

天然酯绝缘油对电力变压器绕组温升及过负载特性的影响

刘彦男^{1,2}, 王浩名^{1,3}, 杜振斌², 张喜乐¹, 张亚杰², 王建民²

(1. 河北工业大学 a. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室; b. 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 天津 300130; 2. 保定天威保变电气股份有限公司 河北省输变电装备电磁与结构性能重点实验室, 河北 保定 071056; 3. 华北电力大学(保定) 电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要:通过建立110 kV电力变压器二维流固耦合模型,采用有限体积法对比分析天然酯绝缘油和矿物绝缘油电力变压器绕组的温升特性,然后通过实验对计算方法的正确性进行验证,同时对比分析两种绝缘油在同一变压器中的绕组过负载特性。结果表明:天然酯绝缘油变压器绕组温升略高于矿物绝缘油变压器,二者热点温升相差4.7℃,但天然酯绝缘油可提高变压器温升限值10 K以上,综合考虑天然酯绝缘油变压器绕组的温升特性优于矿物绝缘油变压器;天然酯绝缘油变压器的过负载能力优于矿物绝缘油变压器,并且随着过负载倍数的增大,二者过负载性能差距进一步扩大。

关键词:天然酯绝缘油电力变压器;绕组温升;过负载能力;有限体积法

中图分类号:TM214 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)09-0089-07

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.09.015

Effect of Natural Ester Insulating Oil on Temperature Rise and Overload Characteristics of Winding for Power Transformer

LIU Yannan^{1,2}, WANG Haoming^{1,3}, DU Zhenbin², ZHANG Xile¹, ZHANG Yajie², WANG Jianmin²

(1. a. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment; b. Key Laboratory of Electro-magnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Hebei Provincial Key Laboratory of Electromagnetic & Structural Performance of Power Transmission and Transformation Equipment, Baoding Tianwei Baobian Electric Co., Ltd., Baoding 071056, China; 3. Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: A two-dimensional fluid-solid coupling model of 110 kV power transformer was established, the winding temperature rise characteristics of natural ester insulating oil power transformer and mineral insulating oil power transformer were compared and analyzed by finite-volume method, and the correctness of the calculating method was verified through experiments. At the same time, the winding overload characteristics for the same transformer with two insulating oils were compared. The results show that the winding temperature rise of the natural ester insulating oil transformer is slightly higher than that of the mineral insulating oil transformer, and the difference of their hot spot temperature rise is 4.7℃, but the natural ester insulating oil can improve the transformer temperature rise limit by 10 K. Thus, the winding temperature rise characteristics of natural ester insulating oil transformer is better than that of mineral insulating oil transformer. The overload capacity of natural ester insulating oil transformer is better than that of the mineral insulating oil transformer, and the difference

收稿日期:2021-09-23 修回日期:2021-10-22

基金项目:河北省重点研发计划项目(V1586309661297)

作者简介:刘彦男(1995-),男(汉族),河北唐山人,硕士生,主要从事高电压与绝缘技术的研究;通信作者:王建民(1961-),男(汉族),河北保定人,教授级高级工程师,主要从事各类变压器及电抗器等产品的电磁热力关键技术的研究。

between their overload performances expands further as the overload multiplier increases.

Key words: natural ester insulating oil power transformer; winding temperature rise; overload capacity; finite-volume method

0 引言

油浸式变压器作为电力系统中传输电力的重要设备之一,正朝着特高压、智能化、节能环保和安全可靠的方向发展。变压器油起着绝缘和冷却的作用^[1],目前,矿物绝缘油广泛应用于大型油浸式电力变压器中。然而,近年来,随着国内外新型绝缘油研究的深入与发展,天然酯绝缘油较传统矿物绝缘油的优势逐渐被世人认知与接受^[2-5]。

文献[6]建立了配电变压器温度场的仿真分析三维模型,采用有限元法求解该模型的流体-温度场,得到配电变压器的整体温度分布及热点温升。文献[7]建立了变压器二维简化模型,对比分析了植物绝缘油和矿物绝缘油对配电变压器热点温度及绕组温度分布的影响,分析了不同入口油速、不同变压器绝缘油对配电变压器热点温度的影响。文献[8]利用Fluent软件对天然酯绝缘油配电变压器进行仿真分析,并通过加宽油道改善天然酯绝缘油变压器的温度场分布。文献[9]对天然酯绝缘油配电变压器和矿物绝缘油配电变压器的变负载特性进行了仿真分析。目前,有关天然酯绝缘油配电变压器绕组温升方面的研究文献较多,并且大多数研究都没有考虑绕组损耗的不均匀分布,甚至没有考虑变压器油理化参数随温度变化对绕组温升的影响,而且对于110 kV及以上电力变压器绕组温升特性方面的研究很少。

本文以1台型号为SZ11-50000/110的电力变压器产品为研究对象,利用MF2D有限元专用软件计算出变压器绕组的涡流损耗,并考虑绕组损耗的不均匀分布对变压器绕组温度分布的影响,通过流固耦合的仿真计算,对比分析FR3天然酯绝缘油变压器和25#矿物绝缘油变压器绕组的温升特性;根据负载系数,改变热源密度,对二者的过负载特性进行仿真研究,在考虑两种绝缘油变压器各自温升限值的条件下,比较二者的过负载能力。

1 热源密度分析与计算

1.1 变压器损耗计算

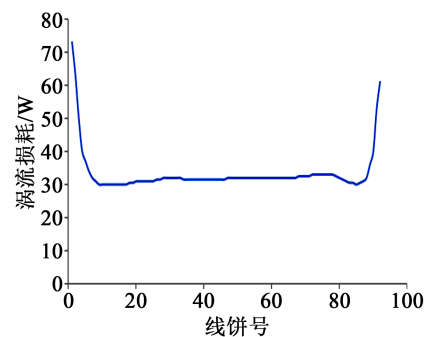
在电力变压器设计和运行中,内部温升是影响变压器设计参数及运行稳定性的重要因素之一。温升是电力变压器内部运行时产生损耗引起的,油

浸式电力变压器内部的主要热源由空载损耗和负载损耗组成。空载损耗实质是铁心产生的损耗,可近似为铁损。负载损耗包括绕组损耗和杂散损耗。杂散损耗对绕组温度场的影响很小,因此计算时不考虑杂散损耗的影响。绕组损耗由直流电阻损耗、涡流损耗组成。在本研究中,铁心损耗和绕组损耗共同作为变压器的内部热源。

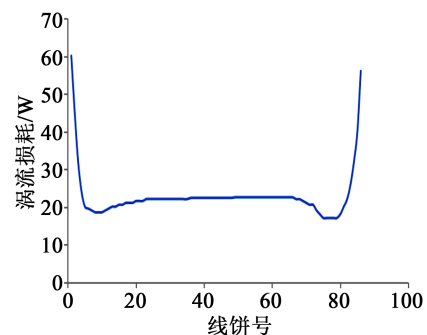
变压器在最小分接的时候,绕组损耗最大,变压器温升最高,因此计算温度场要在最小分接的情况下进行。有限元专用软件MF2D可用来计算绕组的涡流损耗,加上直流电阻,即可得到绕组总损耗。

由MF2D计算出的绕组涡流损耗如图1所示。从图1可以看出,涡流损耗两端大中间小,损耗分布并不是对称的,绕组底端的损耗要略大于顶端,这是因为本研究的变压器调压绕组相对于其他绕组是不对称的,位于中部偏下的位置,导致绕组之间的安匝和漏磁场分布上下不对称。

为了验证计算方法的准确性,将计算值与实测



(a)低压绕组



(b)高压绕组

图1 绕组涡流损耗

Fig.1 Eddy-current loss of winding

值做对比。表1为最小分接时，三相高、低、调压绕组损耗与阻抗电压的计算值和实测值。

表1 绕组损耗及阻抗电压的计算值与实测值
Tab.1 Calculated values and measured values of winding loss and impedance voltage

类型	计算值		实测值
	直流电阻	涡流	
高压绕组损耗/kW	130.7	5.9	—
低压绕组损耗/kW	89.4	9.2	
调压绕组损耗/kW	14.8	1.2	
杂散损耗/kW	15.4		
负载损耗/kW	266.6		263.8
阻抗电压/%	10.06		10.47

由表1可知，负载损耗计算值与实测值的相对误差小于1.1%，阻抗电压的相对误差小于4%，验证了计算方法的准确性。

1.2 热源密度计算

绕组涡流损耗与直流电阻损耗相加即可得到绕组损耗，绕组损耗最终以热源密度的形式加载到Fluent软件中，热源密度计算公式如式(1)所示。

$$q_v = \frac{P}{v} \quad (1)$$

式(1)中： q_v 为热源密度， W/m^3 ； P 为变压器绕组或铁心的损耗， W ； v 为热源的体积， m^3 。

通过计算，绕组热源密度沿其高度的分布如图2所示。从图2可以看出，热源密度分布曲线与涡流损耗分布曲线大致相同，其中低压绕组热源密度对称性较差，底端与顶端相差3.6%。

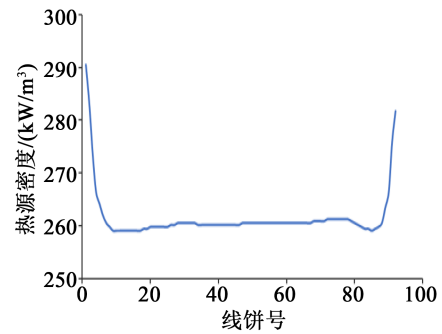
2 仿真模型及参数设定

2.1 物理模型建立

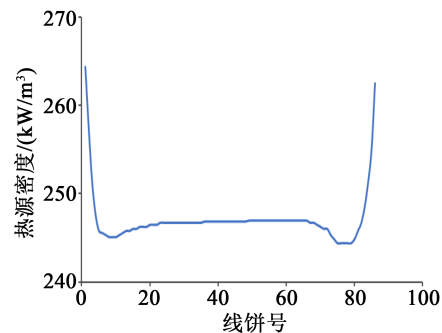
图3为建立的SZ11-50000/110型电力变压器二维轴旋转模型，上端为出口，下端为入口；最左端为铁心，中间设有油道，用于铁心的散热；绕组从左到右依次为低压绕组、高压绕组、调压绕组，中间设有若干绝缘纸筒，在绕组的轴向油道中添加了油流挡板，高低压绕组各4个，用于控制油流，提高绕组的散热能力。该模型不考虑结构件对绕组温度的影响，认为变压器绕组温度沿变压器圆周方向没有梯度变化，这样的模型容易计算而且能更好地收敛。

2.2 材料属性及边界条件设定

天然酯绝缘油作为一种新型的变压器绝缘油，



(a)低压绕组



(b)高压绕组

图2 绕组热源密度

Fig.2 The heat source density of winding

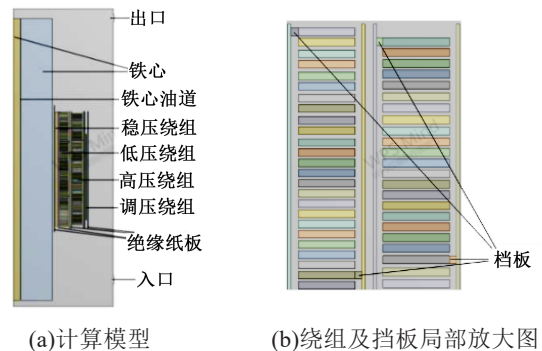


图3 变压器物理模型

Fig.3 Transformer physical model

其理化特性与传统的矿物绝缘油有较大的差异，图4为不同温度下FR3天然酯绝缘油与25#矿物绝缘油密度、比热容、运动黏度、导热系数的对比。从图4可以看出，两种绝缘油的理化特性均随温度的变化而变化。在同一温度下，天然酯绝缘油的密度和导热系数均高于矿物绝缘油，比热容低于矿物绝缘油，两者的运动黏度差异最大，温度低时，天然酯绝缘油的运动黏度远大于矿物绝缘油，随着温度升高，差异逐渐减小。

本研究同时对两种绝缘油电力变压器进行温度场仿真，为了排除绝缘油以外因素的影响，两者

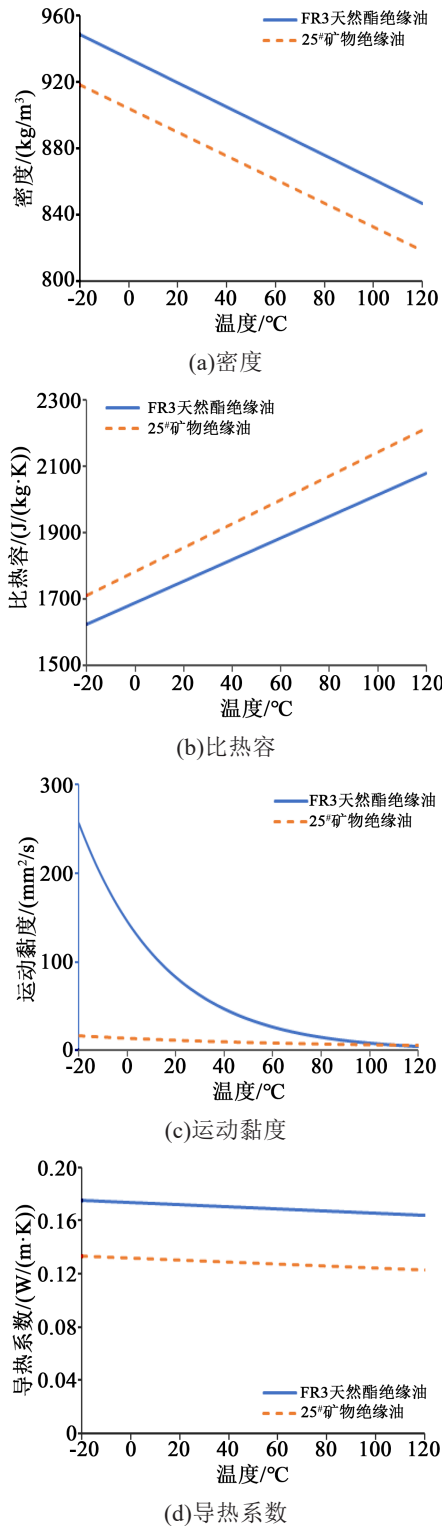


图4 两种绝缘油的理化特性对比

Fig.4 Comparison of physical and chemical properties of two insulating oils

的计算条件相同。模型包含的固体区域有铁心、绕组、挡板以及绝缘纸筒,相应的材料属性见表2^[10-11]。变压器油的物性参数按照图4中的数据进行设置。

表2 固体材料属性

Tab.2 Properties of solid materials

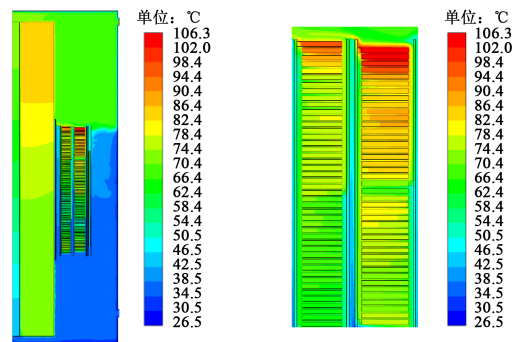
属性	铁心	绕组	挡板	绝缘纸筒
密度/ (kg/m^3)	7 650	8 960	980	980
比热容/ $(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	485	390	2 000	2 000
导热系数/ $(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	21	338	0.25	0.45

对于边界条件,可做如下设定:环境温度为25°C,入口温度为36.5°C,入口油流速为0.005 m/s;所有固体与液体的边界设置为耦合边界,油箱壁面导热系数设置为8 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

3 两种绝缘油变压器的温度场仿真

3.1 额定负载时绕组温度场的计算与分析

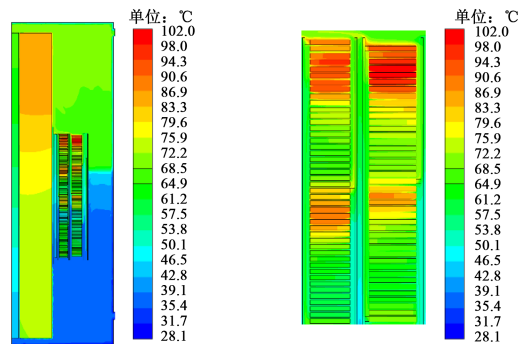
图5、图6分别为天然酯绝缘油变压器和矿物绝缘油变压器绕组温度场的仿真结果。



(a)整体分布 (b)绕组上端部放大图

图5 天然酯绝缘油变压器温度场分布及局部放大图

Fig.5 Temperature field distribution of natural ester insulating oil transformer and its enlargement diagram



(a)整体分布 (b)绕组上端部放大图

图6 矿物绝缘油变压器温度场分布及局部放大图

Fig.6 Temperature field distribution of mineral insulating oil transformer and its enlargement diagram

由图5~6可知,两种绝缘油变压器整体温度随高度变化,底部温度低,顶部温度高,热点温度均出

现在绕组顶端偏下的位置。天然酯绝缘油变压器绕组最高热点温度为106.3℃,热点温升为81.3℃,矿物绝缘油变压器绕组最高热点温度为101.6℃,热点温升为76.6℃,二者相差4.7℃。

图7为两种变压器绕组温度对比结果。从图7可以看出,天然酯绝缘油变压器的绕组温度略高于矿物绝缘油变压器,但二者的分布趋势接近。无论是低压绕组还是高压绕组,绕组下部温度都比其临近部位的温度略高,这是因为绕组底部的热源密度要大于绕组其他部分(见图2),成为主导绕组底部温度较高的主要因素。之后绕组温度随着高度的上升而呈现递增的趋势,但不是线性升高,而是呈阶梯状升高,这是在绕组中放置导向挡板的结果;二者的热点温度并没有出现在绕组顶部,而是在顶端偏下的位置,这是因为绕组顶部有更好的散热条件。

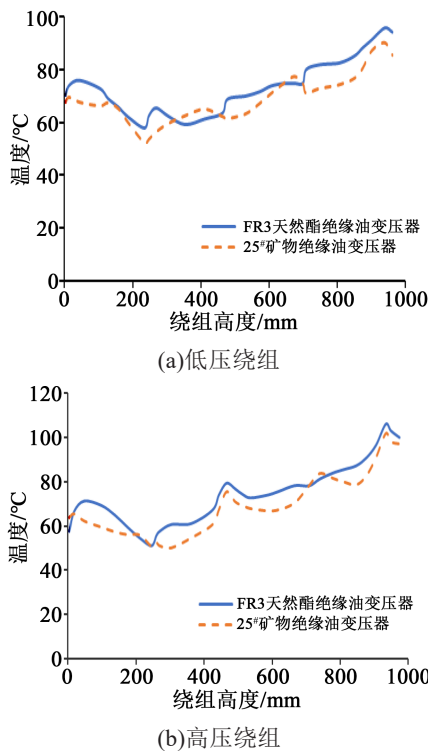


图7 两种绝缘油变压器绕组温度对比
Fig.7 Winding temperature comparison of two insulating oil transformers

虽然天然酯绝缘油变压器的绕组热点温度要略高于矿物绝缘油变压器,但研究表明,普通纸版与天然酯绝缘油配合使用可延长绝缘纸的寿命^[12-14]。根据文献[14],各种绝缘纸在与矿物绝缘油和天然酯绝缘油配合时的耐热温度如表3所示。由

表3可知,在保持变压器寿命不变的情况下,可提高变压器温升限值10 K以上。根据热点温度计算结果和相应的限值可知,在同等条件下天然酯绝缘油变压器的温升特性优于矿物绝缘油变压器。

表3 各种绝缘纸在两种绝缘油变压器中耐受热点温度对比

Tab.3 Comparison of hot-spot temperature resistance of various insulating papers in two insulating oil transformers

绝缘纸	在矿物绝缘油变压器中耐受热点温度/℃	在天然酯绝缘油变压器中耐受热点温度/℃
电缆纸	105	120
热改性纸	120	130
Nomex纸	130	140

为了验证仿真结果的准确性,利用文献[15]提出的“积分平均法”计算绕组的平均温升,对应的绕组平均温升计算值与实验值的对比结果如表4所示。从表4可以看出,两种变压器高低压绕组的温升计算结果与实测值偏差均在5%以内,验证了计算方法的正确性,并且满足产品平均温升上限65 K的要求。

表4 两种绝缘油变压器绕组温升计算值与实测值对比结果

Tab.4 Comparison results of winding temperature rise calculated value and measured value for two insulating oil transformers

变压器类型	绕组	仿真温升/K	实测温升/K	误差/%
FR3天然酯绝缘油变压器	低压	56.6	59.6	4.92
	高压	57.9	59.8	3.12
25#矿物绝缘油变压器	低压	54.9	57.4	4.35
	高压	56.2	58.7	4.23

3.2 变压器过负载条件下的温度场仿真

在变压器正常运行过程中,变压器负载并不是一成不变的,存在高峰期和低峰期^[16]。在高峰期时,变压器会过负载运行,根据变压器6℃原则,当变压器绕组温度在80~130℃内时,温度每升高6℃,其绝缘老化速度将增加1倍,即温度每升高6℃,其绝缘寿命将缩短至原来的1/2^[17]。因此对于新型天然酯绝缘油变压器,有必要研究其过负载特性。

分别对两种绝缘油变压器负载系数在1.1~1.6

时进行温度场仿真,二者热点温度对比如图8所示。从图8可以看出,当负载系数小于1.2时,二者热点温度曲线大致平行,天然酯绝缘油变压器热点温度高于矿物绝缘油变压器;当负载系数为1.3~1.4时,二者热点温度温差缩小;当负载系数不小于1.5时,矿物绝缘油变压器的热点温度超过天然酯绝缘油变压器,并且二者温差有扩大的趋势。根据表3和产品本身的绝缘系统,取矿物绝缘油变压器热点温度限值为105℃,天然酯绝缘油变压器热点温度限制为120℃,再结合图8中的计算数据,可得到过负载时两种绝缘油变压器超出热点温升限值的温升对比如图9所示。从图9可以看出,天然酯绝缘油变压器超过热点温度限制的温升始终低于矿物绝缘油变压器的对应值,并且随着过负载倍数的增大,二者差距进一步扩大。

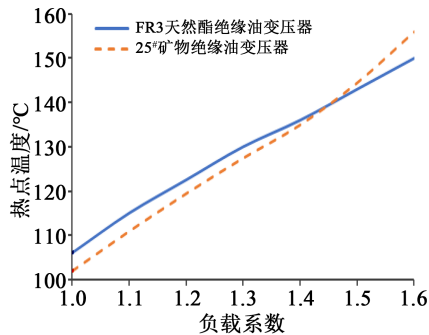


图8 两种绝缘油变压器过负载时热点温度对比

Fig.8 Comparison of hot-spot temperature during overload of two insulating oil transformers

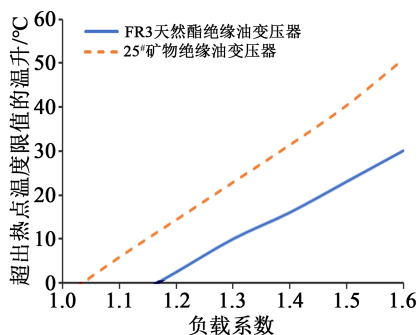


图9 过负载时两种绝缘油变压器超出热点温度限值的温升对比

Fig.9 Comparison of the temperature rise of two insulating oil transformers exceeding the hot-spot temperature limit during overload

根据文献[18-19],可采用导热系数 λ 、运动黏度 ν 、密度 ρ 、比热 C_p 、热膨胀系数 β 共同描述液体的传热能力,如式(2)所示。

$$\alpha = \sqrt[n+1]{c \cdot \lambda^{1-n} \cdot g^n \cdot \delta^{3n-1} \cdot \beta^n \cdot \rho^n \cdot C_p^n \cdot \nu^n \cdot q^n} \quad (2)$$

式(2)中: α 为液体传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; n, c 为取决于流动特性、温度和几何形状的常数; λ 为导热系数, $W/(m \cdot K)$; g 为重力加速度, m/s^2 ; δ 为取决于流动特性的特征尺寸, m ; β 为热膨胀, K^{-1} ; ρ 为密度, g/cm^3 ; C_p 为比热, $J/(kg \cdot K)$; ν 为运动黏度, mm^2/s ; q 为表面热负荷, W/m^2 。

由格林艾森定律可得式(3)。

$$\beta = 3\gamma\rho C_p \quad (3)$$

式(3)中, γ 为格林艾森系数。

联立式(2)~(3)可得式(4)。

$$\alpha = \sqrt[n+1]{3\gamma c \cdot \lambda^{1-n} \cdot g^n \cdot \delta^{3n-1} \cdot \rho^{n+1} \cdot C_p^{n+1} \cdot \nu^n \cdot q^n} \quad (4)$$

由式(4)可知,导热系数、密度、比热的增加将导致传热系数 α 增大。而运动黏度的增大将导致系数 α 的减小。由图4可知,两种绝缘油的密度和比热容相差不大,比值均接近于1。因此两种天然酯绝缘油的传热能力主要取决于导热系数和运动黏度,这也能解释两种绝缘油变压器过负载特性的差异。由图4可知,当温度低于140℃时,动力黏度起决定作用,而当温度高于140℃,二者动力黏度差值很小,导热系数起决定作用。由此可见,负载系数越高,天然酯绝缘油变压器的温升特性优势越明显,天然酯绝缘油变压器具有良好的过负载特性。

4 结论

(1)通过对变压器负载损耗、短路阻抗和绕组平均温升计算值与实测值的对比分析,验证了计算方法的正确性。

(2)在额定负载时,两种绝缘油变压器的温度分布趋势接近,绕组下端部温度都比其临近部位的温度略高,之后绕组温度随着高度的上升而呈现阶梯性升高,二者热点温度均出现在绕组顶端偏下的位置;天然酯绝缘油变压器绕组的热点温度略高于矿物绝缘油变压器,但根据绕组温升计算结果和两种绝缘油对应的温升限值可知,天然酯绝缘油变压器的温升特性优于矿物绝缘油变压器。

(3)天然酯绝缘油变压器的过负载特性优于矿物绝缘油变压器,并随着过负载倍数的增大,二者负载能力的差距越明显;在考虑两种绝缘油变压器各自热点温升限值的条件下,天然酯绝缘油变压器的过负载能力优势更加突出。

参考文献:

- [1] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
- [2] 韩丹丹,邹梦,张亮,等. 天然酯绝缘油改性的研究进展[J]. 绝缘材料,2021,54(4):8-13.
- [3] 邓小聘,李松江,胡婷,等. 变压器用植物绝缘油的研究进展[J]. 绝缘材料,2019,52(11):25-30.
- [4] 张涛,肖霞,杨文雁,等. 变压器用天然酯绝缘油研究现状[J]. 中国油脂,2019,44(4):66-71.
- [5] 罗素马丁,孙国亮. 酯替代变压器矿物油的优越性[J]. 变压器,2009,46(10):29-30.
- [6] 韦玮,李鑫,徐晓刚,等. 基于 Fluent 的植物绝缘油配电变压器温度场有限元仿真分析[J]. 广东电力,2016,29(10):121-126.
- [7] 宋友,阮江军,王珊珊,等. 油浸式变压器绝缘油热特性的仿真分析[J]. 绝缘材料,2015,48(4):21-24,29.
- [8] 赵启承,童力,谢成,等. 天然酯替代矿物油的配电变压器设计与仿真[J]. 浙江电力,2019,38(4):85-91.
- [9] 江翼,程林,陈清淼,等. 考虑负载变化的植物绝缘油变压器温升特性研究[J]. 高压电器,2018,54(6):132-137.
- [10] 张喜乐,何松坡,王建民,等. 换流变压器绕组损耗及热点温升的仿真研究[J]. 变压器,2019,56(7):24-28.
- [11] 何松坡. 换流变压器绕组热点温升的计算与分析[D]. 天津:河北工业大学,2019.
- [12] 凡勇,胡婷,周竹君,等. 植物绝缘油-纸板与矿物油-纸板的加速热老化寿命对比研究[J]. 绝缘材料,2014,47(4):105-109.
- [13] 刘睿,张宗喜,聂鸿宇,等. 矿物油与植物油对绝缘纸热老化特性的影响研究[J]. 绝缘材料,2020,53(6):65-69.
- [14] 徐晓刚,何韞雯,李鑫,等. 采用植物油浸渍耐高温纸的配电变压器过载能力[J]. 电网技术,2018,42(3):1001-1006.
- [15] 刘斌,张喜乐,王浩名,等. 不同负载条件下换流变压器绕组温升的计算与分析[J]. 变压器,2020,57(5):1-6.
- [16] 全国变压器标准化技术委员会. 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]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [17] 全国变压器标准化技术委员会. 电力变压器第2部分:液浸式变压器的温升:GB/T 1094.2—2013[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
- [18] DOMBEK G, NADOLNY Z. Liquid kind, temperature, moisture, and ageing as an operating parameters conditioning reliability of transformer cooling system[J]. Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability,2016,18(3):413-417.
- [19] DOMBEK G, NADOLNY Z. Thermal properties of a mixture of synthetic and natural esters in terms of their application in high voltage power transformers[J]. Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability,2017,19(1):62-27.