} = 43\,633\text{ W} \quad (15)$$

对此采用强迫风冷对变压器进行散热分析。采用强迫风冷时, 当  $v = 2\text{ m/s}$ , 可以得到其强迫空气的出口平均温度  $T_{ao} = 73\text{ }^\circ\text{C}$ 。变压器的出口温度与采用的强迫风冷其进口风速的变化如图 3 所示。可以看出当风速比较低的, 由于空气的流通较慢, 对此变压器所散发的绝大部分热量将会对风道内的空气进行加热, 持续时间也会变长, 因此导致变压器的出口温度将会很高, 达到  $200\text{ }^\circ\text{C}$  以上, 这对于变压器的稳态运行是不利的。在风速达到  $v = 2\text{ m/s}$  以后, 其出口温度随着风速的增加下降的趋势变缓。风速的过快, 使强迫风在风道的停留时间过短, 吸收的热量少, 因此转化为空气的内能变小, 从而使得强迫风的温度上升偏低, 这样可以使变压器维持在一个较低温度的工作环境。由于强迫风需要风机进行驱动, 风速的增加会引起风机的功率增大, 而风机的功率增大, 会降低系统的有功功率, 过快的强迫风不能充分利用空气吸收热量, 所以干式变压器的风速需要控制在一个合理的范围之内。

PSM 高压电源干式变压器在风速为  $v = 2\text{ m/s}$  时, 利用 MATLAB 程序可以计算得到强迫对流可以换走热量  $Q_k = 46\,858\text{ W}$ , 其总共散热能量为  $Q_k + Q_r = 46\,858\text{ W} + 6\,969\text{ W} = 53\,827\text{ W}$ 。考虑变压器在运行过程中, 还存在一部分其他损耗将会变成热量, 需要散发。当风速为  $2\text{ m/s}$  时, 其散热能力足可以对变压器进行散热。

通过利用 ANSYS 对变压器的散热进行分析, 变压器采用空气冷却, 压强为一个标准大气压。风道宽度采用  $20\text{ mm}$ , 通过流体与热的分析, 可以得到空气在风冷通道中的温度分布图与风速分布图<sup>[1]</sup>, 如图 4、图 5 所示。

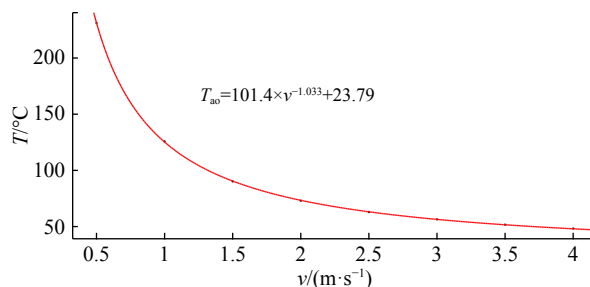


Fig. 3 Exit temperature changes with wind speed

图 3 强迫空气对出口温度与空气流速的关系

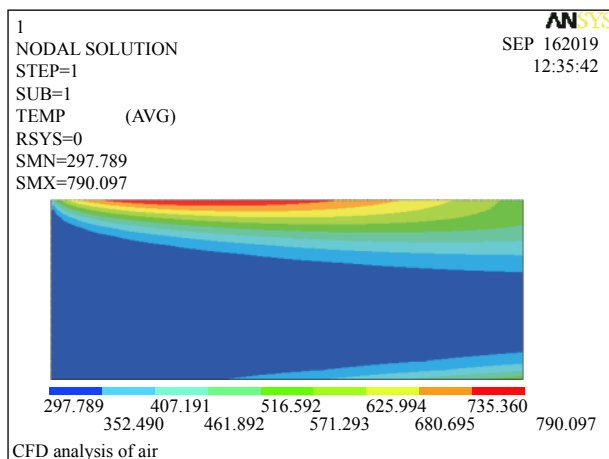


Fig. 4 Contour map of temperature field distribution in air-cooled channels

图 4 风冷通道中温度场分布等值线图

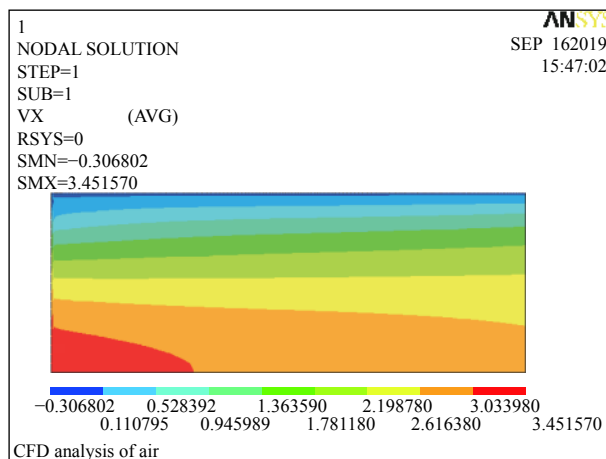


Fig. 5 Y-direction contour map in the air-cooled channel

图 5 风冷通道中 Y 方向等值线图

分析中将风道的比值变大 20 倍, 以便于观测, 同时将变压器进行倒向分析, 通过变压器的温度场等值线分布图可以看到变压器壁的温度很高, 这是由于空气与变压器壁接触中, 空气的流速降低, 阻碍变压器的散热性能, 并且由于空气与壁的接触面加热密度很高, 所以导致该处的温度较高, 其最高温度在  $790\text{ K}$ 。通过图 5 可以看到风速在整个通道中的具体流速, 可以发现, 温度低的部分其风速越快, 温度高的部分风速越慢, 整个通道的风速在  $0 \sim 3\text{ m/s}$  之间, 并不是很大, 所以对于驱动风冷的风机要求不会过高。

当变压器停止工作之后, 其变压器中因在工作期间导致的铜导线、矽钢片等的温度需要散发到空气当中, 在停止工作之后其变压器的温度变化如图 6 所示。

从图中可以看出由于铜导体的导热系数很高, 所以在铜导体的整个厚度区间之内, 他们的温度相差很小, 而在

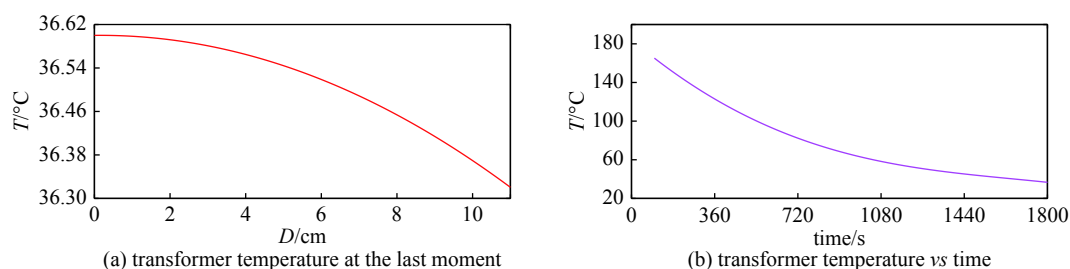


Fig. 6 Temperature change diagram of transformer during natural cooling

图 6 变压器自然冷却时温度变化图

变压器停止使用之后,铜导体可以在 20 min 之内自然冷却到 50 °C 左右。

## 4 结 论

首先对变压器的换热过程进行理论分析,主要分析变压器在对流换热和热辐射换热两种情况下的热损耗,利用 MATLAB 的拟合工具对变压器的换热空气介质进行拟合,分析其主要参数与温度的关系,并得出相应的函数表达式,将此表达式代入热分析的各参数中进行计算,减少分析误差。通过 ANSYS 对变压器的对流换热的空气进行温度场和速度分析,得出强迫空气散热情况下,空气的温度分布情况。计算得到在风速为 2 m/s 的强迫对流中,其出口温度为 73 °C,并随着风速的增加可进一步降低出口温度,但引起的风机功率消耗将会变大,权衡二者的利弊,取风速值为 2 m/s。在变压器停止运行后,绕组和铁芯在自然冷却条件下,20 min 内变压的温度就可冷却到 50 °C 左右。本文为 PSM 多绕组干式整流变压器的散热分析提供了一种研究分析方法,其结果对此类变压器的高性能和安全运行具有实用意义。

## 参考文献:

- [1] 孙雪静. 超高速永磁同步电机的热设计与大电流检测技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 43-46. (Sun Xuejing. Thermal design and high current detection technology for ultra-high speed permanent magnet synchronous motor. Xi'an: Xidian University, 2012: 43-46)
- [2] 庞营. 变压器发热与散热的数学研究[J]. 超星, 2014, 1(1): 53-54. (Pang Ying. Mathematical study on heating and heat dissipation of transformers[J]. Superstar, 2014, 1(1): 53-54)
- [3] 张鲁, 李永光, 高向宗, 等. 变压器冷却技术的发展[J]. 能源与节能, 2016, 128(5): 109-110. (Zhang Lu, Li Yongguang, Gao Xiangzong, et al. Development of transformer cooling technology[J]. Energy and Energy Conservation, 2016, 128(5): 109-110)
- [4] 金立军. 变压器室对流换热的分析[J]. 电力建设, 2000(8): 19-20. (Jin Lijun. Analysis of convective heat transfer in transformer room[J]. Electric Power Construction, 2000(8): 19-20)
- [5] 许进峰. ANSYS Workbench 15.0完全自学一本通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 426-427. (Xu Jinfeng. ANSYS Workbench 15.0 complete self-study guide. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 426-427)
- [6] 苏珂, 于学莲. 110 kV级变压器冷却方式的选择[J]. 科技风, 2015(2): 11. (Su Ding, Yu Xuelian. Selection of 110 kV transformer cooling method[J]. Science and Technology, 2015(2): 11)
- [7] 星文彤, 李志尊, 胡仁喜, 等. ANSYS13.0热力学有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 11-16. (Xing Wentong, Li Zhizun, Hu Renxi, et al. ANSYS13.0 thermodynamic finite element analysis from entry to proficiency. Beijing: China Machine Press, 2011: 11-16)
- [8] 郭振华. 大型变压器绕组涡流损耗及热点温度的研究[D]. 河北: 河北工业大学, 2013: 5-8. (Guo Zhenhua. Study on eddy current loss and hot spot temperature of large transformer windings. Hebei: Hebei University of Technology, 2013: 5-8)
- [9] 张锋. 基于ANSYS的DC/DC电源模块热分析和热设计研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008: 27-29. (Zhang Feng. Thermal analysis and thermal design of DC/DC power module based on ANSYS. Chongqing: Chongqing University, 2008: 27-29)
- [10] 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]. 研究与设计, 2016, 40(1): 34-38. (Xing Ya, Fan Bo, Kang Yali, et al. Calculation of internal temperature field of resin insulated dry type transformer[J]. Research & Design, 2016, 40(1): 34-38)
- [11] 谢龙汉. ANSYS FLOTTRAN流体与热分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 413-456. (Xie Longhan. ANSYS FLOTTRAN fluid and thermal analysis. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 413-456)