

# 电力变压器热稳定性能试验与状态监测 分析与研究

毛建辉, 周建锋

衢州职业技术学院, 浙江 衢州  
Email: qzct99@126.com

收稿日期: 2020年10月9日; 录用日期: 2020年10月21日; 发布日期: 2020年10月28日

## 摘 要

电力系统是由发电厂、送变电线路、供配电所和用电等环节组成的电能生产与消费系统, 在变压器事故当中造成人员伤亡或其他重大灾害损失的以油浸式变压器为大部分, 其中油浸式变压器内部的电器绝缘油是造成事故发生的原因之一。本文通过分析温度对于油浸式变压器事故影响的相关文献, 探讨温度对于油浸式变压器内的电器绝缘油造成绝缘劣化而导致油浸式变压器火警事故发生, 借由使用微差扫描热卡计(DSC)和热重量分析仪(TG)进行分析, 提供实验设定温度数据。经由恒温加热观察电器绝缘油在设定温度之下重量损失变化, 再由电力耐压试验分析经过恒温加热电器的绝缘油其绝缘能力是否随温度的增加而有降低的趋势。实验结果显示电器绝缘的油绝缘能力会随着温度上升而上升, 但达到高温时会产生绝缘劣化, 因此轻则造成油浸式变压器事故或油浸式变压器起火危害发生, 重则造成电力系统失效导致经济损失等重大灾害。因此研究内相关实验数据可作为油浸式变压器使用上安全应用及操作依据的参考, 并期待未来可针对油浸式变压器事故造成电器绝缘油起火事故进行预防且有效降低发生机率。

## 关键词

变压器, 绝缘油, 热稳定性, 热重损失, 绝缘

# Research on Thermal Stability Testing and Condition Monitoring Analysis of Oil-Immersed Transformer

Jianhui Mao, Jianfeng Zhou

Quzhou College of Technology, Quzhou Zhejiang  
Email: qzct99@126.com

## Abstract

The power system is an electric energy production and consumption system composed of power plants, transmission and transformation lines, power supply and distribution stations, and electricity consumption. In the transformer accident, the oil-immersed transformer is the majority. Among them, the power insulating oil inside the oil-immersed transformer is one of the causes of the accident. This study collects relevant literatures on the influence of temperature on oil-immersed transformer accidents at home and abroad, and explores the insulation deterioration caused by temperature on the power insulating oil in oil-immersed transformers, which leads to the occurrence of oil-immersed transformer fire accidents. The experimental set temperature data is analyzed and provided using differential scanning calorimeter (DSC) and thermogravimetric analyzer (TG). The weight loss of electrical insulating oil under the set temperature is observed using constant temperature heating. Whether the insulating ability of the insulating oil of constant temperature heating electrical appliances has a tendency to decrease with the increase of temperature by the electric withstand voltage test. Experimental results show that the insulation capacity of power insulating oil will increase as the temperature rises, but insulation degradation will occur when the temperature reaches a high temperature. Therefore, it may cause accidents or fire hazards of oil-immersed transformers, and electricity system failure causes major disasters such as economic losses. Therefore, the relevant experimental data in the study can be used as a reference for the safety application and operation basis of oil-immersed transformers, and it is hoped that in the future, oil-immersed transformer accidents can prevent electric insulating oil fire accidents and effectively reduce the probability of occurrence.

## Keywords

Transformer, Insulating Oil, Thermal Stability, Thermal Weight Loss, Insulation

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着全球经济的增长及环境的变迁, 人类对电力的需求与日俱增, 为了满足大量的电能需求, 并维持合理的线路损失, 输电系统正不断地朝高电压、且大容量的方向发展。此外, 对于供电的可靠度要求, 亦因为产业形态与生活质量的提高, 有越来越高的趋势。基于此, 各种电力设备的安全运行, 俨然成为影响电力系统安全、稳定与经济运行的重要因素。输电系统变压器设备主要由绕组及铁心等金属材料 and 绝缘材料所组成, 其绝缘系统对设备的运行肩负重要的保护与隔离作用, 然而绝缘系统在设备运转过程中, 长期受到电、温度、机械应力及化学反应等的交互作用, 不可避免地将逐渐产生绝缘性能的劣化, 同时在系统的薄弱环节处亦可能会出现导致绝缘的缺陷, 此时如果不能及时发现, 并采取适当的修复措施, 则缺陷可能不断发展而扩大, 甚而引发设备绝缘击穿事故, 如此不仅给用户带来重大的经济损失, 且亦可能破坏整个电力系统的稳定运转。近几十年来国际上发生过几次大型电力网络的重大停电事故, 许多即为输电系统事故所引起, 其对国家经济确实造成了巨大的损失, 可见提高输电设备的运行可靠度对电力系统的稳定运行具有很大的作用。对于维持变压器的正常运行所需的

维护保养工作,国际上在早期是于发生事故后才进行修护工作,后来为了预防此类突发性的事故,而更改为于固定时间周期即进行维护工作,我国目前的输电系统变压器大多采用此种定期维修制。定期检测并施作相关的试验,对于发现设备缺陷及减少事故的发生,确实能发挥一定的作用,然而没有充分考虑设备实际运转状态,亦可能对设备进行了超量的检测,如此不但造成了人力及物力的浪费,同时,随着电压等级的提高、设备容量的增大,也可能暴露出一些定期检测的问题[1] [2] [3],诸如 1) 预防性试验周期的规定通常为固定时间,有时能及时发现变压器设备绝缘的劣化。2) 输电系统变压器的例行性试验电压通常不会太高,且检测时间亦不会太长,有时亦难以真实反映运行状态下的设备绝缘状况。3) 对于无人值班的一二次及配电变电所,需有额外人力施行测量工作。国内外学者对变压器热稳定做了大量研究,于佰鑫等人[4]推导了变压器突发短路工况后短路电流的全电流及其稳态分量作用下绕组平均温度的计算公式,并进行了实例计算,同时将所求得温度与标准中的温度进行对比,得出短路电流持续时间、稳态短路电流倍数与绕组温升之间的变化规律。杨贤等人[5]阐述了基于热稳定性能的主变压器油纸电容式套管介质损耗异常诊断方法。通过热稳定性能试验,获取套管介质损耗随温度变化的规律;依据套管热稳定性能理论,诊断套管介损异常原因。该方法对于绝缘介质受潮缺陷诊断的有效性得到了验证。综上所述,定期维修制在故障预警及检测上,仍然无法很有效地防止事故的发生。本研究针对油浸式变压器内部电器绝缘油对于温度的热稳定性,积极寻找电器绝缘油安全使用的依据,并减少由此带来的危害。

## 2. 实验设备与方法

### 2.1. 试样

本实验所使用的电器绝缘油为道达尔石油集团旗下的分公司道达尔润滑油股份有限公司制造,电器绝缘油型号为 ISOVOLTINE II-TP,而为避免与空气及阳光长时间接触影响电器绝缘油质量,将电器绝缘油储存于密闭容器中并放置于通风良好的阴凉处保存。

### 2.2. 实验设备

#### 2.2.1. 微电子天秤

该仪器的最小读值为 0.1 mg,最大读值为 220 g,稳定时间 1.5 秒,用来测量微差扫描热卡计(Differential Scanning Calorimetry, DSC)及热重量分析仪(Thermogravimetry, TG)试验电器绝缘油的重量[6] [7]。

#### 2.2.2. 电子天秤

该仪器的最小读值为 0.01 g,最大读值为 400 g,稳定时间 1.5 秒,分用来测量 50 g 及 100 g 电器绝缘油在恒温加热实验前试与恒温加热实验后试验电器绝缘油样品的重量,并记录。

#### 2.2.3. TG 分析

借由 TG,将电器绝缘油放置于特定气氛之下改变其温度环境或是维持在一个固定温度之下,观察电器绝缘油重量的改变情况,可以分析出数据用来推断电器绝缘油的特性与组成。在 TG 当中最重要的两大组件分别为温度控制系统以及重量测量组件[8] [9]。

#### 2.2.4. DSC 分析

本研究使用 DSC 搭配热分析软件,对电器绝缘油持续稳定进行升温期间同时扫描分析,推测受测物体的吸热反应与放热反应情形。DSC 是以热流式为主,使用于微量的测量试样热量变化与温度的关系。本实验中使用 DSC 掌握受测物质能量变化,因 DSC 可测量受测物体与空白样本之间的差异温度,绘制为热谱图表示[10] [11]。

### 2.2.5. 烘箱

本研究使用恒温加热试验, 为了解在不同加热温度之下对电器绝缘油的影响与变化, 在重量的部分将电器绝缘油分成 50 g 及 100 g, 在温度的部分分成 50℃、100℃、150℃、160℃及 180℃, 恒温加热时间为 8 小时, 观察温度对不同重量电器绝缘油的重量损失率以及颜色是否的变化[12] [13]。

### 2.2.6. 电力耐压试验器

在本研究中试验在不同温度之下加热过后的电器绝缘油(50℃、100℃、150℃、160℃及 180℃)进行不同升压速率的耐压试验, 依照仪器上所标示的升压速率 500、2000 及 3000 VPS 执行耐压试验(VPS 表示每秒所加压的电压), 各别将不同升压速率的耐压试验重复试验至少五次并且纪录数据, 以求得平均值, 使实验数据分析结果后更能符合实际情况并加以分析归纳至结果讨论[14] [15]。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. TG 分析

TG 是用于观察电器绝缘油在特定温度条件之下的重量变化情况的仪器, 图 1 是以电器绝缘油于 4 个不同的升温速率之下(分别为 1.0、2.0、4.0 及 8.0)所做的实验结果, 图 1 为温度对重量损失的 TG 图, 由图可以观察出电器绝缘油的  $T_0$  平均值大约为 126℃。除此之外随着升温速率的提高, 质量损失的  $T_0$ 、 $T_p$  及  $T_f$  也呈现出延迟的现象, 此为典型 TG 实验结果。

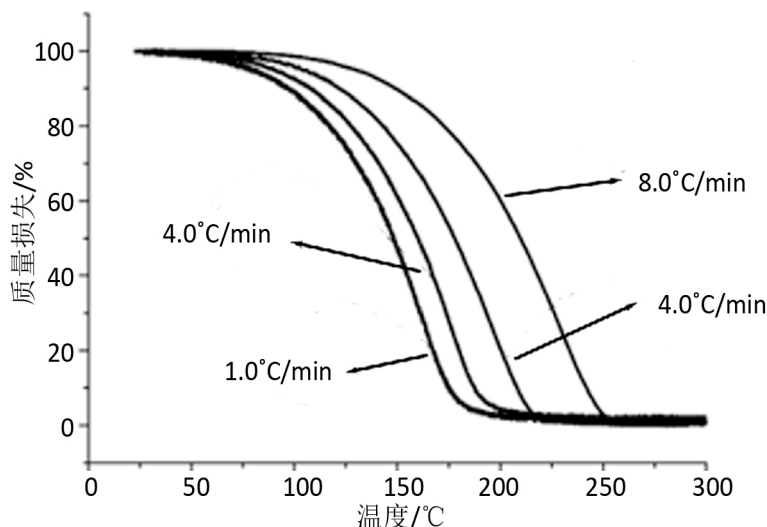
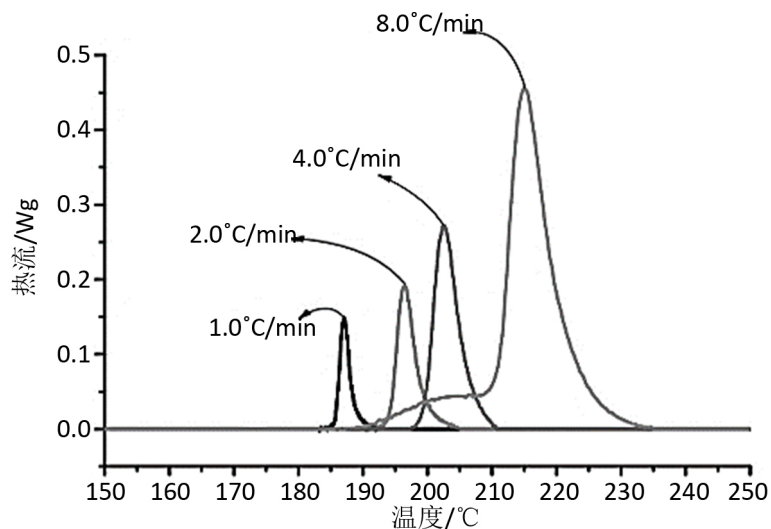


Figure 1. TG testing curve diagram of power insulating oil at heating rate 1.0°C/min, 2.0°C/min, 4.0°C/min and 8.0°C/min

图 1. 电器绝缘油于升温速率 1.0°C/min、2.0°C/min、4.0°C/min 及 8.0°C/min 下的 TG 测试曲线图

### 3.2. DSC 分析

借由 DSC 分析功能来进行不同的升温速率(1.0°C/min、2.0°C/min、4.0°C/min 及 8.0°C/min)实验, 通过 DSC 来观察于非恒温条件下电器绝缘油的放热反应特性, 图 2 电器绝缘油于升温速率 1.0°C/min、2.0°C/min、4.0°C/min 及 8.0°C/min 之下 TG 测试热谱图, 从图中可以观察到有一个放热波峰的产生, 这个放热波峰会跟随着升温速率的提高而向后平移的现象, 而最大放热量也跟随着升温速率提高而增加, 由此现象可以发现电器绝缘油于升温速率越快的情况之下, 危害也会跟着提高[16] [17]。

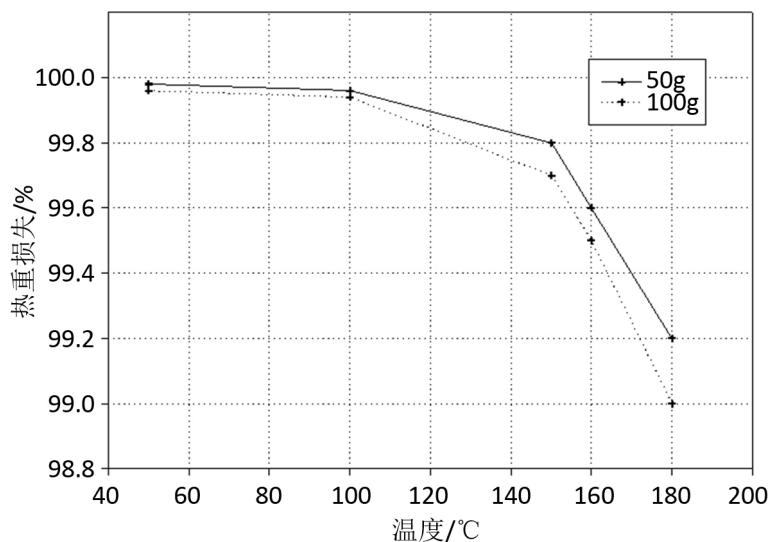


**Figure 2.** DSC testing thermogram of power insulating oil at heating rates of 1.0°C/min, 2.0°C/min, 4.0°C/min and 8.0°C/min

**图 2.** 电器绝缘油于升温速率 1.0°C/min、2.0°C/min、4.0°C/min 及 8.0°C/min 下的 DSC 测试热谱图

### 3.3. 电器绝缘油恒温加热试验分析

在恒温加热试验的数据与曲线图, 图 3, 可以观察到电器绝缘油在恒温加热温度 50°C 及 100°C 之间的热重损失都是低于 0.1%, 在 150°C 时热重损失超过 0.5%, 而 180°C 时更是 160°C 的热重损失的倍数成长, 因此由此数据推测出 150°C 过后电器绝缘油的热重损失会呈现得相当明显。



**Figure 3.** The weight loss curve of electric insulating oil at constant heating temperature of 50°C, 100°C, 150°C, 160°C and 180°C

**图 3.** 电器绝缘油于恒温加热温度 50°C、100°C、150°C、160°C 及 180°C 重量损失曲线图

### 3.4. 电器绝缘油耐压试验分析

在耐压试验分别采用不同的升压速率(500、2000 及 3000 VPS)来进行电器绝缘油绝缘能力强度检测,

分析温度对于电器绝缘油的影响[18] [19] [20]。

在升压速 500 VPS 的试验数据中, 平均击穿电压分别为 17.2、21.3、28.4、34.5、27.4 及  $21.6 \times 10^3$  V, 可以发现在升压速率 500 VPS 之下以无加热、150℃及 180℃来看绝缘耐压能力从一开始仅有  $17.2 \times 10^3$  V 随着温度的上升绝缘耐压能力也一并上升, 到了 150℃达到最高值  $35.0 \times 10^3$  V 之后开始绝缘耐压能力随着温度上升也开始呈现劣化的趋势在 180℃时下降至  $21.0 \times 10^3$  V 由此推测 150℃过后绝缘能力将渐渐的劣化, 其 500 VPS 曲线图如图 4 所示。

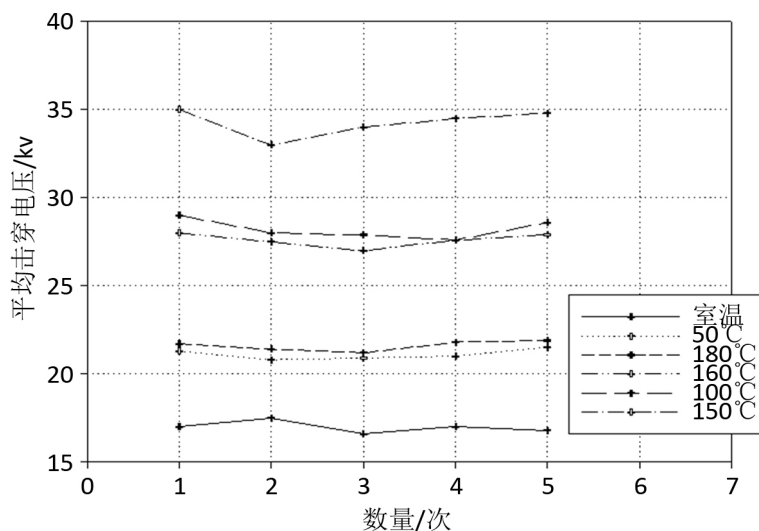


Figure 4. The withstand voltage testing curve of power insulating oil at a boost rate of 500 VPS

图 4. 电器绝缘油于升压速率 500 VPS 下的耐压测试曲线图

在升压速率 2000 VPS 的试验数据中, 平均击穿电压分别为 19.5、24.2、31.3、37.5、29.3 及  $24.4 \times 10^3$  V, 可以发现在升压速率 2000 VPS 与 500 VPS 相比较之下以无加热、150℃及 180℃来看绝缘耐压能力有些微的上升现象, 在 150℃过后的绝缘耐压能力劣化程度相比较之下有些许的较缓慢, 其 2000 VPS 曲线图如图 5 所示。

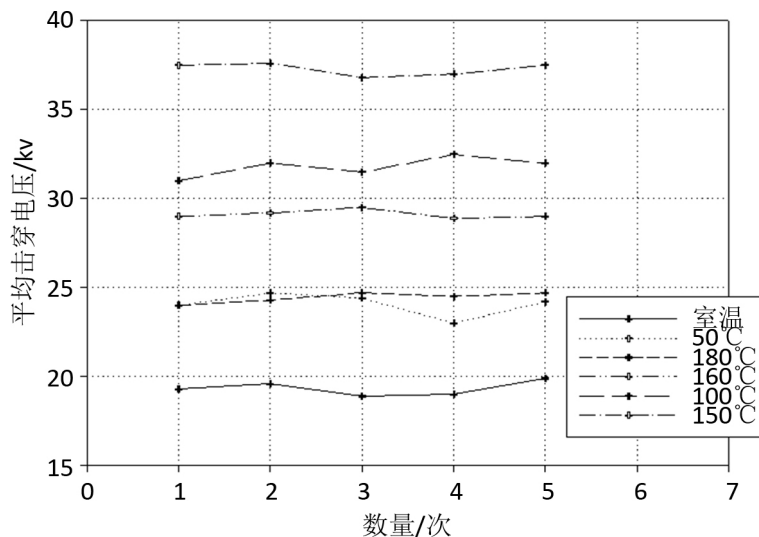
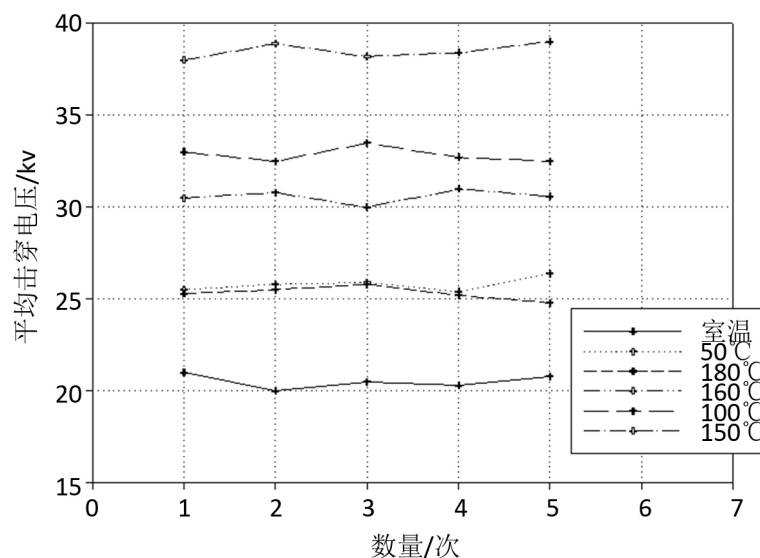


Figure 5. The withstand voltage testing curve of power insulating oil at a boost rate of 2000 VPS

图 5. 电器绝缘油于升压速率 2000 VPS 下的耐压测试曲线图



在升压速率 3000 VPS 的试验数据中, 平均击穿电压分别为 20.5、26.1、32.6、38.5、30.2 及  $25.6 \times 10^3$  V, 可以发现在升压速率 3000 VPS 与前两种速率相较之下以无加热、150℃及 180℃来看绝缘耐压能力提升至  $20.6 \times 10^3$  V, 到了 150.0℃更是达到  $38.4 \times 10^3$  V 而 180℃时仅下降至  $25.6 \times 10^3$  V, 其 3000 VPS 曲线图如图 6 所示。



**Figure 6.** The withstand voltage testing curve of power insulating oil at a boost rate of 3000 VPS

**图 6.** 电器绝缘油于升压速率 3000 VPS 下的耐压测试曲线图

#### 4. 结束语

根据以上实验结果, 可以得出以下结论: TG 热重分析结果表明, 由电器绝缘油于 4 个不同的升温速率之下(分别为 1.0℃/min、2.0℃/min、4.0℃/min 及 8.0℃/min)所做的实验结果, 观察到电器绝缘油放热起始温度可当作未来使用上的操作依据以及 SDS 相关依据。借由 DSC 微量热扫描分析功能进行不同升温速率(1.0℃/min、2.0℃/min、4.0℃/min 及 8.0℃/min)实验, 从图中可观察到有一个放热波峰的产生, 而放热波峰会随着升温速率的提高而有向后平移的现象, 而最大放热量会跟随着升温速率提高而增加, 此现象凸显出电器绝缘油在升温速率越高的情况之下将会有更倍数成长的放热量以及更大的危害。另外 DSC 的放热量可当作未来在现场操作标准的依据。从恒温加热实验数据观察得知, 在恒温加热 50.0℃及 100℃时, 通过电器绝缘油的 TG 热重分析, 质量损失较少, 且电器绝缘油颜色部份并无变化; 而在 150℃时热重损失开始有明显的变化但电器绝缘油颜色部份并无变化, 在恒温加热 160℃及 180℃时, 电器绝缘油的质量损失较为明显, 甚至呈现倍数级增长, 且电器绝缘油颜色开始呈现明显的变化。借由不同的升压速率数据试验, 得知在不同的升压速率(500、2000 及 3000 VPS)中耐压数值出现些许的落差(推估是因升压速率的不同加压电压而仪器读取时间差所造成的现象), 但相同的是会随着温度上升至 150℃时绝缘电压能力上升到最高值, 当温度超过 150℃之后绝缘能力趋于下降。

建议在使用上除了注意油浸式变压器本身工作温度之外需要更加留意环境是否通风, 以免环境温度影响油浸式变压器温度上升使电器绝缘油温度上升, 间接造成电器绝缘油绝缘劣化。DSC 分析数据表明, 随着电器绝缘油的升温速率越来越大, 将导致放热量急剧增加, 因此在现场操作时必须更加注意变压器的升温情形。在电器绝缘油的管理与操作时必须更加留意, 以免造成变压器事故导致人员伤亡的情形发生, 造成经济上的重大损失甚至重大灾害导致国家发展受限[21] [22]。

## 致 谢

诚挚感谢衢州市科技计划指导性项目(2019014)与衢州职业技术学院校级科研项目(QZYYZ1907)资助。同时感谢衢州职业技术学院提供的良好的科研平台及环境,借此机会谨向所有关心、帮助和支持我的同事、家人及朋友表示由衷感谢。

## 参考文献

- [1] 刘航, 王有元, 梁玄鸿, 等. 基于多因素的变压器油中溶解气体体积分数预测方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1114-1121.
- [2] 罗汉武, 来文清, 姜国义, 等. 油浸式变压器热路模型的修正及实验验证[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 220-225.
- [3] 李洋, 赵振刚, 许晓平, 等. 油浸式变压器温度场的可控发热模拟装置研究[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(7): 1087-1092.
- [4] 于佰鑫, 刘文里, 邢雁凯, 等. 电力变压器短路条件下绕组热稳定性的计算与分析[J]. 变压器, 2016, 53(5): 8-11.
- [5] 杨贤, 柯春俊. 基于热稳定性能的主变压器油纸电容式套管介质损耗异常诊断[J]. 广东电力, 2014, 38(8): 60-63.
- [6] 张萍, 王奕玲, 王建民, 等. 油浸式变压器饼式绕组的温升计算与影响因素分析[J]. 变压器, 2018, 55(10): 41-45.
- [7] Liang, G.S., Gao, S.Q. and Wang, Y.C. (2017) Fractional Transmission Line Model of Oil-Immersed Transformer Windings Considering the Frequency-Dependent Parameters. *IET Generation Transmission & Distribution*, **11**, 1154-1161. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0877>
- [8] 袁超, 刘涛, 张劲松, 等. 一起 220 kV 变压器绕组变形故障诊断与解体分析[J]. 变压器, 2018, 55(9): 79-80.
- [9] Sood, Y.R. and Wadhwa, A. (2015) Health Assessment of Oil Immersed Transformer Using Fuzzy Logic. *Trends in Electrical Engineering*, **45**, 275-283.
- [10] 陶超, 张喜乐, 王建民, 等. 油浸式变压器绕组暂态温升的计算与分析[J]. 变压器, 2018, 55(3): 1-5.
- [11] Taheri, A.A., Abdali, A. and Rabiee, A. (2019) A Novel Model for Thermal Behavior Prediction of Oil-Immersed Distribution Transformers with Consideration of Solar Radiation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **34**, 1634-1646. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2916664>
- [12] Zhang, D., Zhao, H., Yun, H., et al. (2018) Study on FDS Characteristics of Oil-Immersed Paper Insulation Bushing under Non-Uniform Moisture Content. *IET Science, Measurement and Technology*, **12**, 691-697. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2017.0595>
- [13] 钟志远, 秦海鸿, 袁源, 等. 碳化硅 MOSFET 桥臂电路串扰抑制方法[J]. 电工电能新技术, 2015(5): 8-12, 23.
- [14] 张云, 徐衍亮, 李豹. 基于动态电源的 MOSFET 驱动优化[J]. 电工技术学报, 2013(12): 269-275.
- [15] Zhu, L., Hou, F., Ji, S., et al. (2018) Primary Differential Pulse Method for Partial-Discharge Detection of Oil-Immersed Inverted Current Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **33**, 1492-1494. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2580099>
- [16] Wang, D., Zhou, L., Li, H., et al. (2018) Moisture Estimation for Oil-Immersed Bushing Based on FDS Method: At a Reference Temperature. *IET Generation, Transmission & Distribution*, **12**, 2480-2486. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1591>
- [17] Zhan, W., Goulart, A.E., Falahi, M., et al. (2015) Development of a Low-Cost Self-Diagnostic Module for Oil-Immerse Forced-Air Cooling Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **30**, 129-137. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2341454>
- [18] 毛鹏, 缠潇潇, 张卫平. SiC MOSFET 特性分析及驱动电路研究[J]. 电力电子技术, 2017(9): 24-27, 67.
- [19] Biçen, Y. and Aras, F. (2014) Loadability of Power Transformer under Regional Climate Conditions: The Case of Turkey. *Electrical Engineering*, **96**, 347-358. <https://doi.org/10.1007/s00202-014-0301-6>
- [20] Rosas, C., Moraga, N., Bubnovich, V., et al. (2005) Improvement of the Cooling Process of Oil-Immersed Electrical Transformers Using Heat Pipes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **20**, 1955-1961. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.838625>
- [21] Hwang, M.D., Grady, W.M. and Sanders, H.W. (2002) Calculation of Winding Temperatures in Distribution Transformers Subjected to Harmonic Currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **3**, 1074-1079. <https://doi.org/10.1109/61.193889>
- [22] Wang, J.J. and Chung, H.S.-H. (2015) A Novel RCD Level Shifter for Elimination of Spurious Turn-On in the Bridge-Leg Configuration. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **30**, 976-984. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2310898>