

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.02.014

基于氮化铝陶瓷添加的高导热纳米油变压器挂网应用 试验研究

任欢¹, 寇晓适¹, 马伦¹, 赵磊¹, 周远翔², 王琪²

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052; 2. 清华大学电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 通过在变压器油中添加热导率高的氮化铝(AlN)陶瓷纳米颗粒, 可以提高基础油的热导率; 但随着混合油的热导率增大, 其电气性能有所下降。文中选取的添加浓度, 在满足设备电气性能的同时, 也使混合油的导热性能大为提升。文中提出了纳米油变压器实际应用方案, 通过试验研究了纳米油变压器自然负载、低负载运行及过负载运行工况等实际挂网运行性能, 对比研究了纳米粒子的添加对变压器稳态和短时温升提升效果的差异, 研究发现氮化铝纳米陶瓷粒子的添加能够加强变压器内部热量的传导, 提高变压器的散热效率, 但在较低的负荷工况下稳态温升降低幅度小于变压器高负载工况下短时温升的降低幅度。

关键词: 氮化铝; 纳米粒子; 变压器; 油热导率; 温升

Experimental Study on Application of the Transformer with High-thermal-conductivity Oil Added by Nano-AlN Ceramic Particles

REN Huan¹, KOU Xiaokuo¹, MA Lun¹, ZHAO Lei¹, ZHOU Yuanxiang², WANG Qi²

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 2. State Key Laboratory of Power System and Generation Equipment Control and Simulation of Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Adding nano-AlN ceramic particles with high thermal conductivity into basic insulating oil of transformer can improve the oil's thermal conductivity, however, the electrical performance of the transformer decreases with the thermal conductivity. This research selected proper additive concentration to significantly increase the thermal conductivity of the oil without reducing the electrical performance of the equipment. An application scheme was proposed. The transformer with the nano-AlN particles in insulating oil was tested in power network to understand its operation status in the conditions of natural load, low load, and over-load. The effects of the nano-additive on the steady-state temperature rise and short-time temperature rise of the transformer were analyzed comparatively. It was found that addition of the nano-particles could strengthen the heat conduction and improve the heat dissipation in transformer, and the decreasing amplitude of steady-state temperature rise in low load condition of the transformer was smaller than that of short-time temperature rise in over-load condition.

Key words: AlN; nano particle; transformer oil; thermal conductivity; temperature rise

0 引言

变压器油的散热、绝缘性能对变压器的安全运行起着至关重要的作用, 这是变压器运行要解决的首要问题^[1-2]。变压器内部温度的不断升高, 严重威胁变压器运行, 增加变压器过早损坏的风险。而变

压器即使在较高的负载下运行, 如果能将热量及时散发, 保证本体及附件在较低的温度下运行, 不但能弥补变压器过热的寿命损失, 保证变压器运行安全, 同时能够延长其运行寿命^[3-4]。

变压器本体结构比较复杂, 其散热主要由变压器油和其他冷却部件共同完成。对于自然油循环

收稿日期: 2019-09-30; 修回日期: 2019-11-16

基金项目: 国网河南省电力公司2015科研项目(1512)。

Project Supported by State Grid Henan Electric Power Company Technology Project in 2015(1512)。

的变压器,提高变压器的散热能力势必要增大其散热空间,变压器要比现有结构大,这就增加了材料、运输和安装成本。对于强油循环的变压器,提高变压器的散热能力要求提高油的冷却功率并且也要适当增加其散热空间,两者均不利于变压器向节约型和小型化方向发展。

纳米粒子及流体的导热性能研究表明,在基液中添加纳米级固体颗粒后,与基液相比其热导率得到了显著提高,并且选取合适的纳米材料和添加浓度,不仅流体的散热性能得以提升,同时其物理性能和电气性能也能得以优化^[5-18]。

文中通过在变压器油中添加合适浓度的氮化铝陶瓷纳米添加剂,研究挂网运行方案的有效性,挂网运行特性和对变压器实际散热性能的提升效果,为变压器散热性能研究提供了一定借鉴意义。

1 试验方案

1.1 变压器

为排除因变压器结构因素引发的区别,或将变压器结构因素引发的区别降至最低,选取两台同厂家同批次同型号的变压器作为试验用对比变压器,一台无添加(以下简称1号变压器),一台添加纳米粒子(以下简称2号变压器),型号为S11-M-100/10,额定容量100 kVA,额定电压10/0.4 kV,冷却方式为ONAN。

1.2 变压器油

无添加普通变压器油和纳米油采用的基液均属同品牌厂家同批次变压器油,该试验采用上海中孚25号变压器油。随着纳米添加的浓度越高,其混合流体热导率越高,但随着浓度的提高,其电气性能有所下降^[19],因此该试验选取合适的纳米添加浓度进行现场应用试验,经过多次对比试验,当纳米粒子添加质量浓度在0.13%左右时,其热导率提升效果较好,并且其电气性能能够满足入网要求。

试验中要将高浓度的氮化铝纳米陶瓷原液分散入纳米油变压器,常规的做法是用超声分散机将添加剂分散至油中,然后进行充分静置以保证其分散均匀性。但该试验发现利用超声分散机分散颗粒剂时,即使将功率调至小于10 W,也会在变压器油中产生气体杂质,尤其是会产生高温或放电性特征气体乙炔。而产生气体后,如果进行过滤,可能存在因滤芯污染导致纳米粒子在滤芯上的团聚,影响纳米颗粒在油中的浓度配比。

因此该试验在混合合适浓度改性油后,采用机

械搅拌的方式进行纳米粒子分散,之后充分静置,最后取样检测保证指标合格。具体的步骤见图1。

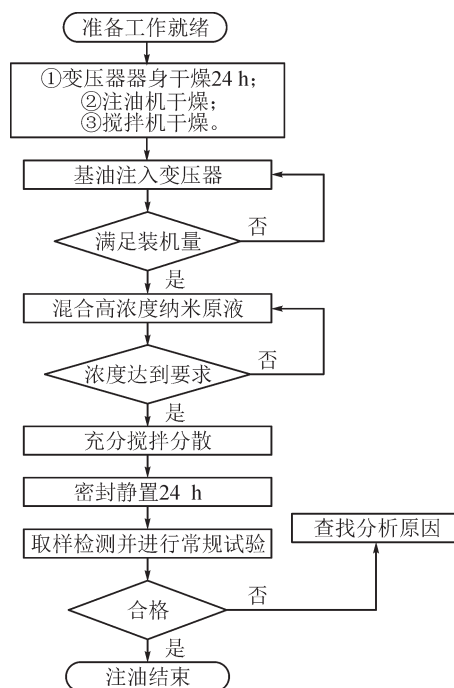


图1 纳米油注油步骤图

Fig. 1 Nano-oil filling procedure

1.3 电气性能试验

变压器油试验合格后,需要对变压器整体进行电气性能试验,主要包括:绝缘电阻测试,交流、感应耐压测试、空载负载损耗测试。1号变压器和2号变压器电气性能试验均符合国标^[20],无击穿,无闪络,结果见表1-3。

表1 普通油和纳米油变压器本体绝缘电阻测试结果

Table 1 Insulating resistance test results of normal oil and nano-oil transformer

参数	数值
环境温度/℃	8
环境湿度/%	58
1号变压器高压绕组对低压及外壳绝缘/MΩ	2 500
1号变压器低压绕组对高压及外壳绝缘/MΩ	2 500
2号变压器高压绕组对低压及外壳绝缘/MΩ	2 500
2号变压器低压绕组对高压及外壳绝缘/MΩ	1 200

如表3所示,两台变压器试验结果均符合国标^[20]规定的空载损耗:标准值0.33 kW,不超过标准值15%;负载损耗试验:标准值2.15 kW,最多不超过标准值的15%,空载负载损耗之和不超过标准值的

表2 普通油和纳米油变压器本体交流、感应耐压测试结果
(两台变压器试验标准一致,均合格)

Table 2 AC and induction withstand voltage test results of normal oil and nano-oil transformer(test standards of both transformers are same and results are qualified)

参数	数值
环境温度/℃	9
环境湿度/%	55
高压交流耐压/[kV·(1 min) ⁻¹]	35
低压交流耐压/[kV·(1 min) ⁻¹]	5
a端感应耐压/[V·(1 min) ⁻¹]	498
b端感应耐压/[V·(1 min) ⁻¹]	497
c端感应耐压/[V·(1 min) ⁻¹]	497

表3 普通油和纳米油变压器本体空、负载损耗测试

Table 3 No-load and load loss test results of normal oil and nano-oil transformer

参数	数值
环境温度/℃	10
环境湿度/%	53
1号变压器空载损耗/kW	0.208
1号变压器负载损耗/kW	1.596
2号变压器空载损耗/kW	0.208
2号变压器负载损耗/kW	1.639

10%,试验合格。

1.4 温升试验

为对比添加纳米油后对变压器稳态温升的影响效果,以及排除变压器本体差异对于温升试验的影响,将其影响降至最低,两台变压器挂网运行前,进行了两次温升试验。

为准确反映变压器内部油温的变化,在变压器本体的上、中、底部分别加装了温度测点,同时对二次电流加装自动采集装置,在试验过程中可监测本体上、中、底部油温变化和电流变化(同时用试验电源系统的电流和电压读数进行对比)。环境温度布点有4个,分别在变压器四周距离器身2 m处,距离地面高度为0.6 m(冷却介质液面一半高度)。变压器温度测点图见图2(图2中尺寸为示意,并非实际比例尺寸)。

温升试验按照国标要求^[20]分为两个阶段,第一阶段施加总损耗,第二阶段施加额定电流。总损耗的值可由已测出的空载损耗和负载损耗之和得到。第1、2次温升试验结果见表4、5。

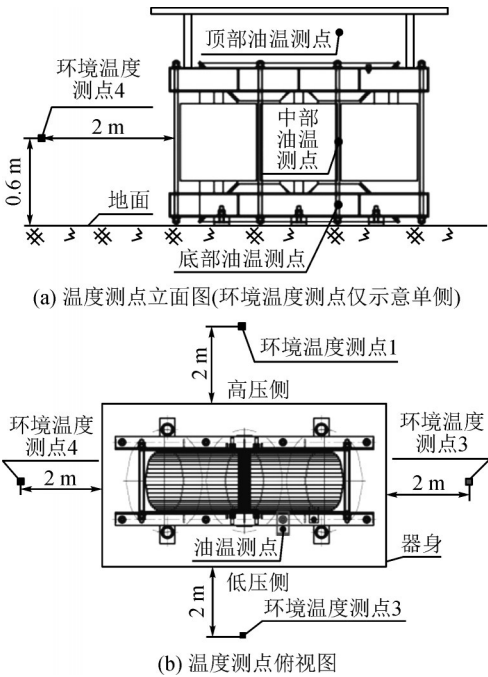


图2 变压器温度测点分别图

Fig. 2 Temperature monitoring distribution of the two transformers

表4 第1次温升试验结果

Table 4 First test results of temperature-rise

参数	1号变压器	2号变压器
环境起始温度/℃	22.0	22.0
环境终止温度/℃	30.0	29.0
环境温度差值/K	8.0	7.0
顶层油温起始温度/℃	23.7	23.4
顶层油温终止温度/℃	82.8	80.7
顶层油温温升/K	52.8	51.7
中层油温起始温度/℃	22.7	22.8
中层油温终止温度/℃	76.1	73.3
中层油温温升/K	46.1	44.3
底层油温起始温度/℃	22.5	22.4
底层油温终止温度/℃	58.0	56.1
底层油温温升/K	28.0	27.1
绕组(铜绕组)低压绕组温升/K	61.4	59.6
绕组(铜绕组)高压绕组温升/K	61.5	60.0

从表4、5可以看出：

- 1)两台变压器顶层油温升和绕组温升均符合国标要求^[21](顶层油温低于60 K,绕组温升低于65 K)。
- 2)两次试验的环境温度差值(即试验开始前温度和试验终止时环境温度之差)基本一致(第1次试验纳米油变压器环境温度差值低于普通油变压器环境温度1℃,第2次试验纳米油变压器环境温度

表5 第2次温升试验结果

Table 5 Second test results of temperature-rise

内容	1号变压器	2号变压器
环境起始温度/℃	8.5	7.0
环境终止温度/℃	11.5	12.3
环境温度差值/K	3.0	5.3
顶层油温起始温度/℃	8.5	10.1
顶层油温终止温度/℃	66.6	64.8
顶层油温温升/K	54.3	53.3
中层油温起始温度/℃	7.9	9.3
中层油温终止温度/℃	60.0	57.3
中层油温温升/K	47.7	45.8
底层油温起始温度/℃	8.0	9.5
底层油温终止温度/℃	42.9	39.9
底层油温温升/K	30.6	28.4
绕组(铜绕组)低压绕组温升/K	54.4	52.9
绕组(铜绕组)高压绕组温升/K	58.8	58.3

差值高于普通油环境温度 2.3 ℃)的情况下,纳米油变压器的顶层油温升和高、低压绕组温升均低于普通油变压器。

1.5 运行台区选取

选取两个基础和环境条件相当的台区,用户 70 户左右,无动力用户;地理位置接近(相距 600 m 左右),周围空间无明显风向遮挡,日照条件基本一致。2 台变压器挂网运见图 3。

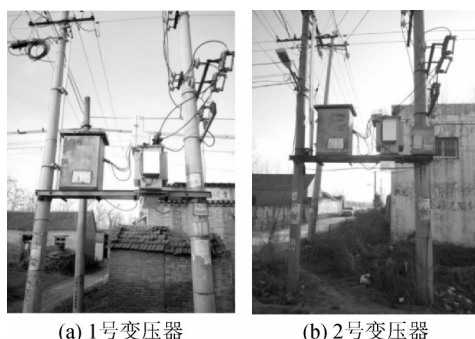


图3 2台变压器挂网运行图

Fig. 3 Practical two transformers in service

1.6 运行期间监测方案

两台变压器运行期间的监测包括周围环境监测、变压器负荷数据监测、油温监测以及不同运行时间段油样的测试 4 个部分。

1)环境监测包括对变压器周围环境温度、湿度、风向的定时监测,由人工完成,仪器采用表盘式温湿度计、手持式风速计。

2)负荷监测(监测运行电压、电流信号)和油温监测由预置入变压器内部的传感器采集信号,并且用短信方式上传至后台计算机,进行自动采样保存,

期间每 5 min 采集 1 组数据,1 h 12 组数据,24 h 采集 288 组数据。

3)变压器油样在投入运行 24 h 后,30 天、90 天、390 天挂网试验结束后分别取样试验。

1.7 负荷测试方案

由上述温升试验数据来看,虽然纳米油较普通油变压器温升有所降低,但降低的幅度较小,为考察纳米油变压器实际应用特性,还需进行挂网运行的自然负载、较低负载和过负载工况试验。

自然负载工况试验指变压器挂网运行后,进行冬、夏季及农忙期间的自然负荷冲击考验,考察其耐受效果,运行情况以及期间的负荷—温度特性。

较低负载和过负载工况试验指经过人工干预,在相同的低负载和过负载下,变压器低于或超过其额定条件运行,对比考核其耐受效果和负荷—温度特性。实际测试时,应保证过负载度满足测试要求、试验的负载可调以及三相负载的平衡,否则,不仅试验达不到预期要求,同时会因为三相负荷不平衡导致变压器损坏。

为此,该试验采用在自然负荷基础上增加外接单相负载的方法,进行负荷调节和三相负荷的平衡。其接线原理见图 4。单相负载实际运行图见图 5。

变压器低压侧 380/220 V 电源

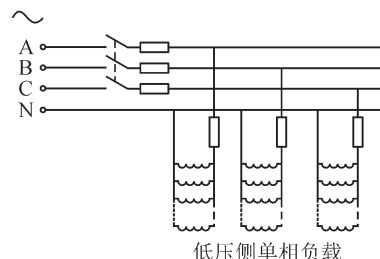


图4 负荷测试接线原理图

Fig. 4 Principle of load test

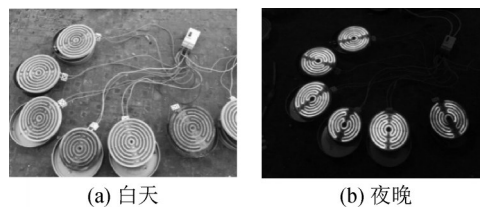


图5 单相负载实际运行图

Fig. 5 Practical one-phase load in service

2 应用性能分析

2.1 变压器运行稳定性

纳米油变压器在运行期间无任何故障发生,将两台对比变压器不同运行时间油样进行取样分析,数据见表 6-9。

表6 击穿电压、电阻率、介电损耗测试结果
Table 6 Test results of breakdown voltage, resistivity and dielectric loss

运行时间	测试项目	1号变压器	2号变压器
投运前		62.4	57.7
1天	击穿电压(国家	62.4	57.7
7天	标准 ^[22] 规定运行	61.3	56.3
90天	中>30 kV)/kV	52.1	56.0
390天大负荷后		50.8	53.6
投运前	电阻率(国家	563.0	73.0
1天	标准 ^[22] 规定运	187.0	—
90天	行中>5 GΩ·m)/	107.3	103.5
390天大负荷后	(GΩ·m)	108.9	99.5
0天	介质损耗(国家	0.002 4	0.014 0
1天	标准 ^[22] 规定运行	0.011 9	—
90天	中<0.04)	0.062 0	0.011 0
390天大负荷后		0.096 0	0.105 0

表7 运行30天后变压器油色谱分析结果
Table 7 Test results of chromatographic analysis of the two transformers after 30 days in service

类别	1号变压器/(μL·L ⁻¹)	2号变压器/(μL·L ⁻¹)
CH ₄	1.41	1.54
C ₂ H ₄	0.14	0.12
C ₂ H ₆	0.15	0.14
C ₂ H ₂	0.00	0.00
H ₂	0.00	0.00
CO	14.73	12.96
CO ₂	358.69	310.83
总烃	1.70	1.80

表8 运行90天后变压器油色谱分析结果
Table 8 Test results of chromatographic analysis of the two transformers after 90 days in service

类别	1号变压器/(μL·L ⁻¹)	2号变压器/(μL·L ⁻¹)
CH ₄	1.42	1.61
C ₂ H ₄	0.15	0.13
C ₂ H ₆	0.15	0.16
C ₂ H ₂	0.00	0.00
H ₂	0.00	0.00
CO	14.93	14.17
CO ₂	361.46	321.52
总烃	1.80	2.00

从表6-9可以看出,运行期间普通油变压器击穿电压、电阻率下降(介质损耗升高)的幅度高于纳米油变压器;色谱数据正常^[23],无明显差异,因此,纳米粒子的添加,对变压器油本身的质量维持有好的推动,并且该试验中纳米油长期运行稳定性优于对

表9 过负荷(运行390天)后变压器油色谱分析结果
Table 9 Test results of chromatographic analysis of the two transformers after over-load (390 days) in service

类别	1号变压器/(μL·L ⁻¹)	2号变压器/(μL·L ⁻¹)
CH ₄	10.86	15.23
C ₂ H ₄	30.05	46.05
C ₂ H ₆	7.50	5.37
C ₂ H ₂	0.00	0.00
H ₂	40.50	30.25
CO	113.89	87.66
CO ₂	407.32	453.70
总烃	48.40	66.65

比的普通油。

2.2 自然负载运行状况

2.2.1 典型月负荷,油温变化

选取春节所在典型月两台变压器负荷油温数据见图6-8。从图6-8可以看出,监测期间纳米油变压器的自然负荷高于普通油变压器,平均负荷比普通油变压器高约8 kW左右;两台变压器顶层油温最高,中层次之,底层油温最低。

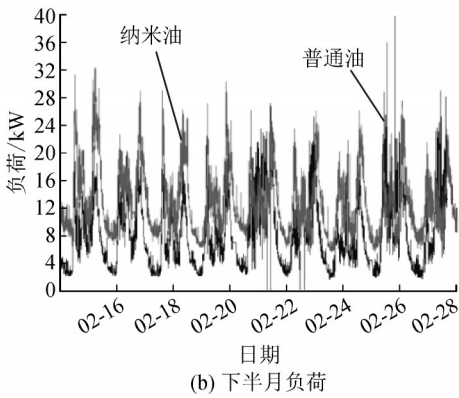
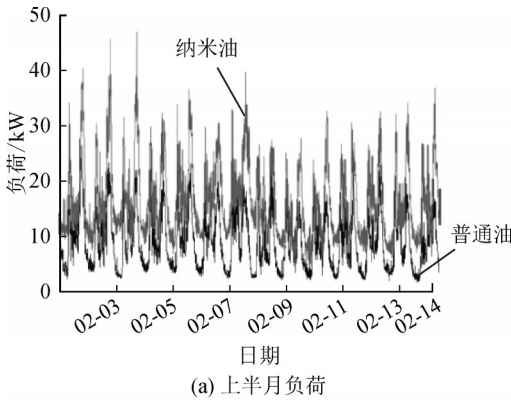


图6 典型月普通油变压器和纳米油负荷图

Fig. 6 Load of the two transformers in typical month

2.2.2 油温差变化

取不同位置油温差数据进行分析,见图9。从图9可见,在纳米油变压器负荷基本高于普通油变压器期间,纳米油变压器顶层与中层油温之差一直

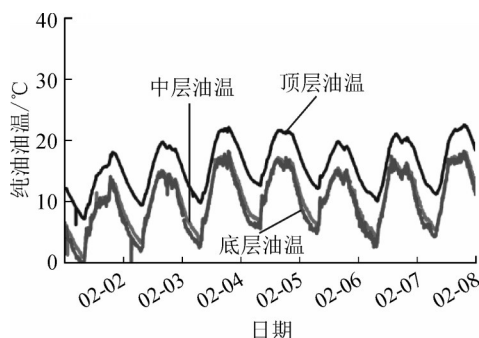


图7 普通油变压器顶层、中层、底层油温变化图

Fig. 7 Top, middle and bottom temperature curves of the ordinary transformer

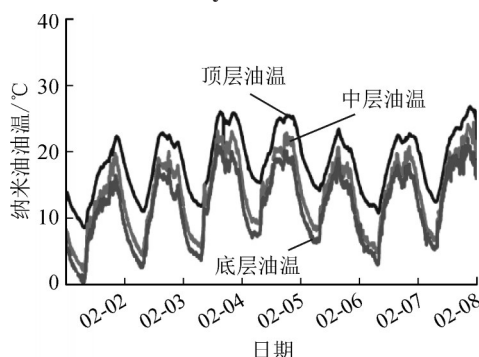
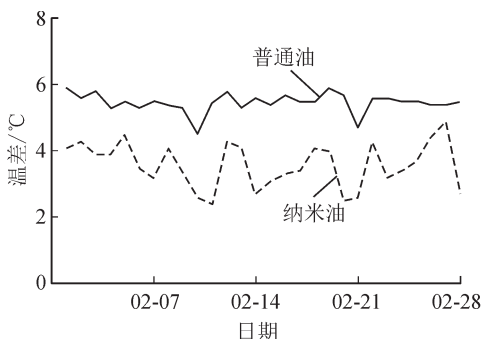


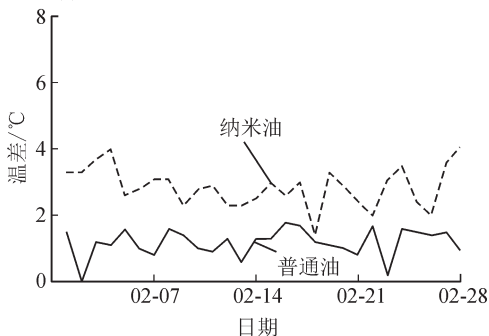
图8 纳米油变压器顶层、中层、底层油温变化图

Fig. 8 Top, middle and bottom temperature curves of the nano-oil transformer

低于普通油变压器,中层和底层油温之差高于普通油变压器,这充分说明纳米油能将中部绕组散发的热量更好地向顶层疏导。



(a) 日温度最高时段顶层与中层油温之差



(b) 日温度最高时段中层与底层油温之差

图9 日温度最高时段不同位置油温差(自然负载)

Fig. 9 Different oil temperature of different position through maximum daily temperature

2.3 较低运行负载工况

在0.6倍额定负荷下,试验期间负荷约60 kW,加负荷时间约为2个小时。两台变压器0.6倍额定负荷图见图10。

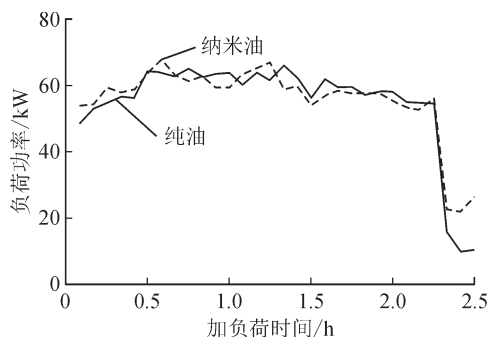
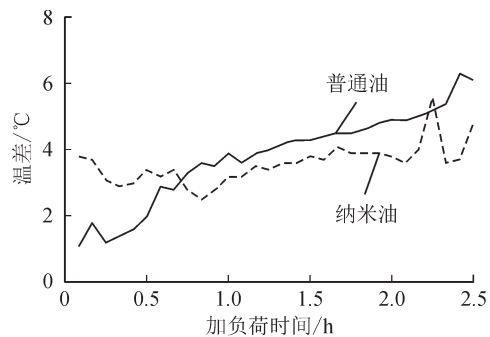


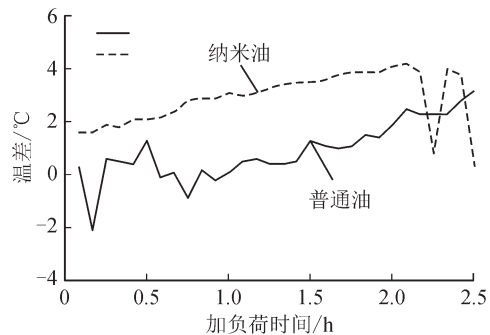
图10 2台变压器0.6倍额定负荷图

Fig. 10 0.6 times rated load curves of the two transformers

加负荷2 h后,油温差变化同2.2.2节一样,见图11。



(a) 顶层与中层油温之差



(b) 中层与底层油温之差

图11 不同位置油温差(0.6倍额定负载)

Fig. 11 Different oil temperature of different position after 0.6 times rated load

加负荷2 h后,纳米油变压器和普通油变压器的温升数据见表10。

2.4 过负载运行工况

过负载试验将负载提升到1.0~1.2倍额定负载,时间持续4 h左右,期间两台变压器油温差、油温变化见图12、13。由图12可见,与自然和较低负载的油温差变化趋势不同,过载4 h后,纳米油变压器顶层与中层油温之差,以及中层与底层油温之差均低于普通油变压器,这是由于变压器运行时,其

表 10 0.6 倍额定负载后普通油变压器和纳米油变压器温升
Table 10 Temperature-rise of the two transformers after 0.6 times of rated-load

位置	1 号变压器	2 号变压器	温升降低 值/℃	降低百分 比/%
	短时温 升/℃	短时温 升/℃		
顶部	13	7	5	38.5
中部	9	5	4	44.4
底部	7	4	3	42.9

温度最高点大致在绕组的中部偏上处,较低负载时,纳米油导热优势发挥不明显,只有离最热点较近的顶层油温有所降低,而较远的底层油温并没有很快降低;而较高负载时,纳米油的导热优势发挥较好,此时中部的热量同时向顶部和底部很快疏导。

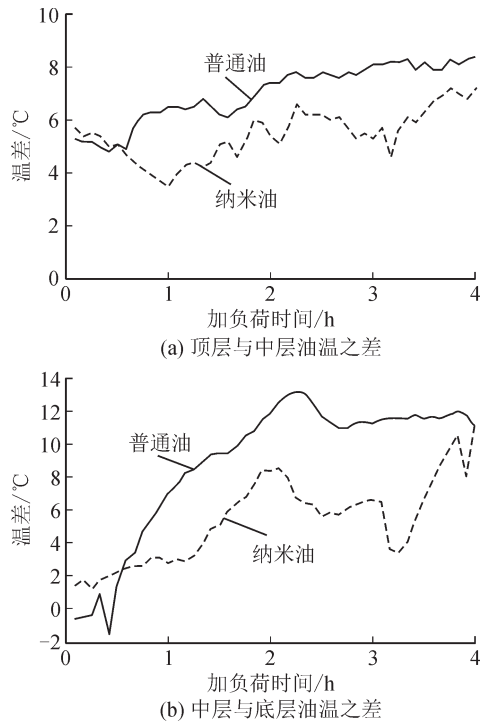


图 12 2 台变压器不同位置油温之差
Fig. 12 Different oil temperature of different position after over load

加压开始前,纳米油变压器的顶层和中层油温要比普通油高出约 5℃左右,这是由于试验前两台变压器所在台区自然用电负荷差异导致的。加 4 h 负载后,两台变压器的温升数据见表 11,纳米油较普通油变压器温升降低值和幅度均大。

3 结论

对氮化铝陶瓷纳米油变压器的实际应用试验研究,发现:

1)文中提出的现场应用方案能够对比两台变压器的温升差异,对纳米油变压器运行性能研究具有

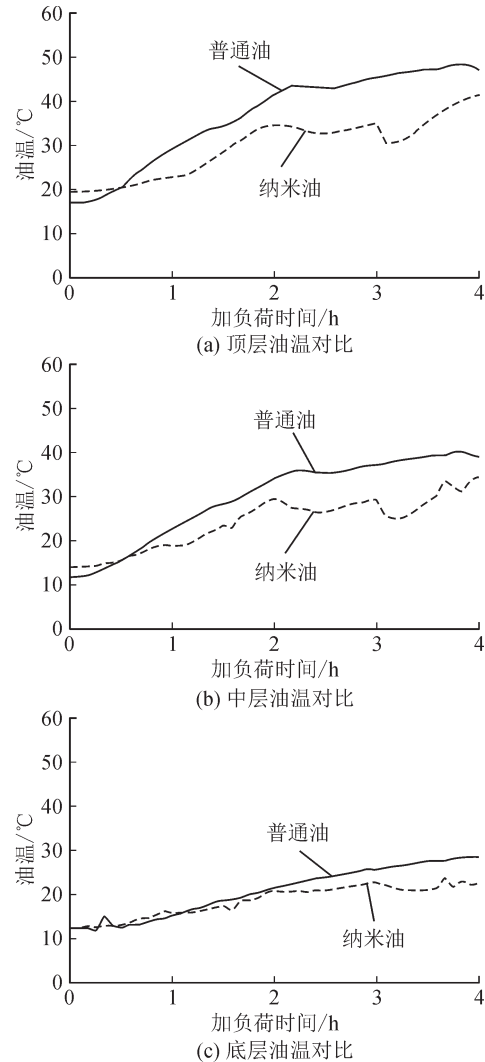


图 13 2 台变压器不同位置的油温变化图
Fig. 13 Oil temperature curves of the two transformers in different position after over load

表 11 过负荷时普通油变压器和纳米油变压器温升
Table 11 Temperature-rise of the two transformers after over-load

位置	1 号变压器	2 号变压器	温升降低 值/℃	降低百分 比/%
	短时温升/℃	短时温升/℃		
顶部	32	18	15	46.9
中部	28	16	12	42.9
底部	12	7	5	41.7

实际适用性和有效性。
2)在该试验添加的浓度下,纳米油变压器可以正常运行,无运行故障发生,并且纳米油表现出比无添加普通油更好的质量维持特性。
3)在近似负载条件和运行工况下,氮化铝纳米陶瓷粒子的添加能够降低变压器油温和绕组热点附近温度,加强变压器内部热量的传导,提高变压器的散热效率,但在较低的负荷工况下稳态温升降低幅度小于变压器高负载工况下短时温升的降低

幅度。

参考文献:

- [1] 缪金,董明,吴雪舟,等. 纳米改性变压器油研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 146-154.
MIAO Jin, DONG Ming, WU Xuezhou, et al. Reviews on transformer oil - based nanofluids[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9): 146-154.
- [2] 韦国,刘继午,彭佳,等. 纳米改性变压器油的击穿及油纸复合绝缘频率响应特性[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 3082-3087.
WEI Guo, LIU Jiwu, PENG Jia, et al. Transformer oil breakdown and dielectric frequency response characteristic of oil-paper insulation modified by nanoparticles[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 3082-3087.
- [3] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 76-77.
ZHAO Zhida. High voltage engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999: 76-77.
- [4] 油浸式变压器绝缘老化判断导则: DL/T 984—2005[S]. 2005.
Guide for the diagnosis of insulation aging in oil-immersed power transformer: DL/T 984—2005[S]. 2005.
- [5] 周远翔,寇晓适,杨颖,等. 纳米改性变压器油制备与绝缘特性研究现状[J]. 绝缘材料, 2016, 49(11): 26-35.
ZHOU Yuanxiang, KOU Xiaokuo, YANG Ying, et al. Research status on synthesis and insulating properties of nano - modified transformer oil[J]. Insulating Materials, 2016, 49(11): 26-35.
- [6] 秦明礼,曲选辉,林健凉,等. 氮化铝陶瓷研究和发展[J]. 稀有金属材料与工程, 2002, 31(1): 8-12.
QIN Mingli, QU Xuanhui, LIN Jianliang, et al. Reviews and research on AlN ceramic[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002, 31(1): 8-12.
- [7] CHOI U S. Development and applications of non-newtonian-flows[M]. New York: Asme Publication, 1995: 99-105.
- [8] 沈凉平. 纳米改性变压器油的制备及其特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
SHEN Liangping. Research on the nano-modified transformer oil's preparation and characterization[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- [9] CHOI C, YOO H, OH J. Preparation and heat transfer properties of nanoparticle in transformer oil dispersions as advanced energy-efficient colants[J]. Current Applied Physics, 2008, 8(6): 710-712.
- [10] 周远翔,王云杉,田冀焕,等. 纳米改性变压器油的破坏特性[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1155-1159.
ZHOU Yuanxiang, WANG Yunshan, TIAN Jihuan, et al. Breakdown characteristics in transformer oil modified by nanoparticles[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1155-1159.
- [11] GEORGE J, MARKUS Z, FRANCIS M, et al. Effects of nanoparticle charging on streamer development in transformer oil - based nanofluids[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(1): 14-31.
- [12] KEBLINSKI P, PHILLIPS S R, CHOI S U, et al. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids) [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(4): 855-863.
- [13] 杜岳凡,吕玉珍,李成榕,等. 半导体纳米粒子改性变压器油的绝缘性能及机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 177-182.
DU Yuefan, LYU Yuzhen, LI Chengrong, et al. Insulating property and mechanism of semiconducting nanoparticles modified transformer oils[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(10): 177-182.
- [14] SEGAL V, HJORTSBERG A, RABINOVICH A, et al. AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nano particles[C]// IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Arlington, VA, USA: IEEE, 1998: 619-622.
- [15] HWANG J G, ZAHN M, OSULLIVAN F M, et al. Effects of nanoparticle charging on streamer development in transformer oil-based nanofluids[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(1): 14310-14317.
- [16] 缪金,董明,温福新,等. ZnO纳米颗粒改性变压器油介质损耗模型研究[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(2): 50-55.
MIAO Jin, DONG Ming, WEN Fuxin, et al. Dielectric loss model of transformer oil - based nanofluids with ZnO nanoparticles[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(2): 50-55.
- [17] DU Yuefan, LU Yuzhen, LI Chengrong, et al. Effect of semi-conductive nanoparticles on insulating performances of transformer oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 770-776.
- [18] 曹晓珑,徐曼,刘春涛. 纳米添加剂对聚合物击穿性能的影响[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 8-12.
CAO Xiaolong, XU Man, LIU Chuntao. Influence on breakdown property of polymer with nano - additive[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2): 8-12.
- [19] 寇晓适,任欢,宋伟,等. 基于AlN纳米粒子改性的纳米变压器油雷电冲击特性研究[J]. 绝缘材料, 2016, 49(9): 72-76.
KOU Xiaokuo, REN Huan, SONG Wei, et al. Study on lightning impulse characteristics of transformer oil modified by AlN nanoparticles[J]. Insulating Materials, 2016, 49(9): 72-76.

(下转第107页)

- [15] 李 琥,周海洋,施 围. 断路器合闸电阻对变压器励磁涌流的影响[J]. 高压电器,2003,39(1):16-18.
LI Hu,ZHOU Haiyang,SHI Wei. Effect of closing resistor inside circuit breaker on inrush current of transformer[J]. High Voltage Apparatus,2003,39(1): 16-18.
- [16] 陈川江,方春恩,曾俊龙,等. 计及剩磁的空载变压器选相合闸研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(16):82-88.
CHEN Chuanjiang,FANG Chun'en,ZENG Junlong, et al. Research on unloaded transformer controlled switching considering residual flux[J]. Power System Protection and Control,2018,46(16):82-88.
- [17] 周 波,常晓青,张 华,等. 计及剩磁,合闸电阻及选相合闸策略的励磁涌流仿真评估方法[J]. 四川电力技术,2018 41(6):37-40.
ZHOU Bo,CHANG Xiaoqing,ZHANG Hua, et al. Evaluation method for inrush current simulation considering residual flux, closing resistance and phase-controlled switching strategy[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2018, 41 (6):37-40.
- [18] JILES D C,ATHERTON D L. Theory of ferromagnetic hysteresis[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1986,61(1/2):48-60.
- [19] JILES D C,THOELKE J B,DEVINE M K. Numerical determination of hysteresis parameters for the modeling of magnetic-properties using the theory of ferromagnetic hysteresis[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1992,28(1):27-35.
- [20] ANNAKKAGE U D, MCLAREN P G, DIRKS E, et al. A current transformer model based on the Jiles - Atherton theory of ferromagnetic hysteresis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2000,15(1):57-61.
- [21] 王 洋. 变压器铁心剩磁预测研究[D]. 济南:山东大学,2017.
WANG Yang. Research on residual flux prediction of the transformer[D]. Jinan:Shandong University,2017.

王 伟(1983—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力设备状态评价与故障诊断。

魏菊芳(1985—),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力设备状态与故障诊断。

方 琼(1978—),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力设备状态与故障诊断。

刘力卿(1987—),男,博士,工程师,研究方向为电力设备状态评价与故障诊断。

何思名(1997—),男,硕士研究生,研究方向为变压器电磁理论。

关永刚(1974—),男,研究员,研究方向为高压电器与电磁暂态技术。

邹 军(1971—),男,教授,研究方向为电磁场理论及应用、电力系统电磁兼容(通讯作者)。

(上接第100页)

- [20] 电力变压器试验导则:JB/T 501—2006[S].2006.
Test guide for power transformers: JB/T 501—2006[S]. 2006.
- [21] 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.
- [22] 运行中变压器油质量:GB/T 7595—2008[S].2008.
Quality of transformer oils in service: GB/T 7595—2008 [S].2008.
- [23] 变压器油中溶解气体分析和判断导则:DL/T 722—2014 [S].2014.
Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil:DL/T 722—2014[S].2014.

任 欢(1983—),女,工学硕士,高级工程师,现主要从事高电压试验技术、变压器及故障分析方面的研究工作。