

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.06.020

考虑负载变化的植物绝缘油变压器温升特性研究

江 翼¹, 程 林¹, 陈清森¹, 杨 牧², 钱 航²,
张 娣², 李 妮³, 杨 涛⁴

(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, 武汉 430072; 3. 中国电力科学研究院武汉分院, 武汉 430074; 4. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052)

摘要: 为研究植物绝缘油变压器在实际运行中的温升特性,应用热工学和流体力学原理分析了变压器内部传热及散热机制,建立了变压器的二维简化模型。采用有限元法求解该模型在考虑负载变化下的温度场,得到了植物绝缘油变压器在稳定负载时的温度场分布,与矿物绝缘油变压器进行了对比,发现:当负载系数 $K < 1.5$ 时,矿物绝缘油变压器的温升特性优于植物绝缘油,而当负载系数 $K \geq 1.5$ 时,植物绝缘油变压器的温升特性优于矿物绝缘油变压器;同时,基于给定的动态负载曲线计算了植物绝缘油变压器的温度场分布,同样与矿物绝缘油变压器进行了对比。结果表明,当负载较低时,植物绝缘油变压器的温升特性比矿物绝缘油变压器差,而当负载较高时,植物绝缘油变压器的温升特性优于矿物绝缘油变压器。

关键词: 植物绝缘油变压器; 温度场; 动态负载; 热点温度; 有限元法

Study on Temperature-rise Characteristic of Vegetable Oil Insulated Transformer Considering Load Variation

JIANG Yi¹, CHENG Lin¹, CHEN Qingmiao¹, YANG Mu²,
QIAN Hang², ZHANG Di², LI Ni³, YANG Tao⁴

(1. Wuhan NARI Limited Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. China Electric Power Research Institute(Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: To understand the temperature-rise characteristic of vegetable oil insulated transformer in practical operation, the heat conduction and heat dissipation mechanisms of the transformer are analyzed by finite element method based on thermodynamics and fluid mechanics. A two-dimensional simplified model of the transformer is established. The finite element method is used to solve the temperature field of the model under load change, and the temperature field distribution of the vegetable oil insulated transformer under stable load is obtained. It is found that, compared with the mineral oil insulated transformer, the vegetable oil insulated transformer achieves better temperature-rise characteristic when the load factor K is not less than 1.5, but it has worse temperature-rise characteristic when K is less than 1.5. Moreover, the temperature field distribution of the vegetable oil insulated transformer is calculated based on the given dynamic load curve, and the result shows that the temperature-rise characteristic of the vegetable oil insulated transformer is better than that of the mineral oil insulated transformer under higher load, while under lower load, the result is opposite.

Key words: vegetable oil insulated transformer; temperature field; dynamic load; hot-spot temperature; finite element method

收稿日期:2017-12-11; 修回日期:2018-02-26

基金项目:国家电网公司科技项目(WNZ151-0007)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(WNZ151-0007).

0 引言

植物绝缘油是一种新型的油浸式变压器绝缘材料,其具有燃点和闪点高、降解时间短等特点^[1]。随着技术的不断发展,植物绝缘油变压器开始投入运行,由于其优良的电气绝缘性能和理化性能,未来可能会成为变压器绝缘油的主力。与传统矿物油相比,植物绝缘油的导热系数较大,黏度大,导致植物油变压器的温升特性与传统矿物油存在差异^[2]。因此研究不同负载下植物油对变压器散热及温度场分布的影响,为植物油变压器的设计与改进、植物油理化特性的改善等提供依据,具有重要的意义。

随着以有限体积法和有限元法为代表的数值仿真计算的发展,国内外对于电气设备的温升计算越来越多地采用数值计算方法^[3-5]。目前,对变压器温度场的研究多采用温度一流体场耦合的数值计算模型。文[6-7]利用 Fluent 和 Ansys 对传统油浸式电力变压器的二维模型进行温度场仿真分析;但目前对植物绝缘油配变温度场仿真分析的研究偏少;文[8]利用 Fluent 对不同绝缘油的电力变压器进行仿真分析,但没有考虑负载变化情况下不同绝缘油之间的差异。

以一台 35 kV/315 kVA 的植物绝缘油变压器为基础进行仿真计算,基于有限元法,采用温度场和流体场耦合的形式建模。文中分析了在不同负载情况下,植物绝缘油变压器达到稳定状态后的温升特性,并与矿物油变压器进行了对比;同时,考虑变压器负载的动态变化,研究了植物绝缘油变压器在相应动态负载曲线下的温升特性,同样与矿物油变压器进行了对比。

1 变压器有限元模型建立

1.1 理论基础

变压器热源包括铁心损耗、线圈损耗、漏磁通在产生的涡流损耗以及绝缘材料的介质损耗。其中线圈损耗和铁心损耗是变压器的主要热源^[9-10]。运行中的油浸式变压器达到热稳定状态需经历 3 个过程:一是通过热传导,热量从变压器铁心和绕组的中部传递到外表面;二是通过热对流换热,热量从变压器铁心的表面传递到绝缘油和油箱壁;三是通过对流换热及辐射散热,热量从油箱壁传递到空气中。对于不可压缩的理想流体的流动及分布特性符合质量守恒定律、动量守恒定律以及能量守恒定律,见式(1)-(3)。文中所使用的有限元软件以上述 3 个定律的数学物理方程为核心,并对相应参数进行修正,叠加必要的考虑因素,最终得到符合实际的仿真结果。

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \nabla \mathbf{v} = \mathbf{F} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2)$$

$$\rho c \mathbf{v} \nabla T = \nabla (\lambda \nabla T) + q \quad (3)$$

式(1)-(3)中: ρ 为流体的密度; $\mathbf{v}$ 为流速; $\mathbf{F}$ 为外部体积力; p 为压力; μ 为动力粘度; c 为比热容; T 为温度; λ 为热导率; q 为体积热量,即变压器铁心及绕组单位体积损耗。

1.2 模型搭建

根据一台 35 kV/315 kVA 植物绝缘油变压器的实际参数,对其进行简化处理后搭建植物绝缘油变压器仿真模型。参考文[11-12],在建模过程中做如下假设:①选择变压器某相分析,建立二维轴对称模型,将铁心中心设为对称轴;②热源只考虑铁心和高压绕组部分;③变压器高低压绕组沿圆周径向温度等效为无变化。

二维轴对称模型各部分规格参数为:油箱的高度设置为 1 070 mm,宽度 255 mm;铁心高度为 840 mm,宽度为 87.5 mm;低压绕组分为两层,高度均为 438 mm,宽度均为 8.75 mm,两层之间的油隙宽 5 mm;高压绕组高度为 378 mm,宽度为 40 mm;铁心与低压绕组间油隙宽 6.5 mm,低压与高压绕组之间油隙宽 20 mm,高压绕组与油箱壁之间油隙宽 75 mm;铁心距离油箱底部 12 mm,高低压绕组与铁心居中对齐。

有限元软件内置自适应网格剖分与手动剖分,文中选取手动网格剖分,在铁心、绕组的边缘处采用极端细化网格剖分,其他区域采用标准细化网格剖分,见图 1。网格剖分总单元数为 2 086。

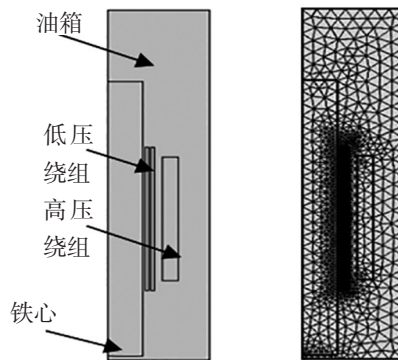


图 1 植物油变压器二维简化结构模型与网格剖分图

Fig. 1 Simplified two-dimensional model and grid subdivision of vegetable oil transformer

1.3 物性参数设定

热稳定过程中,植物绝缘油的温度变化较大,其部分特性参数随温度变化而改变。

为分析植物绝缘油变压器的温升特性,文中同时对 25 号矿物绝缘油变压器^[13-16]进行仿真以作对比,矿物绝缘油变压器的仿真模型与植物绝缘油变

压器相同,矿物绝缘油的物性参数见表1。

表1 变压器油的部分物理参数

物性参数	植物绝缘油	矿物绝缘油(25号)
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 132-0.724 3T	1 098-0.712 0T
导热系数 $k/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.195 3-7.969 $\times 10^{-5}T$	0.150 9-7.101 $\times 10^{-5}T$
动力粘度 $\mu/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	374.080 00e ^{-0.029T}	0.084 67-0.000 40T+ 5 $\times 10^{-7}T^2$
定压比热 $c_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	802.26+3.25T	807.163+3.58T

该变压器模型求解的区域包括两部分,设置完毕流体区域即变压器油的物性参数后,还需设置固体区域的材料属性,模型包含的固体区域有高、低压绕组以及变压器铁心。固体区域的材料属性见表2,由变压器的实际损耗计算得到3个热源的热通量大小。

表2 变压器主要部件参数

构件	材料属性	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	热通量/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
铁心	硅钢	550	7 550	52	6 230
高压绕组	铜	400	8 800	388	62 861
低压绕组	铜	400	8 800	388	114 850

考虑铜损中直流损耗占主要部分,而绕组的阻值同温度成正比,因此绕组的热通量需使用式(4)修正

$$Q(t)=Q_0[1+\alpha(T_s-T_0)] \quad (4)$$

式(4)中: Q_0 为初始温度 T_0 时的热通量; T_s 为迭代求解得到的实时温度, $^{\circ}\text{C}$; α 为导体温度系数,对于铜导线, $\alpha=0.003\ 93$ 。

1.4 边界条件设定

对于边界条件,可做如下设定:

1)定义模型所有部分初始温度为293.15 K,油的初始密度根据表1计算;

2)若变压器外界环境温度为293.15 K不变,忽略油箱壁厚度,对流换热系数需将忽略的散热片的面积考虑进去,按照忽略散热片前后散热面积之比同比例增大变压器外壳的对流换热。油箱箱体的表面积 $S_1=5\ 073\ 000\ \text{m}^2$,散热片总面积 $S_2=9\ 472\ 000\ \text{m}^2$,考虑油箱及散热片的对流换热系数均为 $h=5\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$,此时等效对流换热系数 $h_e=h(S_1+S_2)/S_1$,计算得,等效对流换热系数 h_e 为 $14.3\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$,同时设置了辐射表面发射率;

3)油箱、铁心、绕组等固定部分边界定义为无滑移边界,对称边界定义为滑移。

1.5 耦合分析方法

文中对多物理场进行分析计算时,由于变压器内部温度分布与流体流速之间的相互影响,所以采用双向耦合的方法。其流程见图2,仿真开始时,材料参数(密度、导热系数、动力粘度、定压比热容)取初始温度对应的数值,之后进行温度场与流体场之间的耦合计算,材料属性随温度和流速的变化而迭代,直至满足收敛条件。而对于温度对热源的影响,采用式(4)修正。

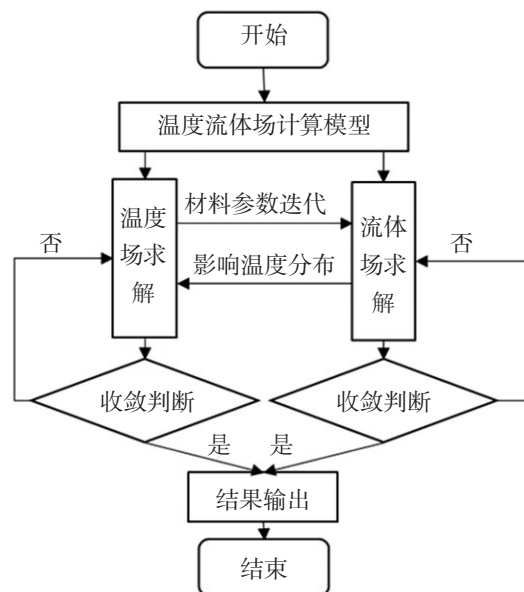


图2 温度流体场耦合分析方法

Fig. 2 Temperature fluid field coupling analysis method

2 结果与分析

2.1 稳态仿真

根据 IEC 60076-7:2005^[17],对变压器设定不同的负载电流,即0.7、0.8、0.9、1、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5倍的额定电流,相应的负载系数为 $K=0.7$ 、 $K=0.8$ 、 $K=0.9$ 、 $K=1$ 、 $K=1.1$ 、 $K=1.2$ 、 $K=1.3$ 、 $K=1.4$ 、 $K=1.5$ 。由于变压器的热稳定需要一段时间,经过瞬态求解器计算,发现在50 000 s后植物绝缘油变压器和矿物绝缘油变压器的热点温度不再上升,达到稳定状态,见图3。因此将稳态仿真时间确定为50 000 s。

为验证文中有限元仿真模型的可行性,同时根据 IEC 60076-2:2011,将变压器出厂额定负载下温升试验结果与仿真结果进行对比^[18],见表3。结果表明该方案可行。

2.1.1 热点温度对比

植物油变压器和矿物油变压器的热点温度随负载系数 K 的变化规律分别见图4。值得注意的是,两种变压器热点温度随负载系数的变化曲线在 $K=1.3$ 处开始接近,但两者在 $K=1.3$ 之前的曲线基本保持

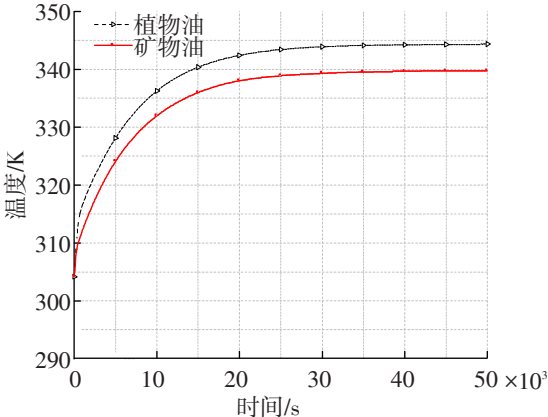


图3 热稳定时间

Fig. 3 Time of thermal stability

表3 变压器各点温升及误差

Table 3 Transformer temperature rise and error

热点温升	实测值/K	仿真模型/K	相对误差/%
铁心	68.75	66.36	3.48
低压绕组外层	69.65	66.54	4.47
高压绕组	66.05	64.43	2.45
油面温升	65.55	63.91	2.50

平行关系,植物油的热点温度仍始终高于矿物油。原因如下:低负载时,油的动力粘度在传热过程中占据主导因素,而植物油的粘度要大于矿物油。当 K 大于1.3时,由于变压器温度不断上升,油的动力粘度随之下降,导致粘度对传热的影响程度降低,在高过载的情况下,导热系数将成为传热主导因素,因此矿物油变压器的热点温度将高于植物油变压器的。在负载系数 $K=1.5$ 的仿真条件下,矿物油的热点温度已经高于植物油。

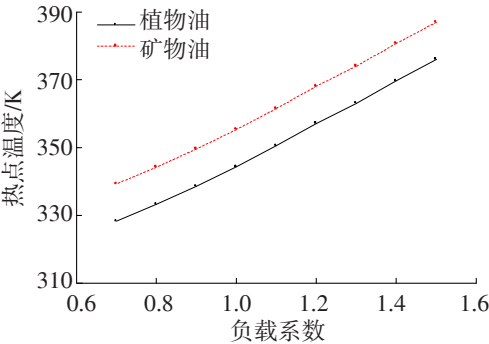


图4 热点温度对比

Fig. 4 Comparison of hot-spot temperature

2.1.2 热点温度梯度对比

文中所定义的热点温度梯度指的是绕组热点温度与顶层油温的差值^[9],其值越小,表明变压器热点区域温度分布越均匀,见图5。从图5可以看出,随着负载系数的增大,两种变压器的热点温度梯度均增大,植物油变压器的热点温度梯度始终大于矿物油变压器,差值约为2.5 K,说明矿物油变压器的热点区域温度分布更为均匀。但是,在过负载情况下

即负载系数 $K > 1.1$ 时,植物油变压器的热点温度梯度上升趋势减缓并出现下降趋势,而矿物油的梯度上升幅度增大。

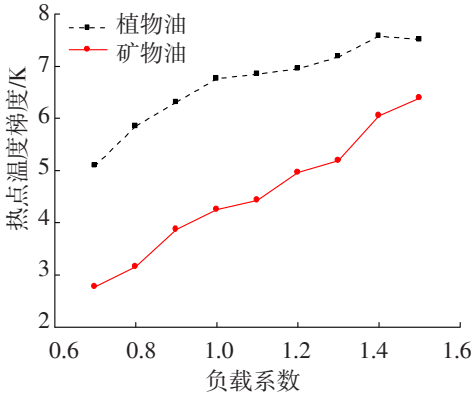


图5 热点温度梯度

Fig. 5 Comparison of hot-spot temperature gradient

2.2 动态仿真

变压器的负载一般处于动态变化中,因此在动态负载下进行植物绝缘油变压器温度场仿真,得到其温升特性,对变压器的实际运行具有重要指导意义。根据IEC 60076-7—2005,设计动态负载方案见图6。该方案共包括6个阶段:0 s(A)~11 400 s(B)时负载系数 $K=1$,11 400 s(B)~21 900 s(C)时负载系数 $K=0.6$,21 900 s(C)~30 000 s(D)时负载系数 $K=1.5$,30 000 s(D)~42 600 s(E)时负载系数 $K=0.3$,42 600 s(E)~54 100 s(F)时负载系数 $K=2.1$,54 100 s(F)~65 000 s(G)时负载系数 $K=0$ 。

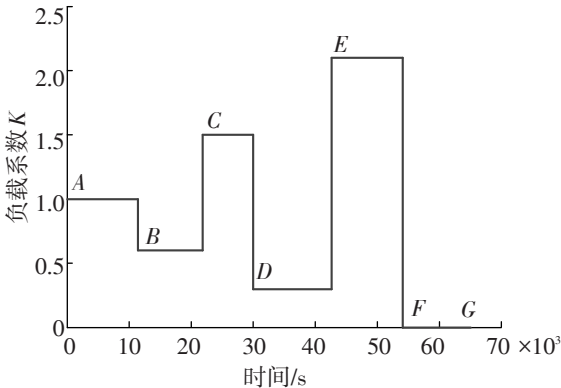


图6 动态负载曲线

Fig. 6 Curve of dynamic load

2.2.1 温度场分布

取每个阶段的起始和终止时刻分析动态负载下变压器温度—流体场的变化,分别在0 s(A),11 400 s(B),21 900 s(C),30 000 s(D),42 600 s(E),54 100 s(F),65 000 s(G),7个时刻取得仿真数据见图7。

从图7可以发现,A到B段内施加了额定负载,温度逐渐上升;B到C段负载系数下降,温度随之回落;C到D段负载系数上升至1.5,温度迅速上升,且温升比较明显;D到E段随着负载系数的下降,温度

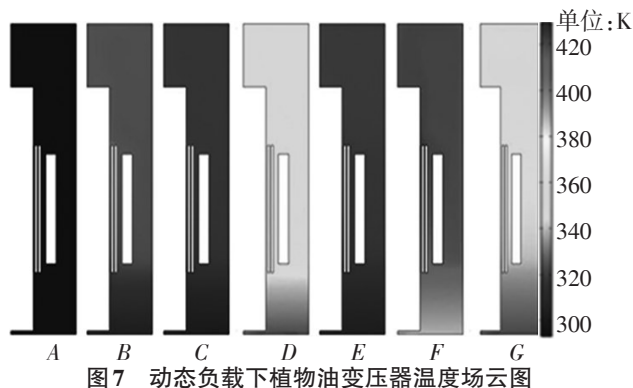


图7 动态负载下植物油变压器温度场云图
Fig. 7 Temperature field of vegetable oil transformer under dynamic load

迅速下降;E到F段负载系数增大至2.1,同时该段运行时间较长,温度上升为整个动态过程中的最大值;F到G段负载系数降为0,温度回落。矿物油变压器的温升过程与植物油的相近,在此不在赘述。

2.2.2 热点温度对比

热点温度变化图见图8。由图8可以得到如下结论,在A到B时间段内,植物变压器的热点温度要高于矿物油变压器,因为当负载较低时,两种变压器的油温相对较低,植物油的粘度大于矿物油的粘度,植物油的流速低于矿物油的流速,从而导致该段植物油变压器的温升特性不如矿物油变压器。但是,在D点之后的时间段内,植物油的温升特性要优于矿物油,表现为:D到E段内植物油变压器的降温速度比矿物油的快;E到F段内,植物油变压器的升温速度与矿物油的相近,而且至该段曲线的尾端时,矿物油变压器的温升速度已经略高于植物油的,热点温度也高于植物油变压器,差值越为5 K左右;F到G段内,植物油变压器的降温速度与矿物油的相近。

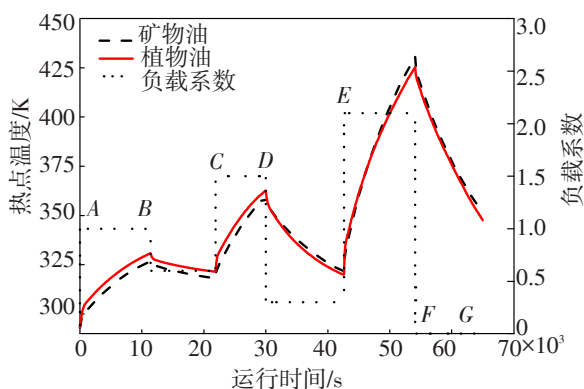


图8 植物油与矿物油的热点温度
Fig. 8 Comparison of hot-spot temperature values of vegetable oil and mineral oil

从温度流体场仿真计算而言,植物油变压器与矿物油变压器的计算方法并无大的差别,差别仅在于物性参数的不同导致一些温度分布细节的差异。因此对上述热点温度的存在区别的分析如

下:由表1可知植物油的动力粘度随温度的变化趋势较大,可参考动力粘度的变化图9,对于自然油循环的配电变压器,当变压器温度较高时,矿物油和植物油的动力粘度接近,此时动力粘度对于传热的影响相对减小,热导率成为主要影响因素。而植物油的热导率始终高于矿物油,因此出现植物变压器的温升特性优于矿物油变压器的情况。由此可见,如果在制备植物绝缘油时减小其动力粘度可以增强散热性能^[20]。

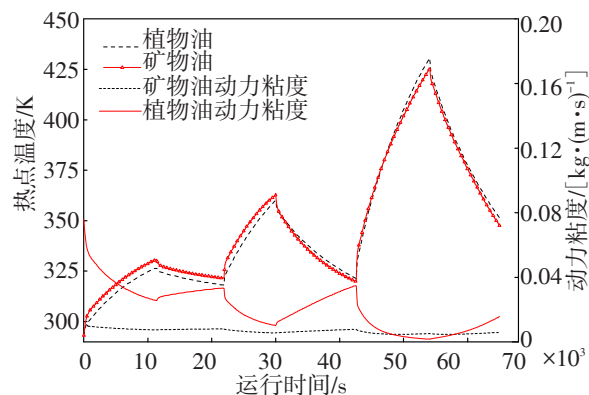


图9 植物油与矿物油的动力粘度
Fig. 9 Dynamic viscosity of vegetable and mineral oils

3 结论

文中采用有限元法,基于一台35 kV/315 kVA植物油变压器,搭建了流固耦合仿真模型,分析了负载系数和植物油变压器温升特性的关系,得出结论:

- 1)随着负载系数的增大,植物油变压器的热点温度逐渐升高,热点温度同负载系数呈线性关系。
- 2)对于稳定负载的情况,当负载系数 $K < 1.5$ 时,矿物油变压器的温升特性优于植物油;而当负载系数 $K \geq 1.5$ 时,植物油变压器的温升特性优于矿物油变压器。所以如果植物油变压器长期运行下低负载工况下,在设计时需辅以相应散热措施。
- 3)同样对于稳定负载的情况,植物油变压器的热点温度梯度较大,其温度分布相比矿物油变压器稍显不均。
- 4)对于动态负载的情况,当负载较低时,植物油变压器的温升特性比矿物油变压器差,而当负载较高时,植物油变压器的温升特性优于矿物油变压器。结合第二条结论可知,植物油变压器对于过负载运行具有更好的适用性。

参考文献:

- [1] CORKRAN J L, MCSHANE C P, RAPP K J, et al. Vegetable oil based dielectric coolant: WO, CA 2240890 A1[P].1997.

- [2] 李 剑, 刘兴鹏, 王有元, 等. 以箱壁温度为判据的油浸式变压器绕组热点温度计算模型及试验分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2344-2349.
LI Jian, LIU Xingpeng, WANG Youyuan, et al. Model of hot spot temperature in oil-immersed transformers using temperature estimation of tank wall[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2344-2349.
- [3] 李 季, 罗隆福, 许加柱. 电力机车主变压器油箱三维温度场有限元分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 21-23.
LI Ji, LUO Longfu, XU Jiazh. Finite element analysis of the 3D thermal field of main transformer oil tank of electric locomotive[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 21-23.
- [4] 傅晨钊, 汲胜昌, 王世山, 等. 基于有限元法的电缆变压器绕组的暂态热路模型研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18(2): 77-82.
FU Chenzhao, JI Shengchang, WANG Shishan, et al. A Study of transient thermal circuit model for the cable transformer coil based on finite element method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(2): 77-82.
- [5] 江淘莎, 李 剑, 陈伟根, 等. 油浸式变压器绕组热点温度计算的热路模型[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1635-1640.
JIANG Taosha, LI Jia, CHEN Weigen, et al. Thermal model for hot spot temperature calculation in oil-immersed transformers[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1635-1640.
- [6] 温 波, 刘 爽, 冯加奇, 等. 油浸式电力变压器绕组温度场的二维仿真分析[J]. 变压器, 2009, 46(9): 35-38.
WEN Bo, LIU Shuang, FENG Jiaqi, et al. Two dimensional simulation analysis of winding temperature field of oil-immersed power transformer[J]. Transformer, 2009, 46(9): 35-38.
- [7] QIAO W, ZHANG B, HAO Z, et al. Simulation and analysis of oil-immersed transformer based on thermal-fluid coupled field[C]//International Conference on Power System Technology.[S.l.]: IEEE, 2014: 826-831.
- [8] 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(4): 21-24.
SONG You, RUAN Jiangjun, WANG Shanshan, et al. Simulation analysis of thermal property of insulating oil for oil-immersed transformer[J]. Insulating Materials, 2015(4): 21-24.
- [9] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
YIN Kening. Design principle of transformer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [10] 刘传彝. 电力变压器设计计算方法与实践[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.
LIU Chuanyi. Design and calculation method and practice of power transformer[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2002.
- [11] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
TAO Wenquan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988.
- [12] COMSOL Multiphysics[DB/OL]. [2017-05-16]. <http://www.Comsol.com/>, 2016.
- [13] 陈伟根, 苏小平, 孙才新, 等. 基于有限体积法的油浸式变压器绕组温度分布计算[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 23-27.
CHEN Weigen, SU Xiaoping, SUN Caixin, et al. Temperature distribution calculation based on FVM for oil-immersed power transformer windings[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 23-27.
- [14] 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): 150-155.
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 Equipment, 2015, 35(9): 150-155.
- [15] LIAO Caibo, RUAN Jiangjun, LIU Chao, et al. 3-D coupled Electromagnetic-fluid-thermal analysis of oil-immersed triangular wound core transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11): 1-4.
- [16] OOMMEN T V. Vegetable oils for liquid-filled transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(1): 6-11.
- [17] Power transformers - Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers: IEC 60076-7: 2005[S]. Geneva, Switzerland: IEC Central Office, 2005.
- [18] 程志光, 高桥则雄, 博扎德·弗甘尼等, 等. 电气工程电磁场模拟与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
CHENG Zhiguang, TAKAHASHI N, FORGHANI B, et al. Electromagnetic and thermal field modeling and application in electrical engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [19] 电力变压器第2部分: 液浸式变压器的温升: GB 1094.2—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
Power transformer—Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers: GB 1094.2—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [20] 余 辉, 王诗琴, 魏 乐, 等. 植物油化学组成对其电气和理化性能的影响[C]//第十三届全国应用化学年会论文集. 长春: 中国化学会, 2013: 1-2.
YU Hui, WANG Shiqin, WEI Le, et al. Influence of composition and structure on electrical and physico-chemical properties in vegetable insulating oil[C]//The 13th National Applied Chemistry Annual Meeting Proceedings. Changchun: Chinese Chemical Society, 2013: 1-2.

江 翼(1985—), 男, 硕士, 主要从事高压电气设备绝缘检测及评估诊断技术研究。