

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.09.027

配电变压器中植物绝缘油直接替换矿物绝缘油温度场仿真 计算及现场温升试验分析

何清, 阮玲, 罗维, 王瑞珍, 熊虎

(国网湖北省电力公司电力科学研究院, 武汉 430077)

摘要: 为研究10 kV配电变压器中,在不改变原矿物绝缘油变压器结构设计和制造工艺条件下,直接用植物绝缘油替换矿物绝缘油后,对变压器温升特性影响。特制造两台结构设计和加工工艺完全相同的S11-M-315 kVA/10 kV配电变压器,分别填充克拉玛依25号矿物绝缘油和FR3植物绝缘油,通过Ansys CFX仿真软件对两台配电变压器进行油流和温度的模拟仿真,得到两台变压器在模拟温升实验中的差异,并通过对两台变压器实际现场温升试验,分析比对植物绝缘油直接替换矿物绝缘油后对变压器温升性能的实际影响,并通过植物绝缘油的理化性能对实验数据进行分析。研究表明,对于10 kV配电变压器,在不改变原矿物绝缘油变压器设计结构与制造工艺条件下,用FR3植物绝缘油直接替换25号矿物绝缘油,植物绝缘油变压器整体温升均比矿物绝缘油变压器高约3~6 K,但仍满足GB 1094.2—2013《电力变压器第2部分:液浸式变压器的温升》标准对温升限值要求;在同等温升条件下,植物绝缘油在变压器中的油流速度明显比矿物绝缘油慢,在本事例中仅为矿物绝缘油流速的1/2,这是导致其温升偏高的原因。在变压器油流速度和温度热点分布方面,植物绝缘油变压器与矿物绝缘油具有相同趋势,两台变压器温度最高点均集中在中间绕组的上部,且位于外侧的高压绕组比位于内侧的低压绕组温度高;两台变压器油流速度最大值均出现在上部绕组之间。现场温升试验和模拟仿真均相互验证了以上结论。最后,根据研究结论,分别提出降低植物绝缘油配电变压器温升和提高温升限值的方法。

关键词: 10 kV植物绝缘油变压器;直接替换;模拟仿真;现场试验;对比分析

Simulation Analysis and On-site Temperature Rise Test for Studying Mineral Insulating Oil Directly Replaced by Vegetable Insulating Oil in Distribution Transformer

HE Qing, RUAN Ling, LUO Wei, WANG Ruizheng, XIONG Hu

(State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China)

Abstract: In order to study the 10 kV distribution transformer, the effect of the vegetable insulating oil on the temperature rise characteristics of the transformer was replaced by the vegetable insulating oil without changing the structural design and manufacturing process of the original mineral insulating oil transformer. The S₁₁-M-315 kVA / 10 kV distribution transformer, which is exactly the same in the design and processing process, is used to fill the Karamay No. 25 mineral insulating oil and FR3 vegetable insulating oil respectively. The two transformers are oiled by Ansys CFX simulation software flow and temperature simulation of the two transformers in the simulation of the temperature rise in the experimental differences, and through the actual temperature of two transformers on-site test, compared with the vegetable insulation oil directly replace the mineral insulation oil after the transformer temperature rise performance. And the physical and chemical properties of vegetable insulating oil are used to analyze the experimental data. The results show that, for the 10 kV distribution transformer, without changing the original mineral insulating oil transformer design structure and manufacturing process conditions, with FR3 vegetable insulating oil directly replace No.25 mineral insulating oil, vegetable insulation oil transformer overall temperature rise than mineral insulating oil. The transformer is about 3~6 K, but still satisfy the GB 1094.2—2013 “power transformer part 2:

liquid immersion transformer temperature rise” standard temperature limit requirements; in the same temperature conditions, the vegetable insulation oil in the transformer, the oil flow rate is significantly slower than mineral insulating oil, in this case only 1/2 of the mineral oil flow rate, which is the reason for its high temperature rise. In the transformer oil flow velocity and temperature hot spot distribution, the vegetable insulation oil transformer and mineral insulating oil has the same trend, the two transformer temperature points are concentrated in the upper part of the middle, and the outer side of the high-voltage winding temperature higher than the inside of the low-voltage winding temperature; two transformer oil flow velocity maximum appears between the upper windings. Both the field temperature rise test and the simulation verify the above conclusions. Finally, according to the conclusion of the study, the ways to reduce the temperature rise and increase the temperature rise limit of the vegetable insulating oil distribution transformer are put forward respectively.

Key words: 10 kV vegetable insulating oil transformer; directly replace; simulation; field test; comparative analysis

0 引言

随着全球对环境保护意识的不断增强,更加环保和安全的环保型液体绝缘介质和气体绝缘介质成为各国研究的热点。其中,植物绝缘油以其生物降解率高、燃点高(大于 300 ℃)、来源广泛等优点逐渐成为传统液体绝缘介质(矿物绝缘油)的良好替代产品。研究同时表明,采用植物绝缘油可延长设备使用寿命、提高抗过负荷能力,从而提高可靠性,节约总成本。世界上已有超过百万台植物绝缘油变压器投入运行^[1-2]。目前,在中国,植物绝缘油(天然酯)变压器主要推广应用于 10 kV 配电系统。

目前植物绝缘油的价格约为矿物绝缘油的 3 ~ 5 倍。而且植物绝缘油(以甘油三酯为主要成分)与矿物绝缘油(碳氢化合物)在分子构造上的不同,导致两者在理化性能上的差异,如植物绝缘油闪点、燃点、运动黏度、介质损耗因数、介电常数、含水量等指标均大于矿物绝缘油^[3-5]。因此,大型植物绝缘油变压器的制造绝不是简单意义上的直接换油如此简单,而是需要根据植物绝缘油的特性重新开展变压器的结构、电磁以及绝缘配合设计。这将大大增加植物绝缘油变压器的生产制造成本。

由于目前中国的植物绝缘油主要推广应用于 10 kV 配电变压器中,在低电压等级变压器中是否需要重新进行变压器结构设计还是可以通过采用直接换油技术,将矿物绝缘油变压器直接转变或植物绝缘油变压器而不影响变压器实际运行特性,这对植物绝缘油在 10 kV 配电变压器的推广应用具有现实经济和工程意义。

变压器温升试验数据一直都是变压器设计和运行的重要性能指标之一,当热点温升超过温升限值时,会加速绝缘老化,缩短变压器寿命,影响变压器正常运行性能和寿命^[6]。因此,通过研究仅填充

液体绝缘介质不同且结构与制造工艺完全相同的两台变压器温升运行特性,就可直观反应植物绝缘油替换矿物绝缘油后对变压器运行性能的影响。

1 S₁₁-M-315 kVA/10 kV±2×2.5%配电变压器

1.1 变压器设计及参数

按满足现有矿物绝缘油变压器相关标准^[7-8],制造两台结构设计和加工工艺完全相同的S₁₁-M-315 kVA/10 kV±2×2.5%配电变压器。其中一台液体绝缘介质为克拉玛依 25 号矿物绝缘油,另一台为 FR3 植物绝缘油。为方便多次取油样检测,在设计中增加油枕,油枕不带呼吸器,仍保持设备整体为全密封结构。

设计制造的 S₁₁-M-315 kVA/10 kV±2×2.5% 配电变压器结构设计见图 1。

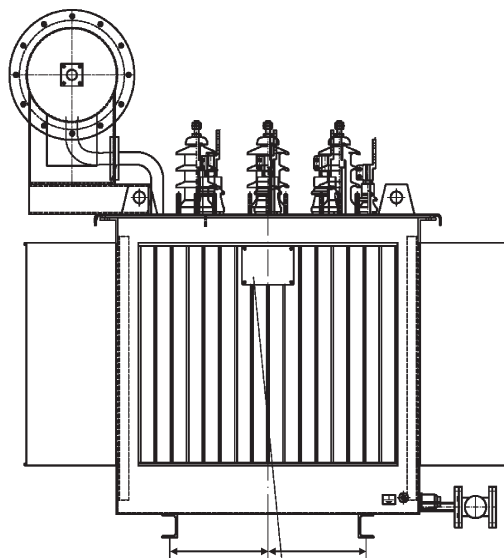


图 1 S₁₁-M-315 kVA/10 kV±2×2.5% 配电变压器设计外观图

Fig. 1 Appearance design of S11-M-315 kVA/10 kV±2×2.5% distribution transformer

变压器铁心与线圈设计图见图 2。图 2 中的线

圈为多层圆筒式,呈椭圆形;联接组标号为 Dyn11, 低压绕组布置在高压绕组内侧。低压绕组额定电压 0.4 kV, 额定电流 454.67 A, 低压线圈外径 182 mm, 内径 137 mm。高压绕组额定电压 10 kV, 额定电流 18.187 A, 高压线圈外径 250 mm, 内径 193 mm。高低压线圈油道设计 4.5 mm, 主通道油道设计 4 mm。

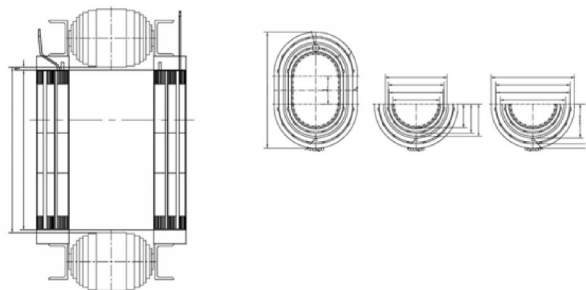


图2 变压器铁心与线圈设计图

Fig. 2 Design of transformer iron core and coil

变压器其他技术参数详见表1。其铁心型号 30Q105。

表1 变压器参数

Table 1 Parameters of transformer

项目名称	参量
铁心重量/kg	460
磁密/kGas	15.1
铜重/kg	221
纸重/kg	35
油重/kg	220
匝电压/V	8.248

1.2 变压器温升限值

GB 1094.2—2013《电力变压器第2部分:液浸式变压器的温升》中对变压器温升限值^[9]做了如下规定:顶层绝缘液体为 60 K;绕组平均(电阻法测量)/ON 及 OF 冷却方式为 65 K;绕组热点为 78 K。

上述温升限值适用于绝缘系统温度为 105 ℃的固体绝缘,且绝缘液体为矿物绝缘油或燃点不大于 300 ℃的合成液体所生产制造的变压器。

2 仿真模型及计算

2.1 变压器三维仿真模型

以实际设计制造的 S₁₁-M-315 kVA/10 kV±2×2.5%配电变压器为原始模型,利用 ANSYS CFX 仿真软件建立变压器三维仿真模型^[10-16],见图3。

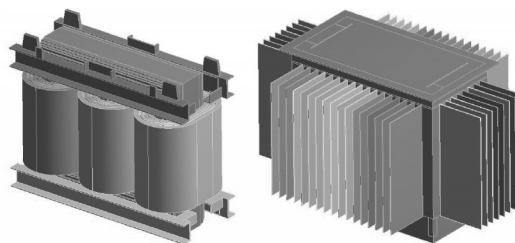


图3 变压器三维仿真模型

Fig. 3 3-D simulation model of distribution transformer

2.2 变压器发热与冷却

油浸式变压器运行时变压器内有空载损耗和负载损耗。空载损耗也称为铁损主要由铁心(硅钢片)产生,负载损耗也称为铜损主要由线圈产生,同时还有漏磁场在金属构件上产生的涡流损耗和绝缘介质产生的损耗。这些损耗转变为热量,热量的一部分用来提高绕组、铁心及结构的温度。

油浸式变压器的散热主要通过3种方式:一是热传导,绕组和铁心的热量由绝缘油由内部传递到外部;二是热交换,将传递到绕组和铁心外部的热量与油箱壁和散热片进行热交流;三是热辐射,热量通过油箱和冷却装置与环境空气进行辐射散热。

变压器主要热源计算参数见表2。

表2 变压器主要热源参量

Table 2 Main heat source parameter of transformer

热源	产生的热量/W
高压绕组	2 056
低压绕组	1 730
铁心	426

由表2可知,变压器热源主要来源于绕组发热,绕组产生的热量占总发热量的90%,铁心产生的热量仅占总热量的10%。其中高压绕组产生的热量占绕组发热量的54%。

2.3 液体绝缘介质热特性参量

由于两台变压器唯一区别仅在于液体绝缘介质不同,因此液体绝缘介质仿真参数的设定直接影响仿真结果的准确性。仿真过程中FR3植物绝缘油和25号矿物绝缘油热特性的关键技术参数见表3。

2.4 仿真计算

2.4.1 油流场分布

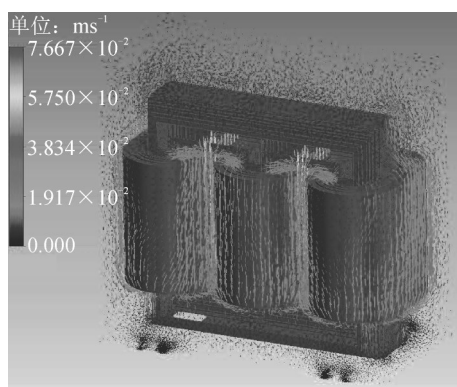
绝缘油在变压器中主要起散热和绝缘作用。变压器3种散热方式中热传导和热交换的效率均与绝缘油的流动速度相关。因此,绝缘油在变压器中的流动速度直接影响变压器的散热效果从而影响变压器的温升。

表3 热特性参数

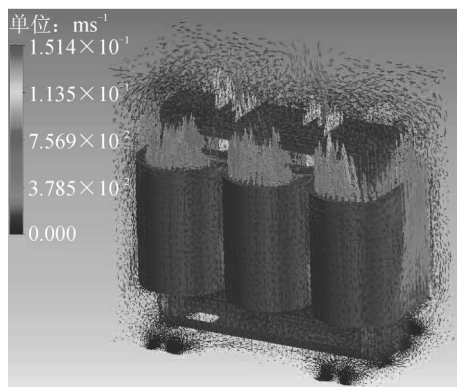
Table 3 Thermal parameters of insulating oil

性能参数	FR3 植物绝缘油	25 号矿物绝缘油
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	920@25 $^{\circ}\text{C}$	886.7@20 $^{\circ}\text{C}$
运动黏度/($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	34.31@40 $^{\circ}\text{C}$ 8.3@100 $^{\circ}\text{C}$	10.05@40 $^{\circ}\text{C}$
比热容/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	2 100	1 838.5
热导率/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0.15	0.13
热膨胀系数/(K^{-1})	7.4×10^{-4}	8.0×10^{-4}

仿真得到的FR3植物油变压器和25号矿物绝缘油变压器内部油流场的速度矢量分布对比见图4。



(a) FR3 植物绝缘油变压器



(b) 25 号矿物绝缘油变压器

图4 变压器油流场速度矢量分布对比图

Fig. 4 Comparison of velocity vector distributions in transformer oil flow field

从图4可知,两台变压器绝缘油的流动方向均是由温度低的底部向温度高的上部流动,且油流速度最大部位均位于上部绕组之间。FR3植物绝缘油变压器最大油流速度为0.08 m/s,25号矿物绝缘油变压器的最大油流速度为0.15 m/s,比FR3植物绝缘油变压器流速快1倍。

由表3可知,FR3植物油在密度、运动黏度、比热容、热导率4个方面均大于传统25号矿物油,热膨胀系数两者差别不大。其中最大差异体现在运

动黏度,在40 $^{\circ}\text{C}$ 下,FR3植物绝缘油运动黏度可达到传统25号矿物油的3.4倍,随着温度的升高,FR3植物绝缘油运动黏度变小,两者差距将逐渐减小。因此,在同等温度条件下,FR3植物绝缘油的流动性比矿物绝缘油要差,流速变慢,从而影响散热性能。

2.4.2 温度场分布

设定仿真环境温度为25 $^{\circ}\text{C}$ 。FR3植物绝缘油变压器和25号矿物绝缘油变压器温度场分布三维仿真对比图见图5。

从图5可知,两台变压器中间绕组温度均比两端绕组高,上部绕组比下部绕组高;布置于外侧的高压绕组温度比内侧的低压绕组温度高。

FR3植物绝缘油变压器与25号矿物绝缘油变压器温度场仿真计算结果见表4。

从表4可知,FR3植物绝缘油变压器温度整体比25号矿物绝缘油高约3~6 K,其中高压绕组部分温度最高,与低压绕组温相差近6 K;绝缘油部分温度较绕组低,平均油温升相差3.4 K。两台变压器温升仿真计算结果均满足GB 1094.2—2013《电力变压器第2部分:液浸式变压器的温升》标准要求。

3 温升试验

对两台 $S_{11}-M-315\text{kVA}/10\text{kV}\pm2\times2.5\%$ 配电变压器开展现场温升检测,试验方法采用短路试验法^[9,17]。

3.1 空载和负载损耗试验

在进行温升试验前,对两台变压器开展常规电气和绝缘油检测试验^[18-19],检测合格。短路试验法施加的是由计算得到的总损耗。总损耗由已测出的空载损耗和75 $^{\circ}\text{C}$ 参考温度下的负载损耗之和计算得到。两台变压器温升试验得到的空载损耗和负载损耗见表5。

3.2 现场温升试验

现场试验见图6。

3.2.1 温升试验结果

温升试验环境温度为17~20 $^{\circ}\text{C}$ 。两台变压器现场温升试验检测结果分别见表6、7。

对比表6、7可知,FR3植物绝缘油变压器相比25号矿物绝缘油变压器整体温升偏高。平均线圈温升高2.5~4.5 K,线圈热点温升高4~6.4 K,且高压绕组温升比低压绕组高;顶层油温升和油平均温升分别高5 K和3.3 K。现场温升试验结果与仿真计算结果相一致。且两台变压器温升试验结果均满足GB 1094.2—2013《电力变压器第2部分:液浸式变压器的温升》标准要求。

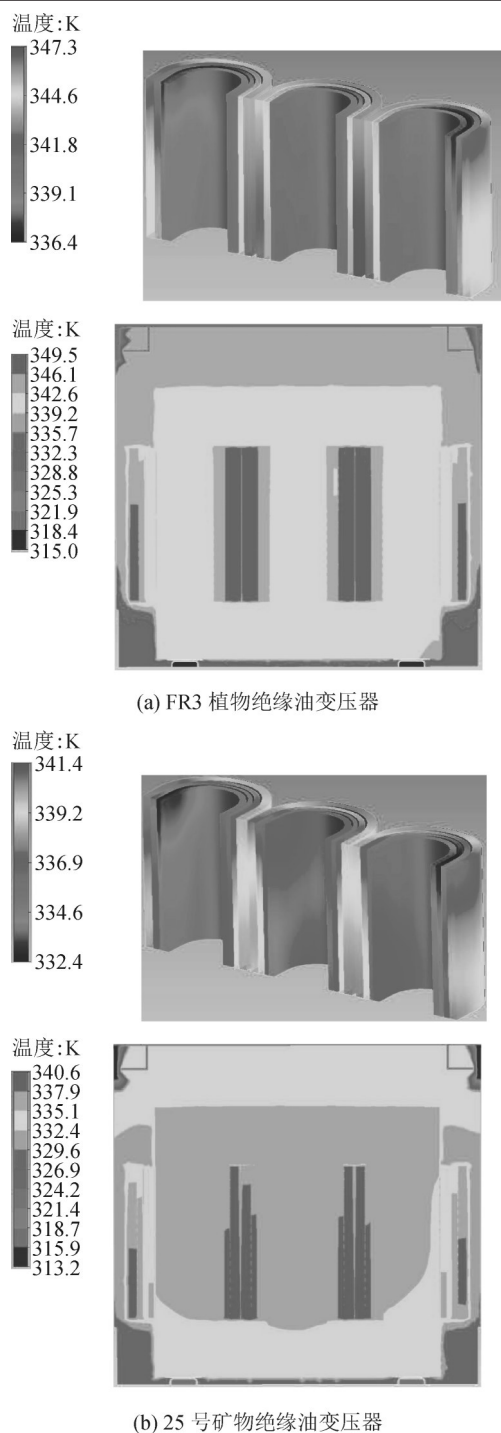


图5 变压器温度场分布对比图

Fig. 5 Comparison of temperature field distribution of transformers

3.2.2 温升试验红外光谱及运行图

在温升试验中,对两台变压器外壳发热情况进行了红外光谱检测。在温度上升阶段和温度稳定阶段得到的两台变压器外壳发热红外光谱图见图7。图7中上面4幅图为温度上升阶段,下面4幅图为温度稳定阶段。

从图7可知,在温度上升阶段,两台变压器的发热均主要集中于变压器绕组端部;在温度稳定阶

表4 温度场仿真计算

Table 4 Simulation calculation value of temperature field

temperature field					K
项目	FR3 植物绝缘 油变压器		25 号矿物绝缘 油变压器		温升 限值
平均线 圈温升	高压 绕组	低压 绕组	高压 线圈	低压 线圈	
	47.95	42.45	42.30	37.75	65
高压线圈热 点温升	74.30	—	68.40	—	78
顶部油温升	41.20		37.10		60
平均油温升	37.75		34.35		—
铁心温升	44.60		39.90		—

表5 空载损耗和负载损耗检测结果

Table 5 Test results of no-load loss and load loss of distribution transformers

设备名称	空载损耗	负载损耗(75℃)	总损耗
FR3 植物绝缘 油变压器	387	3 743	4 130
25号矿物绝缘 油变压器	398	3 817	4 215



图6 现场温升试验

Fig. 6 Temperature rise test on-site

表6 FR3植物绝缘油变压器温升试验数据

Table 6 Temperature rise test data of FR3 vegetable

项目	K		
	insulating oil transformer		
断电时温升	高压	低压	温升限值
	56.6	54.9	—
平均线圈温升	56.7	55.0	65.0
线圈热点温升	72.3	70.3	78.0
顶部油温升	47.5		60.0
平均油温升	36.0		—

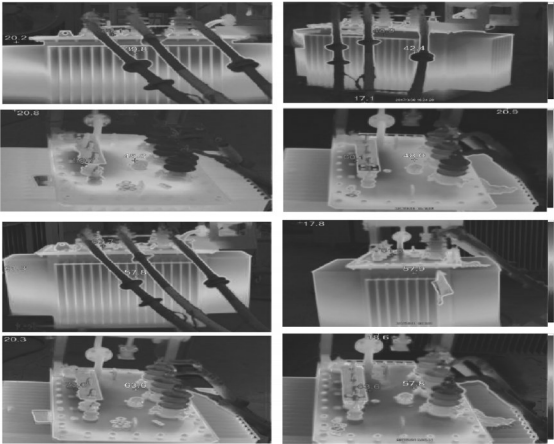
段,FR3植物绝缘油变压器和25号矿物绝缘油变压器上端盖红外检测温度分别为63.6℃和57.8℃,温差为5.8℃。与表6与表7计算结果也相吻合。

两台变压器温升运行图见图8。

表7 25号矿物绝缘油变压器温升试验数据

Table 7 Temperature rise test data of mineral insulating oil transformer

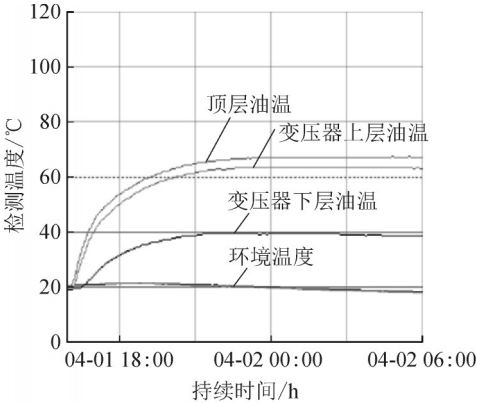
项目	高压	低压	温升限值
断电时温升	45.3	45.6	—
平均线圈温升	52.2	52.5	65.0
线圈热点温升	65.9	66.3	78.0
顶部油温升	42.5		60.0
平均油温升	32.7		—



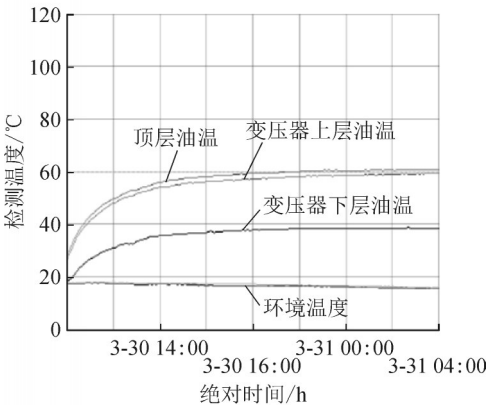
(a) FR3 植物绝缘油变压器 (b) 25 号矿物绝缘油变压器

图7 红外光谱图

Fig. 7 Infra-red spectrogram in temperature rise test



(a) FR3 植物绝缘油变压器



(b) 25 号矿物绝缘油变压器

图8 温升运行图

Fig. 8 Temperature rise operation diagram

从图8可知,在温升试验中,FR3植物绝缘油变压器顶层和上部油温比矿物绝缘油变压器约高5~6 K;两台变压器底部油温基本相同;FR3植物绝缘油变压器温度上升速度较矿物绝缘油变压器快,FR3植物绝缘油变压器顶层油温达到60℃需3 h,矿物绝缘油变压器需8 h。

4 结论

文中利用Ansys CFX仿真软件对两台按传统矿物绝缘油性设计的S₁₁-M-315 kVA/10 kV±2×2.5%配电变压器建立三维流体-温度场仿真模型。并对当变压器液体绝缘介质分别填充FR3植物绝缘油和25号矿物绝缘油的变压器油流场和温度场开展数值仿真计算。对两台S₁₁-M-315 kVA/10 kV±2×2.5%配电变压器(分别填充FR3植物绝缘油和25号矿物绝缘油)开展现场温升试验,得到在不改变原配电变压器设计与制造条件下,液体绝缘介质由25号矿物绝缘油替换为FR3植物绝缘油后,对变压器温升试验的影响。两台变压器现场温升试验结果与仿真计算结果相一致,且相互验证。通过数据分析可以得到以下结论:

1)变压器液体绝缘介质由25号矿物绝缘油更换为FR3植物绝缘后变压器整体温升上升约3~6 K,但仍满足GB 1094.2—2013《电力变压器第2部分:液浸式变压器的温升》标准要求且与温升限值存在较大裕度。

2)从变压器油流场仿真分布可知,由于FR3植物绝缘油与25号矿物绝缘油在同等温度下运动黏度相差较大,使得FR3植物绝缘油变压器最大油流速度(0.08 m/s)仅为25号矿物绝缘油变压器最大油流速度(0.15 m/s)的一半。相对较低的油流速度影响了FR3植物绝缘油的散热效果,导致其在温度场仿真计算中整体温升相比25号绝缘油变压器偏高。

3)变压器温升试验、红外测温与仿真结果均表明,两台变压器温度最高点均集中在中间绕组的上部,且位于外侧的高压绕组比位于内侧的低压绕组温度高;两台变压器油流速度最大值均出现在上部绕组之间。通过两台变压器温升运行图对比分析可知,FR3植物绝缘油变压器温升上升速度快于矿物绝缘油变压器。

综上所述,10 kV电压等级的油浸式配电变压器,在不改变原变压器设计结构与制造工艺条件下,液体绝缘介质由矿物绝缘油直接替换为植物绝缘油后,变压器的温升性能主要受植物绝缘油运动黏度、绕组内部油道尺寸以及外部散热装置的影响。

响;用植物绝缘油直接替换矿物绝缘油,植物绝缘油配电变压器的温升限值依然满足矿物绝缘油变压器温升限值要求。若需进一步降低植物绝缘油变压器温升水平,可通过加大绕组内部油道尺寸、增加绕组进出油口宽度、增大外部散热器面积^[20-23]等方法进行改进。由于植物绝缘油闪点和燃点均高于300℃,远高于矿物绝缘油(<200℃),若需重新开展植物绝缘油变压器设计,可考虑采用比现有105℃绝缘等级更高的固体绝缘介质与植物绝缘油配合,可提高植物绝缘油变压器的温升限值。

参考文献:

- [1] 项阳. 浅谈植物绝缘油变压器[J]. 变压器, 2014, 51(12): 23-27.
XIANG Yang. Brief discussion on vegetable insulating oil transformer[J]. Transformer, 2014, 51(12):23-27.
- [2] 蔡胜伟, 陈江波, 周翠娟, 等. 植物绝缘油-纸复合绝缘热老化特性研究[J]. 绝缘材料, 2015, 48(2):56-60.
CAI Shengwei, CHEN Jianbo, ZHOU Cuijuan, et. Study on thermal ageing characteristics of vegetable insulating oil-paper compound insulation[J]. Insulating Materials 2015, 48(2):56-60.
- [3] 李剑, 党剑亮, 杨丽君, 等. 三种植物绝缘油的理化与电气性能的比较[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(9):42-45.
LI Jia, DANG Jianliang, YANG Lijun, et al. Comparison on physical and chemical characteristics and electric properties of three types of vegetable insulating oil[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2007, 30(9):42-45.
- [4] 李晓虎, 李剑, 孙才新, 等. 植物油中提取的环保液体绝缘材料[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, 28(1): 36-41.
LI Xiaohu, LI Jian, SUN Caixin, et al. Preparation of environmental friendly insulating materials from vegetable oils[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2005, 28(1): 36-41.
- [5] 李晓虎. 植物绝缘油理化及电气性能的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006:2-4.
LI Xiaohu. Research on physical - chemical and electric properties of vegetable oil based dielectric liquid[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006: 2-4.
- [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.
WEI Wei, LI Xin, XU Xiaogang, et al. Finite element simulation for temperature field of vegetable insulation oil distribution transformer based on fluent[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(10):121-126.
- [7] 变压器类产品型号编制方法: JB/T 3837—2010[S]. 2010. Identification method of transformer's product type: JB/T 3837—2010[S]. 2010.
- [8] 油浸式电力变压器技术参数和要求: GB/T 6451—2015[S]. 2015. Specification and technical requirements for oil-immersed power transformers: GB/T 6451—2015[S]. 2015.
- [9] 电力变压器 第2部分: 液浸式变压器的温升: GB 1094.2—2013[S]. 2013. Power transformers—Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers: GB 1094.2—2013[S]. 2013.
- [10] 汪德华, 杨春, 王革鹏, 等. 基于Fluent的超高压变压器二维温度场分析[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 161-165.
WANG Dehua, YANG Chun, WANG Gepeng, et al. Analysis of two-dimensional temperature field in ultra-high voltage transformer based on fluent[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6):161-165.
- [11] 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 analysis of winding temperature field of oil-immersed power transformer[J]. Transformer, 2009, 46(9):35-38.
- [12] 张海燕, 储晨昀, 李元媛. 变压器温度场的有限元分析[J]. 变压器, 2014, 48(3):25-28.
ZHANG Haiyan, CHU Chenyun, LI Yuanyuan. Finite element analysis of temperature field in transformer[J]. 2014, 48(3):25-28.
- [13] ALLAHBAKHSHI M, AKBARI M. Heat analysis of the power transformer bushings using the finite element method[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100(5):714-720.
- [14] TAGHIKHANI M A. ONAN power transformer heat transfer modeling[J]. International Journal of Energy Science, 2011, 1(3):176-179.
- [15] 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.
- [16] 薛飞, 陈炯, 周健聪, 等. 基于Ansys软件的油浸式变压器温度场有限元仿真计算[J]. 上海电力学院学报, 2015, 31(2):113-116.
XUE Fei, CHEN Jiong, ZHOU Jiancong, et al. Analysis of the finite element of oil-immersed transformer temperature field based on Ansys software[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2015, 31(2):113-116.
- [17] 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.

- SONG You, RUAN Jiangjun, WANG Shanshan, et al. Simulation analysis of thermal property of insulation oil for oil-immersed transformer[J]. Insulating Materials, 2015, 48 (4):21-24.
- [18] 保定天威保变电气股份有限公司[M]. 变压器试验技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
Baoding Tianwei Protect Share Variable Electric Co., Ltd. Transformer test technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003.
- [19] 电力变压器 第1部分:总则:GB 1094.1—2013[S]. 2013.
Power transformers - Part 1:General: GB 1094.1—2013[S]. 2013.
- [20] 电气设备中使用的天然(植物油)酯液体的规范:ASTM D6871—2003[S]. 2003.
Standard specification for natural (vegetable oil) ester fluids used in electrical apparatus: ASTM D6871—2003[S]. 2003.
- [21] 李 剑,姚舒瀚,杜 斌,等.植物绝缘油及其应用研究关键问题分析与展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(2):353-362.
- LI Jian, YAO Shuhan, DU Bin, et al. Analysis to principle problems and future prospect of research on vegetable insulating oils and their applications[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2):353-362.
- [22] 韩金华,陈 奎,项 阳,等. 一种 35 kV 环保新型植物绝缘油变压器[J]. 变压器, 2014, 51(11):18-21.
HAN Jinhua, CHEN Kui, XIANG Yang, et al. A new environmental protection type vegetable insulation oil transformer[J]. Transformer, 2014, 51(11): 18-21.
- [23] 韩金华,韩筛根,王思宝,等. 一种基于高燃点植物绝缘油变压器设计方法[J]. 变压器, 2014, 51(8):38-42.
HAN Jinhua, HAN Shangen, WANG Sibao, et al. Transformer design method based on high ignition point vegetable insulation oil[J]. Transformer, 2014, 51(8):38-42.

何 清(1978—),女,硕士,高级工程师,主要从事绝缘油检测技术研究以及油浸式高压电气设备的故障诊断与分析工作。