

基于有限元法的干式变压器多物理场分析计算

兰贞波¹, 文武², 阮江军², 朱军^{2,3}

(1. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074; 2. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072;
3. 中国船舶重工集团公司第七一二研究所, 武汉 430064)

摘要: 变压器的正常稳定运行对电力系统有着重要意义,而温度是衡量变压器运行状态的一个重要指标。笔者基于有限元的耦合场计算得到了干式变压器的温度分布。首先,通过三维磁场的计算得到变压器的各部分损耗,然后将损耗作为载荷加载至二维稳态流体—温度场的模型中计算对应的温度分布,通过变压器样机的测温实验验证了该方法的准确性。同时也分析了对应的二维瞬态流体—温度场,最后将变压器最大允许运行温度值作为参考,得到了变压器不同过负荷情况时的允许运行时间,结果表明:该干式变压器在10%过负荷情况下能正常持续工作,而在过负荷分别为20%、30%、40%和50%的情况下最大允许运行时间分别是127、68、26、8 min。该工作为同类型干式变压器的过负荷运行能力提供了可参考的依据。

关键词: 干式变压器; 耦合场; 磁场; 流体—温度场; 过负荷能力

Analysis of Multi-physical Field in Ventilated Dry-type Transformer with FEM Method

LAN Zhenbo¹, WEN Wu², RUAN Jiangjun², ZHU Jun^{2,3}

(1. Wuhan Nari Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. 712th Research Institute, CSIC, Wuhan 430064, China)

Abstract: Temperature is an important index to measure operation state of a power transformer. In this paper, the coupled-field finite-element method is used to calculate the temperature distribution of a ventilated dry-type transformer. Firstly, power loss of each component of the transformer is obtained by three-dimensional (3D) magnetic field calculation. Then the losses are input to the two-dimensional (2D) steady-state fluid-thermal field model as a load to calculate the temperature distribution of the transformer. Temperature measurement experiment shows that the computed temperature rise is in good agreement with the measured value. Moreover, the 2D transient fluid-thermal field is calculated by using the power losses in overcurrent condition. Finally, the maximum allowable temperature value of the transformer is taken as the reference to get the transformer's maximum permissible working time for different overload conditions. The results show that the dry-type transformer can work normally at 10% overload, while the maximum permissible working time is 127, 68, 26, and 8 minutes as the overload is 20%, 30%, 40% and 50%, respectively. This study may provide a reference for understanding overload capability of this kind of ventilated dry-type transformers.

Key words: ventilated dry-type transformer; coupled-field; magnetic field; fluid-thermal field; overload capability

0 引言

作为电网中的主要电气设备,变压器对电能的经济传输、灵活分配、安全使用等具有重要意义。长期以来,人们对于变压器中电、磁和力方面的问题已经进行了大量的研究,至今已能很好地揭示这些

现象的物理状况,并已有了足够精确的数学描述。然而对变压器中的发热和冷却问题,长期以来研究则相对较少。究其原因,一方面是先前在变压器容量不是十分大的情况下,热问题没有引起人们足够的重视,另一方面它涉及到传热学、流体力学、电磁学的边缘学科,其复杂性和试验难度也限制了其自身的发展。在超大容量变压器不断涌现的同时,变

压器的散热问题也不断突出。因此对变压器热性能进行分析研究成为国内外变压器领域研究的重点。

传统的变压器结构设计方法是一个“初步试制—试验—改进试制—若干循环”的循环设计模式,这种设计模式使得产品的开发周期很长、材料损耗较大,同时会产生很高的费用。数值计算是变压器结构设计的一种快速有效的方法,但由于变压器内部复杂的多物理场的存在,要想准确得到变压器的温度分布,变压器多物理场的分析是很有必要的^[1]。

目前学者已经对变压器有很多的研究,包括对变压器的局部放电特性、场强分布、涡流损耗分析以及温度场的计算^[2-7]。文[8]中通过磁场—温度场的耦合计算得到某干式变压器的温度分布情况,但在有限元的分析过程中并未考虑流体部分的计算,只是简单地设定了相应的辐射率和对流换热系数,实际上变压器内部的对流系数在不同位置处均不一致,同时其流体场和温度场是相互影响的,故该简化计算的方法大大降低了结果的准确性。文[9-11]中通过对干式变压器温度场的有限元仿真得到对应的温度分布,实现了对变压器流体—温度场的耦合计算,但该文中变压器的损耗并不是通过磁场计算得来,而是通过经验公式得到,并未实现磁场—流体—温度场的耦合计算。文[12]中通过有限差分法直接计算变压器的温度场,而对应的流体场参数则是通过经验公式得到。同时目前暂无通过瞬态温度场的分析计算得到变压器的过负荷能力的相关研究。

笔者通过耦合场的计算得到了干式变压器的温度分布。其中变压器的各部分损耗是通过三维变压器模型的磁场计算得到,计算得到的损耗结果作为输入加载至二维流体—温度场模型中,得到最终的温度分布。同时也对变压器的过负荷能力进行了分析,将变压器过电流时磁场计算的损耗作为瞬态流体—温度场的载荷,通过瞬态温度场的计算得到变压器的各处温度随时间的变化关系。依据变压器的最大允许温度值作为衡量变压器允许运行时间的标准,确定变压器的过负荷能力。

1 计算模型

图1为变压器的实际图片,该变压器是三相干式变压器,主要结构包括铁心、高压绕组和低压绕组,变压器下端口是对应的6台风机。其联接组别为Dd0Y11,额定频率为50 Hz,额定容量为4 920 kV·A,其中次级容量分配为上下段各50%,高压侧的额定电压为6 600 V,低压侧的额定电压为1 540 V。其

中高压线圈材料是扁铜线,而低压线圈则采用的是铜箔。铁心是由30Q130硅钢片叠压而成,高低压线圈均分为上下两段,其中高压线圈的上下线圈均为三角形接法,而低压线圈的上段线圈为三角形接法,下段线圈为星型接法。高压线圈的匝数为476匝,上段低压线圈的匝数为51匝,下段低压线圈的匝数为30匝。其对应的尺寸参数见表1。



图1 变压器的实际图片

Fig. 1 The picture of the transformer

表1 变压器的尺寸参数表

Table 1 Dimension parameters of the transformer

结构参数	数值
相数/相	3
铁心叠片总厚度/mm	380
铁心高度/mm	2 120
高压线圈截面积/mm ²	26.5
高压线圈匝数/匝	472
上段低压线圈(Δ 联接)截面积/mm ²	330
下段低压线圈(Y 联接)截面积/mm ²	476
上段低压线圈(Δ 联接)匝数/匝	51
下段低压线圈(Y 联接)匝数/匝	30
低压线圈外径/mm	262
低压线圈内径/mm	205
高压线圈外径/mm	350.5
高压线圈内径/mm	309

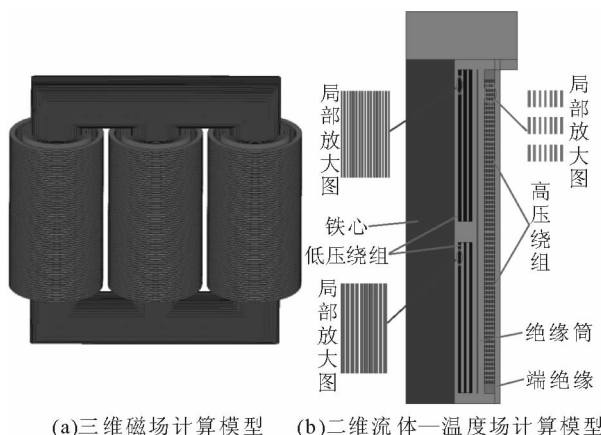
对应变压器的计算模型见图2。在尽量保证计算精度的前提下,对该变压器作如下假设以简化计算量:

- 1)假设变压器各部分的材料属性为常数,忽略材料特性随温度的变化而改变的情况;
- 2)三相变压器的整体结构是沿铁心界面平面对称的;
- 3)变压器每相损耗和通风结构是一致的。

2 多物理场理论分析

2.1 磁场分析

从麦克斯韦方程出发,变压器磁场的问题可以通过使用式(1)所示的控制方程来求解^[13-15]:



(a) 三维磁场计算模型 (b) 二维流体—温度场计算模型

图 2 计算模型

Fig. 2 The calculation model

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} - \nabla \nabla \cdot \mathbf{A} = \mathbf{J}_s \quad \text{在 } V_1 \text{ 区域}; \quad (1)$$

$$\begin{cases} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} - \nabla \nabla \cdot \mathbf{A} + \sigma \nabla \phi + j\omega \mathbf{A} = 0 \\ \nabla \cdot (-\sigma \nabla \phi - j\omega \sigma \mathbf{A}) = 0 \end{cases} \quad \text{在 } V_2 \text{ 区域}. \quad (2)$$

式(1)、(2)中: $\mathbf{A}$ 和 ϕ 分别表示矢量磁位和电势; V_1 是有源区域; V_2 是无源区域。

变压器的损耗主要包括铜损和铁损。铜损是由于绕组通过电流引起的损耗,铜损可以直接通过计算变压器二次侧线圈的损耗得到。而铁心损耗则不能通过计算直接得到,但由于铁损可以分解为涡流损耗、磁滞损耗和附加损耗,而且三者损耗可以通过对应的公式计算得到^[16-19]。故可以通过式(3)来计算变压器的铁损

$$P_V = k_h f B^\beta + k_c f^2 B^2 + k_e f^{1.5} B^{1.5}. \quad (3)$$

式(3)中, K_h 、 K_c 、 K_e 分别表示涡流损耗系数、磁滞损耗系数和附加损耗系数。

2.2 流体场分析

变压器流体场的通用控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \nabla(pu\phi) = \nabla(I\nabla\phi) + S. \quad (4)$$

式(4)中:等式左边第1项为瞬态项;第2项为对流项;等式右边第1项为扩散项;第2项为源项。

同时对应的瞬态流体场的控制方程可以描述为

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + S_{Mi} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho e u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k \frac{\partial T}{\partial x_i}) + S_\Phi \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: ρ 为密度; x 为实际流动区域的空间坐标; u 为对应流体的流速; S_{Mi} 和 S_Φ 分别为动量守恒和能量守恒方程的源项。

2.3 温度场分析

稳态热问题的微分方程可以描述为

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial T}{\partial z}) = -\rho Q. \quad (6)$$

瞬态温度场不仅是空间函数也是时间的函数,因为载荷随时间变化的瞬态温度分析,热能储存效果应予以考虑,瞬态过程方程为

$$\begin{cases} T = T_0 - \Gamma_1 \\ (\lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} n_x) + (\lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} n_y) = q - \Gamma_2 \\ (\lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} n_x) + (\lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} n_y) = h(T_s - T_B) - \Gamma_3 \end{cases} \quad (7)$$

式(6)、(7)中: T 为对应的温度值; k_x 、 k_y 、 k_z 是热传导率在 x 、 y 和 z 轴的分量; ρ 是材料密度; Q 为热源内的密度; Γ_1 是第1类边界条件; Γ_2 为第2类边界条件; Γ_3 为第3类边界条件。

3 计算

文中变压器多物理场的计算流程见图3。其中结果A表示额定工况下稳态流体和温度的结果,结果B为过负荷情况下瞬态流体和温度的结果。

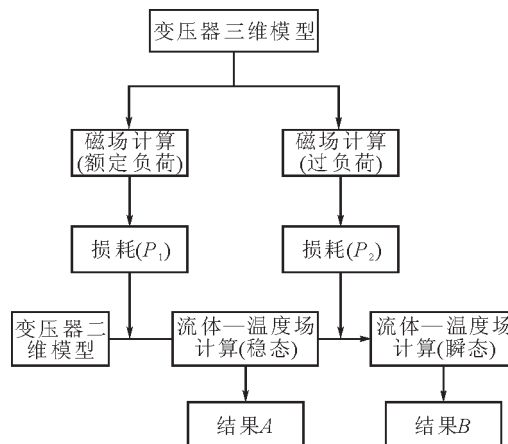


图 3 计算流程图

Fig. 3 The flowchart of the entire analytical methodology

计算变压器对应的磁场和流体—温度场时的材料参数见表2,由于该变压器铁心的材料为30Q130b,故铁心磁导率采用的是该材料的 $B-H$ 曲线,对应的 $B-H$ 曲线见图4。

表 2 变压器的材料参数

Table 2 Material data of the transformer

材料	电阻率/ ($10^{-8}\Omega \cdot m$)	相对磁 导率	导热系数/ [$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$]	比热/[$J \cdot$ ($kg \cdot K$) $^{-1}$]	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)
高压线圈	1.79	1	380.0	460	8 900
低压线圈	1.79	1	380.0	460	8 900
铁心	—	$B-H$ 曲线	50.0	480	7 850
绝缘材料	—	1	0.2	865	2 900

3.1 磁场计算结果

为了分析变压器的温度分布,则必须先得到各

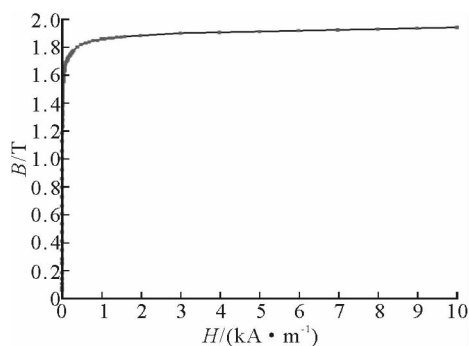


图4 非线性材料30Q130b的B-H曲线图

Fig. 4 The B-H curve of non-linear material 30Q130b

部分的损耗,主要包括线圈铜耗和铁心损耗,而线圈铜耗可以通过磁场计算直接得到。由于变压器铁心损耗是和铁心的磁密分布是相关的,图5给出了铁心磁密的计算结果。

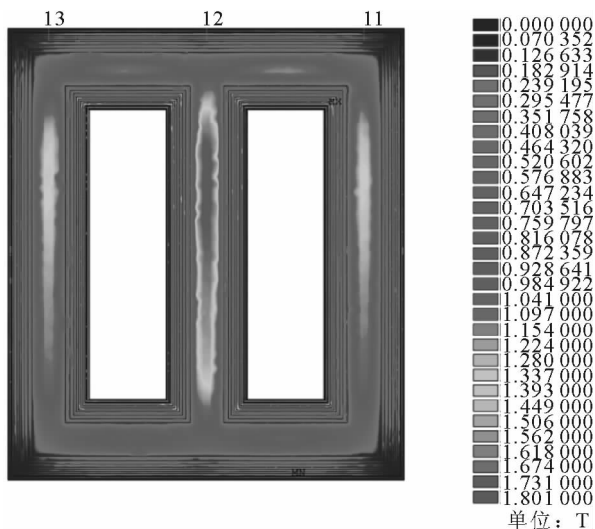


图5 变压器铁心处磁密分布图

Fig. 5 The magnetic flux density distribution of transformer core

通过对变压器三维磁场的计算,得到铁心的磁密分布见图5,其中A相与C相铁心的磁密分布基本一致,且均略小于B相(中间相)磁密。同时表3列出了磁场求解的损耗分布,其中铁心损耗为4 058.4 W,高低压线圈的损耗分别为8 874.3 W和9 365.5 W。

表3 变压器磁场损耗计算结果

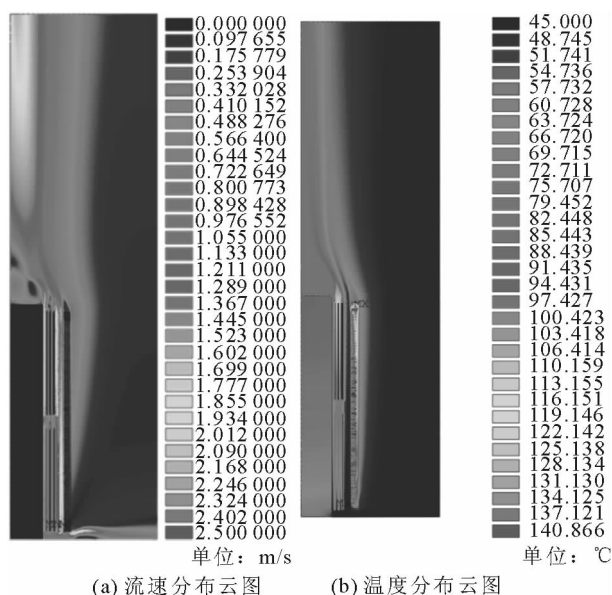
Table 3 The power loss of the transformer

类别及合计	损耗/W
铁心	4 058.4
高压线圈	8 874.3
上段低压线圈	4 210.5
下段低压线圈	5 155.0
合计	22 298.2

3.2 稳态流体—温度场计算结果

变压器稳态流体和温度分布结果图见图6、7,

计算时环境温度设置为45℃。其中图6(a)为变压器正常工作时的流速分布云图,由于风速是由变压器下端口流向上端口,且高压绕组间隙小于低压绕组间隙,所以流体在高压绕组间隙内的流速明显低于低压线圈间流体的流速,导致高压绕组内部的散热效果要明显低于低压线圈。图6(b)可以看出,变压器各部分的温度分布是不均匀的,绕组温度值随高度的上升而增大,绕组的最低温度处位于绕组最低端,变压器的热点位于高压线圈中间层的上端,最大温度值为140.866℃。而铁心最大温度值为89.899℃,下端低压线圈最大温度值为82.032℃,上端低压线圈温度最大值为116.459℃。



(a) 流速分布云图 (b) 温度分布云图

图6 变压器内部的整体流速和温度分布云图

Fig. 6 The velocity and temperature distribution

同时列出了沿不同路径的温度分布情况,分别取铁心和高低压线圈上相应的点作为路径。其中铁心路径为铁心沿轴心从下往上的129个等距离点,上下段低压线圈则分别取中间层线圈沿高度方向从下往上的60个等距离点为对应路径,而高压线圈的路径为第1、3、4、6层绕组从下至上的68个等距离点。其对应路径上温度变化曲线见图8-11。

为了验证计算结果的准确性,对该变压器进行了温度测量实验,并在运行稳定后记录了不同测量点的温度数值,该变压器不同位置温度测量值与计算值见表4。

通过表4可知,仿真得到的铁心和高低压线圈各处热点温度与实验得到的数值较为一致,验证了计算结果的准确性。

3.3 瞬态流体—温度场结果

以变压器的额定电流作基值,变压器在额定参

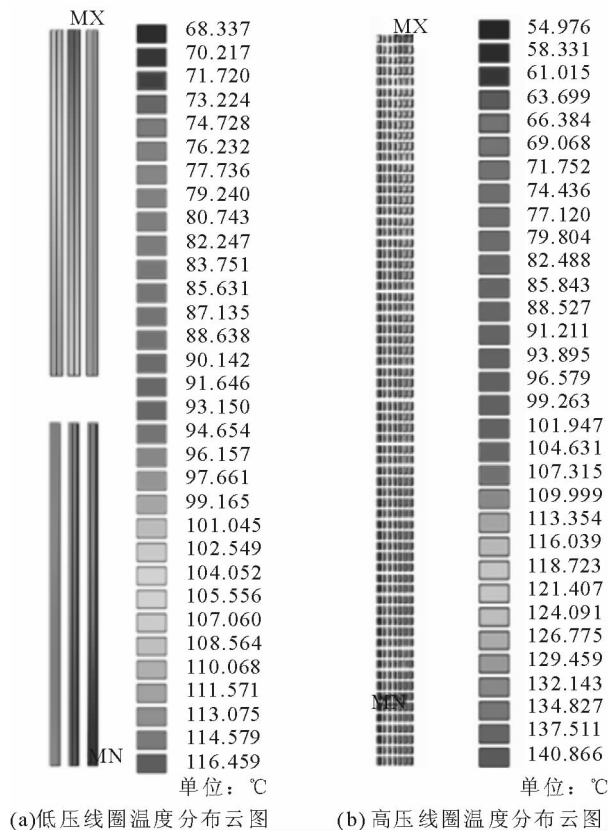


图 7 变压器的高低电压线圈温度分布云图

Fig. 7 Temperature distribution of the low/high voltage winding

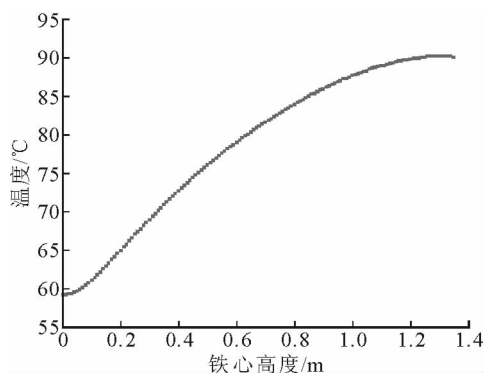


图 8 铁心沿轴心温度部分情况

Fig. 8 The temperature distribution in core axis

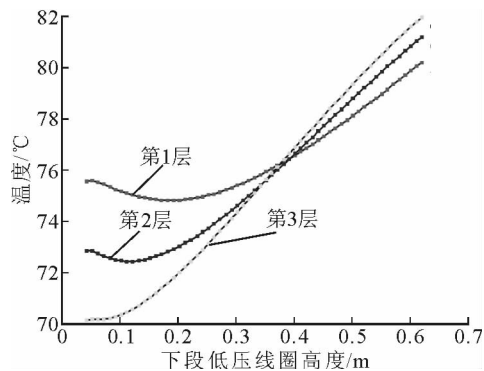


图 9 下段低压线圈沿高度方向温度分布

Fig. 9 The temperature distribution in lower of low voltage winding

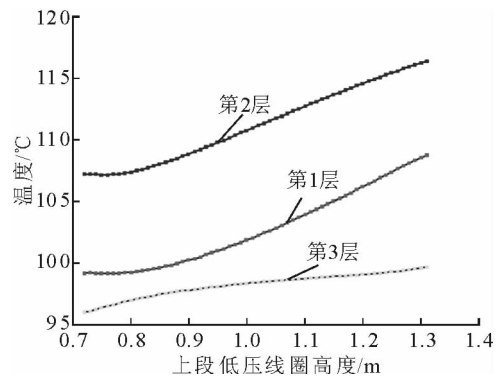


图 10 上段低压线圈沿高度方向温度分布

Fig. 10 The temperature distribution in upper of low voltage winding

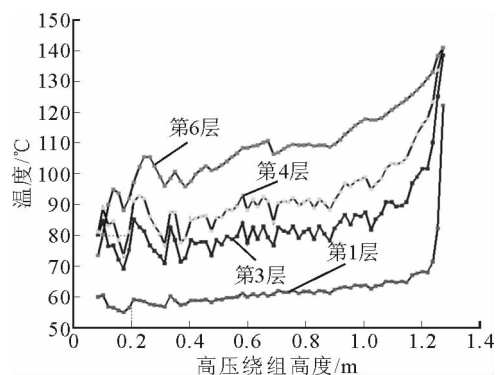


图 11 高压线圈沿高度方向温度分布

Fig. 11 The temperature distribution in high voltage winding

表 4 测量与计算的温升值的对比

Table 4 Tested and computed value of temperature rise

测量处	测试值/°C	计算值/°C	误差/%
铁心	46.3	44.899	3.0
上段低压线圈	75.9	71.459	-5.9
下段低压线圈	40.7	37.031	-9.9
高压线圈	94.7	95.866	1.2

数下运行稳定后(指温度稳定),分别以额定电流的 1.1~1.5 倍作为该变压器的电流输入量,分析了在不同过电流(过负荷)下热点温度随时间的变化情况(环境温度设置为 45 °C),见图 12。由此得到的允许运行时间可作为变压器的过负荷能力的参考值。

由于该变压器的绝缘等级为 H 级别,根据干式变压器的国标 GB 1094.11—2007,该变压器绕组允许最大温升为 125 °C,结合文中计算的热点温度随时间变化的曲线,得到变压器的不同过负荷情况下最大允许运行时间见表 5。

由表 5 可知,该变压器在过负荷为 10%的情况下仍然能长期正常运行,而在过负荷分别为 20%、30%、40%和 50%的情况下最大允许运行时间分别是

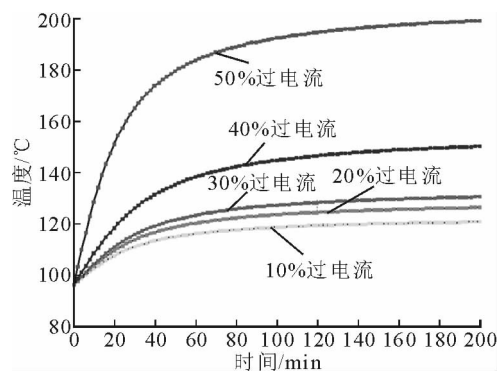


图12 热点温度随时间变化曲线

Fig. 12 The hotspot temperature variation curve

表5 变压器不同过负荷情况下允许运行时间

Table 5 Allowable running time in different overload cases

过负荷百分比/%	10	20	30	40	50
计算允许工作时间/min	127	68	26	8	8

127、68、26、8 min。当超过其对应的允许运行时间时变压器就会由于热点温度过高而损坏。

4 结论

笔者通过三维变压器模型的磁场计算得到变压器的各部分损耗,利用二维流体—温度场模型,使用损耗计算结果,得到最终的温度分布,并对该变压器的过负荷能力进行了分析评估,给出该变压器的过负荷能力。通过对该干式变压器多物理场的分析,得到如下结论:

1)由于结构原因,该变压器A相与C相铁心的磁密分布基本一致,且均小于B相(中间相)磁密,在变压器的优化设计中建议改进三相磁路不平衡的铁心设计;

2)该变压器运行稳定后,各部分的温度分布是不均匀的,各部件的温升值均随高度的上升而增大,其绕组温升值相对其他部件是最高的,变压器的热点位于高压线圈中间层的上端,在变压器运行过程中应该加强热点处的对流通风效果;

3)该干式变压器在10%的过负荷情况下仍然能长期正常运行,而在过负荷分别为20%、30%、40%和50%时,变压器的最大允许运行时间分别是127、68、26、8 min,变压器过负荷运行时应严格按照其最大允许运行时间要求,否则极有可能由于热点温度过高而损坏。

文中的研究结果为变压器的设计起到了指导意义,并为变压器的过负荷运行时间提供了参考。但值得注意的是,考虑到变压器复杂的流体—温度场,笔者研究工作仍处于初步阶段,有许多问题在后期需要完善,比如文中计算变压器

铁耗只是通过铁耗的拟合公式与磁场计算结果相结合而得到;同时流体—温度场的计算模型为二维模型。

参考文献:

- [1] MARIGNETTI F, COLLI V D, COIA Y. Design of axial flux PM synchronous machines through 3-D coupled electromagnetic thermal and fluid-dynamical finite-element analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(10): 3591-3601.
- [2] SHANEL M, PICKERING S J, LAMPARD D. Application of computational fluid dynamics to the cooling of salient pole electrical machines[C]//International Conference on Electrical Machines. Espoo Finland: Helsinki University of Technology, 2000: 338-342.
- [3] FAIZ J, GANJI B, CARSTENSEN C E, et al. Temperature rise analysis of switched reluctance motors due to electromagnetic losses[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(7): 2927-2934.
- [4] 郑书生, 陈金祥, 李成榕, 等. 变压器绕组对局部放电特高频定位方法的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 324-329.
ZHENG Shusheng, CHEN Jinxiang, LI Chengrong, et al. Influence of windings on locating partial discharge in transformers by using ultra high frequency method[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 324-329.
- [5] 金福宝, 周远祥, 贺俊杰, 等. 变压器油道内油流带电现象与油道电场的仿真计算[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1367-1373.
JIN Fubao, ZHOU Yuanxiang, HE Junjie, et al. Streaming electrification measurement and electric field simulation in oil duct of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1367-1373.
- [6] JING Yongteng, LI Yan. Eerhemubayaer, eddy current losses calculation and shields of high voltage auto-transformer[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1988-1994.
- [7] PARK B G, KIM T S, LEE K J, et al. Magnetic-field analysis on winding disposition of transformer for distributed high-speed train applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6): 1766-1769.
- [8] 熊 兰, 赵艳龙. 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.
XIONG Lan, ZHAO Yanlong. Temperature rise analysis and calculation of cast resin dry-type transformers[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 265-271.
- [9] 曲德宇, 刘文里. 干式变压器绕组温度场的二维数值分析[J]. 变压器, 2011 48(12): 21-25.
QU Deyu, LIU Wenli. 2D numerical analysis of temperature field of dry-type transformer winding[J]. Transformer,

- 2011, 48(12):21-25.
- [10] 杜 莉, 王秀春. 油浸式变压器内流场和温度场的数值模拟研究[J]. 变压器, 2012, 49(1): 19-22.
- DU Li, WANG Xiuchun. Numerical simulation research on inner flow and temperature fields in oil-immersed transformer[J]. Transformer, 2012, 49(1): 19-22.
- [11] 唐宗华, 谭震宇, 孙树敏, 等. 基于耦合场的金属氧化物限压器的温度计算与特性分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 733-740.
- TANG Zonghua, TAN Zhenyu, SUN Shumin, et al. Temperature calculation and property analysis of metal oxide varistor based on coupled fields[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 733-740.
- [12] 姚育成, 蔡定国. 干式变压器温度场数值模拟[J]. 变压器, 2012, 49(8): 31-33.
- YAO Yucheng, CAI Dingguo. Numerical simulation of temperature field of dry-type transformer[J]. Transformer, 2012, 49(8): 31-33.
- [13] ZHANG Yujiao, RUAN Jiangjun, HUANG Tao, et al. Calculation of temperature rise in air-cooled induction motors through 3-D coupled electromagnetic fluid-dynamical and thermal finite-element analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2012, 48(2): 1047-1050.
- [14] HO S L, LI Y, LIN X, et al. Calculations of eddy current, fluid, and thermal fields in an air insulated bus duct system[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2007, 43(4): 1433-1436.
- [15] HO S L, LI Y, LIN X, et al. A 3-D study of eddy current field and temperature rises in a compact bus duct system[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2006, 42(4): 987-990.
- [16] AHN H M, LEE B J, HAHN S C. An efficient investigation of coupled electromagnetic-thermal-fluid numerical model for temperature rise prediction of power transformer[C]// 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). [S.l.]: IEEE, 2011: 1-4.
- [17] LIN D, ZHOU P, FU W N, et al. A dynamic core loss model for soft ferromagnetic and power ferrite materials in transient finite element analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2004, 40(2): 1318-1321.
- [18] BERTOTTI G, FIORILLO F, SOARDO G. Dependence of power losses on peak magnetization and magnetization frequency in grain-oriented and non-oriented 3% SiFe[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1987, 23(5): 3520-3522.
- [19] BERTOTTI G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1988, 24(1): 621-630.
- 兰贞波(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为高压电器及电磁场数值计算。
- 文武(1966—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电磁场数值计算及电力系统电磁兼容。
- 阮江军(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电磁场数值计算、电能质量及电磁兼容方面的研究。
- (编辑 吴俊丽)

(上接第 106 页)

- University, 2005.
- [20] 田铭兴, 励庆孚. 变压器式可控电抗器的磁场和参数计算[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(6): 656-657.
- TIAN Mingxing, LI Qingfu. Calculation of magnetic flux and parameters of reactor of transformer type[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(6): 656-657.
- [21] 孙新年, 于佰建. 快速响应磁控电抗器在光伏电站的应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(2): 33-39.
- SUN Xinnian, YU Baijian. Application of the fast response magnetically controlled reactors in photovoltaic power plant[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(2): 33-39.
- [22] 王 恒, 赵 妍, 刘晓君, 等. TCT 变压器型可控电抗器消除 5、7 次谐波的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(2): 57-61.
- WANG Heng, ZHAO Yan, LIU Xiaojun, et al. Study on elimination of 5th and 7th harmonics by TCT type adjustable reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(2): 57-61.
- 龚 岩(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为变压器式可控电抗器参数优化。
- 田铭兴(1968—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电机电器及控制。
- (编辑 吴俊丽)