

对流—辐射边界对变压器温度场影响的解耦研究

鲁非¹, 王圣康², 李浩波², 卢仰泽¹, 王伟³, 林福昌², 李化²

(1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 武汉 430077; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074;
3. 国网湖北省电力有限公司, 武汉 430077)

摘要: 对流—辐射边界是油浸式变压器最重要的散热方式,对变压器内部温度分布具有决定性作用。文中结合传热学基本理论以及变压器实际结构对变压器对流边界和辐射边界进行研究,针对目前直接以材料辐射率表征辐射换热强度的方法进行修正,结合变压器结构提出了有效辐射率的概念,使得辐射边界计算更加准确。并通过建立110 kV油浸式变压器三维流体—温度场模型分析了不同环境条件(风速、环境温度)对变压器对流边界和辐射边界的影响,为有限元分析计算中边界条件的确定提供了指导。

关键词: 变压器; 电磁—流体—温度场; 对流—辐射边界; 环境温度; 风速

Decoupling Study on Influence of Convective-radiation Boundary on Transformer Temperature Field

LU Fei¹, WANG Shengkang², LI Haobo², LU Yangze¹, WANG Wei³, LIN Fuchang², LI Hua²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Corporation Limited, Wuhan 430077, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3. State Grid Hubei Electric Power Corporation Limited, Wuhan 430077, China)

Abstract: The convection-radiation boundary is the most important heat dissipation method for oil-immersed transformers and has a decisive effect on the internal temperature distribution of the transformer. In this paper, the convection boundary and radiation boundary of the transformer are studied in combination with the basic theory of heat transfer and the actual structure of the transformer, and the current method of directly characterizing the radiation heat transfer intensity by the material emissivity is revised. The concept of effective radiation rate is proposed in combination with the transformer structure so to make radiation boundary calculation more accurate. The influence of different environmental conditions (wind speed, ambient temperature) on the convection boundary and radiation boundary of the transformer is analyzed by setting up a three-dimensional fluid-temperature field model of a 110 kV oil-immersed transformer, which provides guidance for the determination of boundary conditions in finite element analysis and calculation.

Key words: transformer; electromagnetic-fluid-temperature field; convection-radiation boundary; ambient temperature; wind speed

0 引言

油浸式变压器是电力系统中不可或缺的关键设备。其内部温度分布是制约其带载能力和运行寿命的决定性因素,准确获得内部温度分布能够最大限度挖掘和利用变压器负载潜力,提高利用效

率。目前,国内外有关变压器温度获取方法主要包括直接测量法^[1-3]、经验公式法^[4-5]、热路模型法^[6-8]和数值算法^[9-16]。其中,数值算法是基于传热学和流体动力学理论,采用有限元或有限体积法求解微分方程组来获得变压器内部流体—温度场分布的计算方法,具有计算精度高、不会干扰设备正常运

行等优点,因此通常采用数值计算法来研究变压器内部温度分布。

数值计算法是基于传热学和流体力学理论,研究变压器铁心、绕组、油、油箱壁、散热器等组件之间的传热问题,通过求解微分方程组来获取热点温度值的方法。文[15]建立了油浸式变压器二维流体—温度场模型,得到不同流速和不同负荷情况下变压器内部温度分布;文[16]忽略变压器散热器结构建立了三维流体—温度场模型,模型所得热点温度与经验公式相对误差不超过4%。但目前的变压器温度场研究对于变压器结构以及环境条件考虑不充分,缺乏对不同环境条件(温度、风速等)下对流传热与辐射传热的相对关系以及两者与变压器温度场具体关系的相关研究。

文中首先结合传热学基础理论以及变压器油箱、散热器结构对对流和辐射边界进行理论推导,分析影响对流—辐射换热量的环境因素,又以某110 kV、制冷方式为ONAN的油浸式变压器为例,应用Ansys Fluent仿真软件建立三维流体—温度场模型,研究不同风速和环境温度条件下对流传热量与辐射换热量的比重以及不同边界条件对变压器温度场分布的影响,为准确设定对流—辐射边界条件,提高变压器温度场计算精度提供了参考。

1 变压器边界问题理论基础

变压器运行过程中,内部电磁场作用于铁心、绕组以及金属结构件产生铁心损耗和绕组损耗,损耗作为变压器内部热源作用于流体—温度场,热量传递过程主要见图1。图1中:损耗产生的热量以热传导方式传递至固体(绕组和铁心)表面;固体表面通过对流换热方式将热量传递给油;油自身以热对流的形式传递热量,并最终将热量传递至油箱与散热器壁面;油箱与散热器外表面与空气接触,并通过对流换热方式向环境散热。此外,铁心、绕组、油、变压器外壳以及外界环境通过辐射传热相互作用。

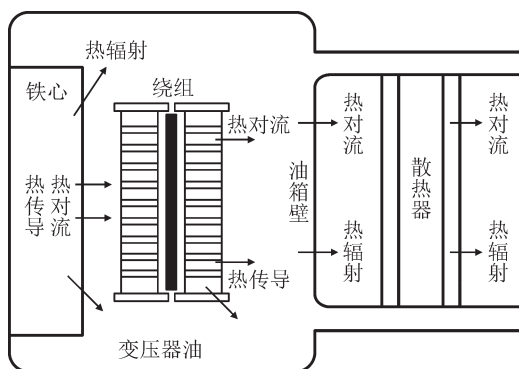


图1 变压器内部热量传递过程

Fig. 1 Heat transfer process inside the transformer

内部传热过程耦合于求解区域的控制方程^[10],而文中主要研究外部散热过程,外部散热过程体现在控制方程的边界条件设定上,具体为通过传热学公式计算油箱和散热器外壁与空气的对流换热系数与辐射系数,从而求解对流传热量与辐射换热量。

1.1 变压器对流边界

变压器外壳表面单位面积通过对流换热向环境中传递的热流密度 q_h 可用牛顿冷却公式计算

$$q_h = h(T_w - T_c) \quad (1)$$

式(1)中: T_w 、 T_c 分别为变压器表面和环境温度; h 为对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$,受流体流速、表面和流体温度、流体流速、流体粘度、流体导热系数等因素影响,在工程应用中一般通过努塞尔数 Nu 确定,即

$$Nu = \frac{hl}{\lambda} \quad (2)$$

式(2)中: l 为对流换热表面特征长度; λ 为流体导热系数。在自然对流和强制对流两种对流方式下,努塞尔数 Nu 计算方法也有所不同^[17]。

1.1.1 自然对流换热

当自然风速较小或无风时,引起空气流动的主要原因为温度差所导致的组分之间的浓度差,此时变压器与空气之间的对流方式为自然对流换热。变压器一般工作于室外或空间开阔的室内,流体空间相对较大,因此可认为是无限大空间的自然对流换热,对于ONAN方式下的 Nu 可用式(3)确定

$$Nu = C_1(Ra)^{n_1} \quad (3)$$

式(3)中: C_1 、 n_1 为常数,工程上对于层流竖平壁, $C_1=0.59$, $n_1=0.25$;对于水平板(热面向上), $C_1=0.54$, $n_1=0.25$;对于水平板(热面向下), $C_1=0.27$, $n_1=0.25$; Ra 为瑞利数,可由式(4)计算

$$Ra = \frac{ga_p \Delta T l^3}{\kappa \nu} \quad (4)$$

式(4)中: g 为重力加速度, $g=9.8 \text{ m/s}^2$; a_p 为空气热膨胀系数, $a_p=3.67 \times 10^{-3} (1/^\circ\text{C})$; ΔT 为表面与环境温差; l 为对流表面尺寸; κ 为空气热扩散系数; ν 为空气动力粘度。空气相关物性见表1。

表1 空气热物理性质

Table 1 Thermophysical properties of air

$T/^\circ\text{C}$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\lambda \times 10^{-2}/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	$\kappa \times 10^{-6}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$\nu \times 10^{-6}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	Pr
-30	1.453	2.20	14.9	10.80	0.723
-20	1.395	2.28	16.2	11.61	0.716
-10	1.342	2.36	17.4	12.43	0.712
0	1.293	2.44	18.8	13.28	0.707
10	1.247	2.51	20.0	14.16	0.705
20	1.205	2.59	21.4	15.06	0.703
30	1.165	2.67	22.9	16.00	0.701
40	1.128	2.76	24.3	16.96	0.699

注:根据《GB 1094.1—2013》规定^[18],电力变压器运行环境温度一般在-25~40 °C之间。

1.1.2 强制对流换热

当风速较大时,即变压器与空气之间的冷却方式为强制对流换热时,在对流边界问题的求解中,确定油箱及散热器表面空气是层流还是湍流至关重要,文中采用雷诺数 Re 确定环境气流类型^[19],其具体表达式为

$$Re = \frac{vl}{\nu} \quad (5)$$

式(5)中: ν 为流体密度; v 为流体流速; l 为对流换热表面特征长度。

在变压器 ONAN 方式下,风速一般低于 5 m/s ^[20],计算可得 $Re < 5 \times 10^5$,流体为层流。 Nu 可用式(6)确定

$$Nu = CRe^n Pr^{1/3} \quad (6)$$

式(6)中, C, n 为经验参数,与流体流态与变压器表面状态相关,取 $C=0.102, n=0.675$ 。

联立式(1)–(6)可求得不同环境条件(主要包括温度、风速)下变压器油箱及散热器表面对流换热系数,进而求出通过变压器表面以对流换热方式向空气传递的热量。

1.2 变压器辐射边界

热辐射是具有温度的物体向外以电磁波的形式传递能量的过程。变压器辐射传热过程主要分为内部辐射和外部辐射两个部分,内部辐射主要包括铁心、绕组、散热片以及油箱等固体表面与变压器油之间的辐射换热;外部辐射是指变压器油箱壁和散热器外表面对空气侧的辐射传热。由于内部辐射过程复杂且对于变压器温度场的影响几乎可以忽略^[16],因此文中重点研究变压器外部辐射的影响。

工程中一般使用斯忒潘—波尔茨曼定理计算辐射传热量^[21],即

$$q_r = \varepsilon\sigma(T_w^4 - T_e^4) \quad (7)$$

式(7)中: q_r 为辐射传热热量密度; ε 为物体表面发射率,绝对黑体为1; T_w, T_e 分别为物体表面温度、环境温度, K; σ 为波尔茨曼常数, $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

这里需要注意的是,这种以参数 ε 来表征辐射换热强度的处理方法,是一种理想化的处理,它适用于结构较为简单的凸表面与外包壁面之间的辐射换热计算^[22]。其目的在于缩减求解区域,提高求解效率,而对于变压器外壳,包括油箱外壳以及复杂的散热器外壳,涉及到数百个辐射表面。每个表面都向外发射辐射能,同时,每个表面也吸收来自其他表面以及外界空气侧辐射的热量,此时,通过简单地设置材料的辐射率来计算辐射换热量会导致很大的误差,因此,需要在考虑具体几何结构等因素下对其辐射率 ε 进行修正处理。

文中建立了变压器外侧空气包三维模型见图2,以变压器表面以及空气包壁面为边界,边界条件设定如下:变压器外壳表面辐射率 ε 依据材料表面自身特性,均设置为0.9;外界环境温度(空气包壁面温度)取 285 K ;变压器外壳各表面的温度取值参照目前已有的典型变压器表面温度分布^[15–16, 23–24]:油箱上表面温度 320 K ;油箱4个侧面温度 315 K ;油箱下表面温度 310 K ;散热器各表面温度均为 300 K 。通过表面对表面辐射模型(S2S)求解变压器外壳各表面对空气侧的辐射热流密度。

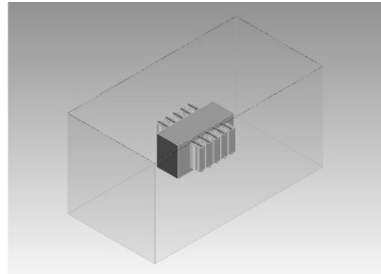


图2 变压器外壳外围空气包的三维模型图

Fig. 2 3D model diagram of the outer air bag of the transformer casing

由此可以求解出变压器外壳表面辐射热流密度分布,进一步可以依据式(7)计算各表面的实际辐射率,见图3。

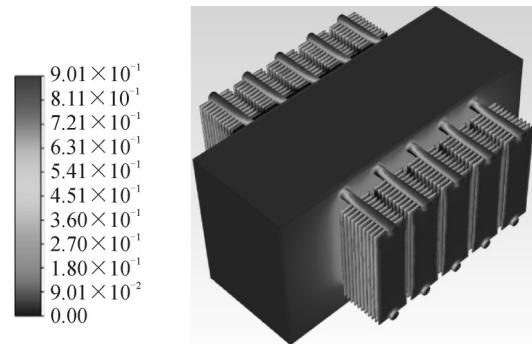


图3 变压器外壳表面的等效辐射率

Fig. 3 Equivalent emissivity of transformer housing surface

具体来说,变压器外壳表面可以分为两类:一类是靠近空气侧的壁面 S_1 ,例如油箱壁面以及散热器最外侧的壁面,这类表面由于靠近空气侧,其与外界环境之间的辐射换热率基本等于材料辐射率;另一类是散热器内侧壁面 S_2 ,这类表面由于周围存在与其温度相近的其他外壳表面,导致其对空气侧的辐射散热强度很小,可以忽略不记,即实际辐射率约等于0。因此可用有效辐射率 ε' 来代替原来的材料自身的辐射率 ε

$$\varepsilon' = \varepsilon S_1 / (S_1 + S_2) \quad (8)$$

根据对流换热系数的定义可类比得到等效辐射换热系数 h_r 的定义式见式(9)

$$h_r = \frac{\varepsilon' \sigma (T_w^4 - T_e^4)}{T_w - T_e} \quad (9)$$

通过 h_r 与 h 的对比能够更加直观地判断出对流换热量与辐射传热量的相对关系。

1.3 变压器散热器结构

当油浸式变压器容量大于50 kVA时,油箱本身的散热能力不足以冷却变压器组件^[24],因此需要考虑增加散热器来加强散热。国内常用油浸式变压器的散热器结构为管式或片式结构,以片式变压器为例,其结构示意图见图4,散热器材料通常采用碳素钢板,导热性能良好,能够加快散热片壁与内部油流和外部空气的换热过程,实现加速冷却效果。

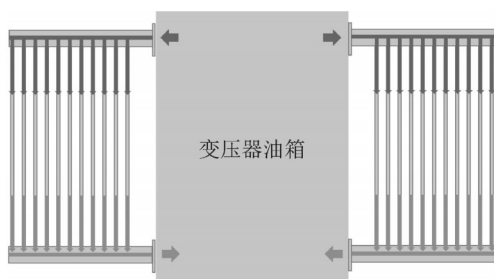


图4 变压器散热器结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of transformer radiator structure

散热器与空气之间的传热过程与油箱相同,主要是片壁外侧空气与片壁的自然对流换热和辐射换热的综合传热过程,片壁表面的对流及辐射换热系数与热流密度均可通过1.1、1.2节中传热学过程求得。

2 对流—辐射边界对变压器温度场的影响

2.1 基于有限元和有限体积的变压器三维流体温度场模型

文中采用Ansys Fluent仿真软件对变压器温度场进行仿真分析,选用某110 kV油浸式变压器为研究对象计算其内部温度场分布,变压器主要技术参数及尺寸参数见表2。

所建立几何模型尺寸完全按照实际变压器参数进行设置。建立的变压器模型示意图见图5、6,固体部分主要包括散热器、油箱、铁心、低压绕组、高压绕组、调压绕组,其热物性在0~100℃范围内变化可忽略不计^[16]。变压器固体区域材料物理参数见表3。流体部分主要包括油箱与散热器内循环流动的变压器油,对于ONAN方式,变压器油循环的动力

表2 变压器主要技术参数及尺寸参数

Table 2 Main technical parameters of transformer

参数	铭牌值
额定电压/kV	110±8×1.25%/10.5
冷却方式	ONAN
空载损耗/kW	12
负载损耗/kW	47.5
高压侧额定电压/kV	110
高压侧额定电流/A	52.5
低压侧额定电压/kV	10.5
低压侧额定电流/A	549.86
油箱尺寸/mm	4 500×1 300×2 100
散热片/mm	460×15×1 500

源于油的物理参数随温度变化而产生的热浮升力,因此要考虑其热物性关于温度的变化^[25],经多项式拟合计算后,油物性参数同绝对温度 T 的关系见表4。

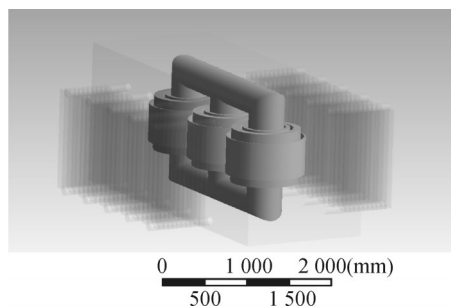
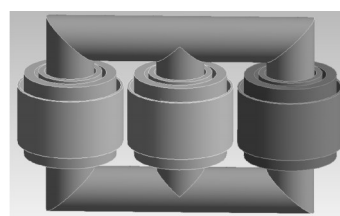
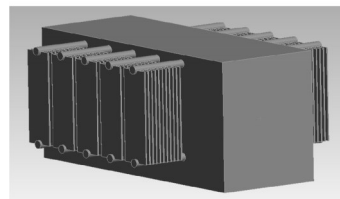


图5 油浸式变压器绕组三维结构模型

Fig. 5 3D structural model of oil-immersed transformer



(a) 绕组



(b) 油箱及散热器

图6 三维模型

Fig. 6 3D model

额定变比条件下调压绕组只是参与热量传递过程,损耗为零。变压器内部热源为绕组和铁心损耗,额定负载下变压器各组件损耗功率见表5。

表3 变压器固体区域材料物理参数

Table 3 Transformer solid region material physical parameters

构件	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
铁心	7 650	45	460
绕组	8 900	385	390
油箱、散热器	7 850	50	485

表4 变压器油物理参数

Table 4 Transformer oil physical parameters

物性参数	矿物绝缘油
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 098.72-0.712T
导热系数 $k/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.159 0-7.101 $\times 10^{-5}$ T
动力粘度 $\mu/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	0.084 67-0.000 4T+5 $\times 10^{-7}$ T ²
定压比热 $c_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	807.163+3.587T

表5 绕组和铁心额定功率密度

Table 5 Winding and core power density ratings

热源	总损耗/W	功率密度/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-3})$
高压绕组	25 130	47 549.668 9
低压绕组	22 370	103 901.532 7
调压绕组	0	0.000 0
铁心	12 210	10 385.302 4

变压器内部流体—温度场遵循三大(质量、能量、动量)守恒定律,变压器油流采用湍流模型^[1],采用有限体积法对变压器流体—温度场进行迭代求解。

由表2可得,油箱壁及散热片对流表面特征长度分别为2 100 mm和1 500 mm,其对流换热系数可结合1.1节中传热学理论推得。

2.2 变压器内部温度场分布

以环境温度20℃,自然对流为例,计算得到各表面的对流换热系数:油箱上表面 $h=2.8$ 、油箱下表面 $h=1.4$ 、油箱侧面 $h=3.1$ 、散热器表面 $h=4.3$;变压器油箱壁及散热器表面材料辐射率 ϵ 为0.9,根据变压器结构尺寸及式(8)得有效辐射率 $\epsilon'=0.2$ 。将对流换热系数及有效辐射率代入模型可得油浸式变压器油箱和散热器外壳表面的温度分布见图7。由图7可得,散热器整体温度明显低于油箱表面温度,温度最高点出现在油箱表面,具体为油箱顶部偏中间位置,最高为45.9℃,温度最低点出现在散热器底部,最低为24.4℃,最高温差为21.5℃,变压器表面温差显著。由变压器纵截面油速分布见图8,由图8可得,散热器内部油流流速大,与环境有效接触面积大,对流换热剧烈;此外,油流循环为高温油流由油箱内部流向散热器,考虑变压器油在流动过程中的热量交换和能量损耗,散热器中油温会低于油箱

内油温。由此可以看出,散热器结构是变压器向环境散热的主要结构,对于变压器内部油流循环以及对流换热过程作用不可忽略。

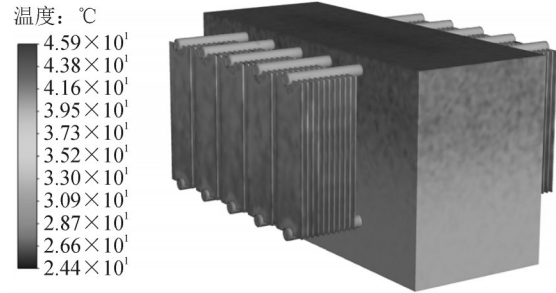


图7 油浸式变压器表面温度场分布

Fig. 7 Surface temperature field distribution of oil-immersed transformer

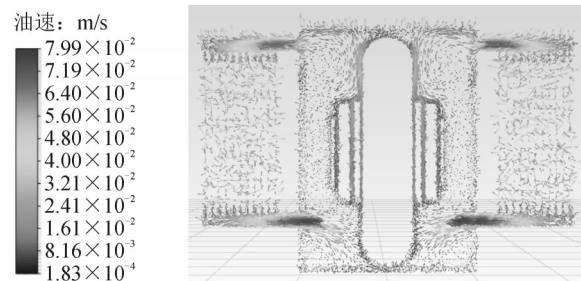


图8 变压器中心部位宽度方向纵截面油速分布

Fig. 8 Oil velocity distribution of longitudinal section along the length direction of the central part of the transformer

绕组从底部到顶部的温度分布曲线见图9。整体来说,从下往上,高低压绕组的温度都是逐渐增高,并在靠近各处顶部偏下的地方有所下降,最高温度出现在总高度约83.2%的地方。这是由于绕组顶部处油速较大,导致绕组顶部对流换热量较大,温升降低。

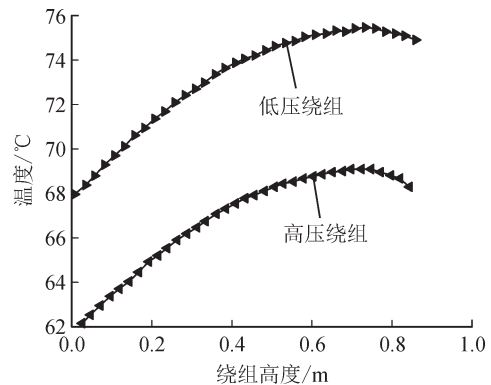


图9 高低压绕组温度分布曲线

Fig. 9 Temperature distribution curve of high and low voltage windings

为验证辐射率修正模型的准确性,将不同负载条件下的修正模型热点温度、未修正模型热点温度与GB/T 1094.7—2008^[4]中经验公式计算值进行对比,对比结果见表6。在不同负载条件下,模型所得

热点温度均略低于经验公式所得,可见经验公式法计算结果较保守;采用未修正模型计算辐射率,由于没有考虑变压器外壳结构各表面的相互影响,计算辐射换热量偏大,导致热点温度偏低,误差偏大。

表6 仿真计算与国标计算的热点温度值对比

Table 6 Comparison of hotspot temperature values calculated by simulation and national standard

负载系数	修正模型值/℃	未修正模型值/℃	GB/℃	修正模型偏差/%	未修正模型偏差/%
1.00	75.50	69.50	77.30	2.3	10.1
0.60	54.20	49.90	57.13	5.4	12.7
0.80	67.39	61.99	71.48	5.7	13.3
1.15	86.97	80.01	92.53	6.0	13.4

2.3 环境因素影响分析

基于上述仿真模型进一步研究环境温度、风速对变压器温度分布的影响,首先对环境温度进行研究,设定为自然对流条件,选取环境温度分别为-20、0、20、40℃计算低压绕组温度分布见图10。由图10可得,当环境温度由-20℃增加至40℃时,热点温度由67℃上升至90℃,上升幅度达34.2%,环境温度影响显著,主要原因为环境温度增加减小了对流及辐射换热量。

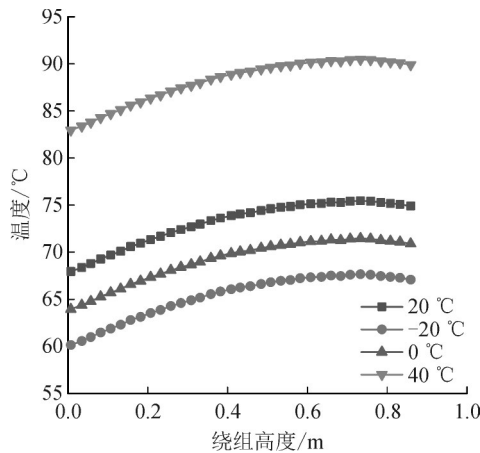


图10 绕组温度分布随环境温度的变化

Fig. 10 Winding temperature distribution as a function of ambient temperature

对风速进行研究,设定环境温度为20℃,选取无风(自然对流),低风速(3 m/s),中风速(4 m/s),高风速(5 m/s) 4种风速下绕组温度分布见图11。从图11可见风速越高时绕组热点温度越低,风速为5 m/s相较自然对流条件绕组温度降低7.9%。

不同风速条件下变压器表面与空气之间的对流换热系数与辐射换热系数随环境温度的变化见图12。由图12可知,环境温度对于辐射换热系数影响较小;当风速大于或等于4 m/s时,对流换热系数远大于辐射换热系数,两者相差一个数量级。不同

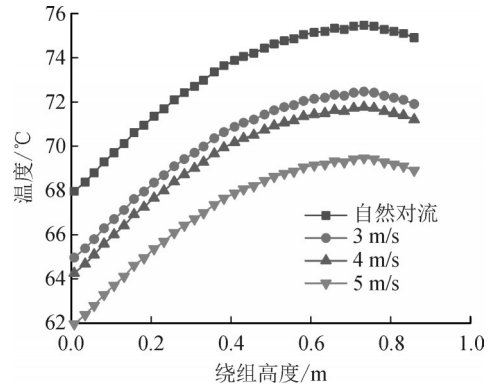


图11 绕组温度分布随风速的变化

Fig. 11 Winding temperature distribution as a function of wind speed

风速下考虑辐射和不考虑辐射时变压器热点温度对比见图13,可见风速大于或等于4 m/s时,辐射换热过程对绕组热点温度影响小于5%,辐射换热可忽略不计。

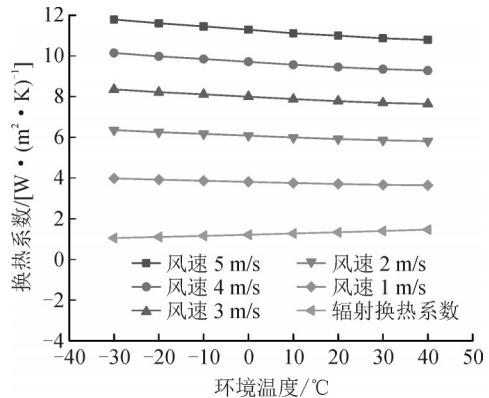


图12 对流(辐射)换热系数随环境条件的变化

Fig. 12 Convective (radiative) heat transfer coefficient as a function of ambient conditions

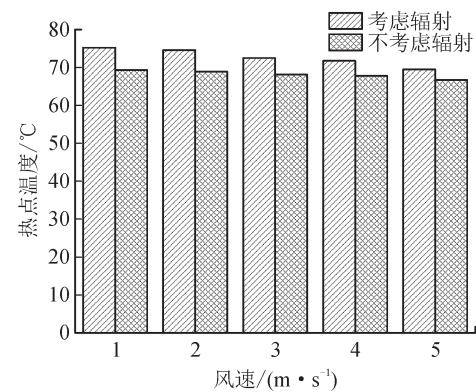


图13 不同风速下辐射对热点温度的影响(环境温度20℃)

Fig. 13 Influence of radiation on hot spot temperature at different wind speeds (20℃)

3 结论

1)针对目前以材料辐射率表征变压器对空气侧辐射换热强度的辐射边界计算方法,提出了有效辐

射率概念,通过考虑变压器油箱和散热器各壁面之间的辐射相互作用,对辐射率 ϵ 进行了修正处理。以文中所建立的110 kV变压器算例为例,未修正模型由于没有考虑变压器外壳各表面的相互影响,计算辐射换热量偏大,导致热点温度值偏低,修正前后热点温度值相差8%左右。

2)采用有效辐射率对某110 kV油浸式变压器辐射边界进行计算。计算结果表明风速对于辐射换热系数影响较大,并且当风速大于或等于4 m/s时,对流换热系数远大于辐射换热系数,忽略辐射换热过程对绕组热点温度影响小于5%,此时计算变压器温度分布可仅考虑对流换热过程。

3)对某110 kV油浸式变压器进行三维流体—温度场仿真,综合考虑环境温度与风速对于变压器温度场的影响,二者均对绕组温度影响显著,当环境温度由-20℃增加至40℃时,热点温度由67℃上升至90℃,上升幅度达34.2%;风速为5 m/s相较自然对流条件绕组温度降低7.9%。

参考文献:

- [1] BADAR M, LU Ping, WANG Qirui, et al. Real-time optical fiber-based distributed temperature monitoring of insulation oil-immersed commercial distribution power transformer[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(3):3013-3019.
- [2] 刘云鹏, 李欢, 高树国, 等. 分布式光纤传感在大型变压器温度和绕组变形监测中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16):6126-6135.
LIU Yunpeng, LI Huan, GAO Shuguo, et al. Research on application of distributed optical fiber sensing in monitoring of research on application of distributed optical fiber sensing in monitoring of temperature and winding deformation of large transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 6126-6135.
- [3] 张知先, 雷嘉丽, 陈伟根, 等. 基于多参量光纤F-P传感的变压器局部放电与油温传感方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(1):58-65.
ZHANG Zhixian, LEI Jiali, CHEN Weigen, et al. Transformer's partial discharge and oil temperature sensing method based on multi-parameter fiber optic F-P sensing multi-parameter fiber optic F-P sensing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1):58-65.
- [4] 电力变压器 第7部分:油浸式电力变压器负载导则:GB/T 1094.7—2008[S].2008.
Power transformers-Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers: GB/T 1094.7—2008[S].2008.
- [5] IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step-voltage regulators: IEEE Std C57.91: 2011. [S].2011.
- [6] VAHID S, JAWAD F, MOHAMMAD H, et al. Improving the transformer thermal modeling by considering additional thermal points[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 128(6): 106748.1-106748.9.
- [7] HOU Zhe, LYU Xinliang, YANG Bo, et al. Application of transformer heat circuit model in power substation station area[C]//International Conference on Energy Science and Applied Technology.[S.l.]:[s.n.], 2021: 1-8.
- [8] ZHAO Zhengang, JIANG Zhangnan, LI Yang, et al. Effect of loads on temperature distribution characteristics of oil-immersed transformer winding[J]. Distributed Generation & Alternative Energy Journal, 2021, 37(2):237-254.
- [9] TENG Yue, AI Mengmeng, SHAN Yi, et al. Prediction of transformer full-domain temperature based on fluid network decoupling[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2022, 68(4):461-481.
- [10] ASLAM M, HAQ I U, REHAN M S, et al. Dynamic thermal model for power transformers[J]. IEEE Access, 2021(9): 71461-71469.
- [11] KONG Lingming, MO Wenxiong, LUO Simin, et al. The modified thermal circuit model for three-phase unbalanced operation of distribution transformers[C]//2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). [S.l.]: IEEE, 2020: 3868-3872.
- [12] 骆小满, 阮江军, 邓永清, 等. 基于多物理场计算和模糊神经网络算法的变压器热点温度反演[J]. 高电压技术, 2020, 46(3):860-866.
LUO Xiaoman, RUAN Jiangjun, DENG Yongqing, et al. Transformer hot-spot temperature inversion based on multi-physics calculation and fuzzy neural network algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3):860-866.
- [13] 邓永清, 阮江军, 龚宇佳, 等. 基于参数热等效的10 kV变压器温度流体场三维仿真计算[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4):212-218.
DENG Yongqing, RUAN Jiangjun, GONG Yujia, et al. Three dimensional thermal fluid field simulation of 10 kV transformer based on parameter thermal equivalence[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4):212-218.
- [14] JIA Xiaoyu, LIN Mei, SU Shiwei, et al. Numerical study on temperature rise and mechanical properties of winding in oil-immersed transformer[J]. Energy, 2022, 239(1): 121788.1-121788.15.
- [15] 刘刚, 靳艳娇, 马永强, 等. 油浸式变压器流体场和温度场的数值分析[J]. 变压器, 2017, 54(5):22-26.
LIU Gang, JIN Yanjiao, MA Yongqiang, et al. Numerical analysis of fluid field and temperature field of oil-immersed transformer[J]. Transformer, 2017, 54(5):22-26.
- [16] 廖才波, 阮江军, 刘超, 等. 油浸式变压器三维电磁—流体—温度场耦合分析方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 151-155.
LIAO Caibo, RUAN Jiangjun, LIU Chao, et al. Comprehensive analysis of 3-D electromagnetic-fluid-thermal fields of oil-immersed transformer[J]. Electric Power Automation