

新型油-纸绝缘系统水分平衡曲线的理论模型与验证

王书辉¹, 陈 鸽², 陈 鑫³, 朱 亮¹, 冯大伟¹

(1. 河北工业大学 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 天津 300130; 2. 国网冀北电力有限公司
张家口供电公司, 河北 张家口 075000; 3. 国网无锡供电公司, 江苏 无锡 214061)

摘 要: 绝缘油和绝缘纸种类众多且成分各异, 配合使用时将具有不同的水分平衡曲线。为获得不同油-纸绝缘系统的水分平衡曲线, 本文基于水分平衡时油和纸的相对含水量关系, 构建了适用于新型油-纸绝缘系统的水分平衡曲线模型, 并结合水分平衡实测结果对该模型进行验证。结果表明: 在变压器典型运行温度下, 不同油-纸绝缘系统水分平衡曲线模型的预测准确率高于 90%, 证实了该模型的有效性。

关键词: 变压器; 新型油-纸绝缘; 水分平衡曲线; 理论预测模型; 实验验证

Theoretical model and validation of moisture equilibrium curves for new oil-paper insulation system

WANG Shuhui¹, CHEN Ge², CHEN Xin³, ZHU Liang¹, FENG Dawei¹

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province,
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Zhangjiakou Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Zhangjiakou 075000, China;

3. State Grid Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214061, China)

Abstract: There are many types of insulating oils and insulating papers with different compositions, which will have different moisture equilibrium curves when they are used in conjunction. To obtain the moisture equilibrium curves of different oil-paper insulation systems, this research constructed a moisture equilibrium curve model applicable to new oil-paper insulation systems based on the relative moisture content relationship between oil and paper at moisture equilibrium, and verified the model by combining with the measured results of moisture equilibrium experiments. The results show that under typical operating temperature of transformer, the prediction accuracy of the moisture equilibrium curve model for different oil-paper insulation systems is higher than 90%, confirming the effectiveness of the model.

Key words: transformer; new oil-paper insulation; moisture equilibrium curve; theoretical prediction model; experiment verification

0 引言

油-纸绝缘作为一种经典的绝缘结构, 被广泛用作变压器主绝缘^[1-2]。传统矿物绝缘油-纸绝缘系统典型代表为克拉玛依 25# 绝缘油-kraft 绝缘纸, 其存在耐热等级较低、防火性能差、油泄漏污染环境等问题。近年来, 随着电力电网对过负荷、环保和防火防爆要求的提高, 新型耐热绝缘纸和环保阻燃绝缘油被广泛研究和应用^[3-4]。

油-纸绝缘中的水分含量是决定其绝缘性能和老化性能的关键参量, 对变压器的设计制造和运

维检修十分重要^[5-8]。油-纸绝缘中的水分在特定温度下会达到平衡状态, 也会随着温度变化而迁移, 因此不同温度下的水分平衡曲线是预测油-纸绝缘中水分的重要参考^[9], 对绝缘的设计和运维都具有重要的实际工程意义。研究学者对油-纸绝缘系统的水分平衡曲线进行了大量研究。1960 年, J FABRE 等^[10]首次提出了油-纸绝缘水分平衡曲线的概念, 并用于预测矿物油-纸绝缘系统中绝缘纸的水分含量。之后, T OOMMEN 等^[11]在此研究基础上, 基于特定温度下油和纸中的相对水分含量相等的原理, 提出了 OOMMEN 水分平衡曲线, 该曲线用于低温下水分含量预测时具有更高的准确度。DU Y Q 等^[12]结合已有研究结果, 构建了一组宽水分含量

基金项目: 河北省省级科技计划项目(21567605H); 河北省自然科学基金资助项目(E2024202006)。

下(油中水分含量为0~800 mg/kg)的水分平衡曲线,证实了OOMMEN水分平衡曲线与实测结果最为吻合。近年来,LI J等^[13]构建了油-纸绝缘系统的水分平衡曲线,发现两种绝缘油水分含量相同时,菜籽绝缘油浸渍绝缘纸中的水分含量明显比矿物油浸渍绝缘纸中的水分含量低约80%。

已有的水分平衡曲线主要针对传统矿物油-纸绝缘系统,但随着大量新型的酯类绝缘油和耐热绝缘纸的开发和应用,仍缺乏相应的水分平衡曲线来进行性能研究。表1和表2分别列举了近年来研发的部分典型酯类绝缘油和耐热绝缘纸。由于不同新型绝缘纸和绝缘油的成分和结构不同,对水的亲和性有明显差异,新型油-纸绝缘系统具有不同的水分平衡曲线。新型绝缘油或绝缘纸种类繁多,可组成大量不同的油-纸绝缘系统。倘若一一采用实验方法获得其水分平衡曲线,工作量十分巨大并且浪费财力,对于变压器生产企业和运维检修公司而言,是一项难以完成的任务。

表1 典型的酯类绝缘油

Table 1 Typical ester insulating oils

酯类绝缘油	原料	研发单位
Midel 7131型合成酯	季戊四醇酯	英国 M&I Materials 公司
FR3型天然酯	大豆油	美国 Copper 公司
BIOTEMP型天然酯	葵花籽油	瑞典 ABB 公司
棕榈改性酯(PFAE)	棕榈油	日本 AE 帕瓦株式会社
山茶籽天然酯	山茶籽油	重庆大学
VS100型天然酯	大豆油	武汉泽电公司
RAPO型天然酯	多种植物油	广东卓原公司

表2 典型耐热绝缘纸

Table 2 Typical heat-resistant insulating papers

绝缘纸	原料	研发单位
间位芳纶纸	芳纶纤维	美国 DuPont 公司
芳砜纶绝缘纸	芳砜纶纤维	上海多个化工厂联合
HTFR 绝缘纸	植物纤维素	美国 Copper 公司
TUK 热改性纸	牛皮纸加氮改性	瑞士魏德曼公司
YT564型间位芳纶纸	改性芳纶纤维	烟台泰和新材料公司
TXZ-800型陶瓷纤维纸	陶瓷纤维	南京玻璃纤维研究院

因此,亟需一种能够获得不同油-纸绝缘系统水分平衡曲线的通用方法,为变压器新型油-纸绝缘系统的推广应用提供参考。本文通过测定典型绝缘纸和绝缘油的饱和含水量,基于水分平衡时油和纸的相对含水量关系,提出一种新型油-纸绝缘系统水分平衡曲线的理论模型,并采用实验数据验

证模型的准确性,为新型油-纸绝缘系统的设计应用与运行维护提供参考。

1 新型油-纸绝缘系统水分平衡曲线理论模型

1.1 水分平衡理论

油-纸绝缘中水分处于动态扩散平衡过程。菲克定律表明,同种介质中水分扩散方向和速度取决于浓度梯度,如式(1)所示^[14]。其中,扩散系数(D)是决定水分扩散的关键因素,水分扩散系数计算公式如式(2)所示^[15]。根据式(1)~(2)可获得水分趋于平衡的速度。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$D = D_0 \exp \left[kc + E_0 \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

式(1)~(2)中: c 为纸中水分含量,%; t 为扩散时间, s ; x 为水分沿纸张厚度方向的扩散距离, m ; D 为水分在绝缘纸中的扩散系数, m^2/s ; T_0 为参考温度,通常取298 K; T 为绝对温度,K; D_0 为温度为 T_0 时水分在理想干燥绝缘纸中的扩散系数, m^2/s ; k 和 E_0 分别为衡量水分含量和温度对水分扩散系数影响的常数。

水在材料中的热力学状态通常用水势来描述,水势是等温等压下体系中的水与纯水的化学势差,可以通俗理解为水移动的趋势。如果气相的水势与吸附相的水势相同,则两相系统水分达到平衡^[16],如式(3)所示。式(4)定义了气相中的热力学公式,水势与温度、压力、渗透式、内聚力和表面张力等因素有关^[17],其中对水分扩散最重要的变量是温度和水蒸气压力。

$$\Psi_{\text{gas}} = \Psi_{\text{ads}} \quad (3)$$

$$\Psi_{\text{gas}} = \Psi_0 + RT \ln(p/p_s) \quad (4)$$

式(3)~(4)中: Ψ_{gas} 为气相水势; Ψ_{ads} 为吸附相水势; Ψ_0 为参考势; R 为理想气体常数; T 为绝对温度; p 和 p_s 分别为水蒸气的气压和饱和蒸气压, p/p_s 表示相对湿度或相对饱和含水量,因此水分交换也可以用相对饱和含水量来描述。

如果施加相同的温度和压力,平衡时相对饱和含水量相同,D N EWART^[18]的实验结果进一步验证了这一结论的可靠性。本文以此结论为基础,结合绝缘纸和绝缘油的饱和含水量,可以推出任意油-纸绝缘系统的水分平衡曲线模型。

1.2 不同温度下绝缘油的饱和含水量模型

绝缘油作为一种非极性物质,在分子层面上与强极性的水分子不相溶,导致绝缘油对水分的亲和力较低^[19]。然而,随着温度升高,分子热运动逐渐加剧,绝缘油和水分子间的相互作用随之增强,将显著提高绝缘油的水分溶解度。为了更准确地描述温度对绝缘油水分溶解度的影响,常采用式(5)进行量化表达^[20]。

$$\lg S(T) = A - \frac{B}{T + 273} \quad (5)$$

式(5)中: $S(T)$ 为油中水分溶解度,mg/kg; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; A 和 B 为水分溶解度系数,与绝缘油的种类有关。

不同绝缘油的分子成分各异,与水分子的相互作用强度不同,因此,即使在相同温度下,不同绝缘油的水分溶解度也存在显著差异。图1展示了几种典型绝缘油的水分溶解度曲线^[21]。

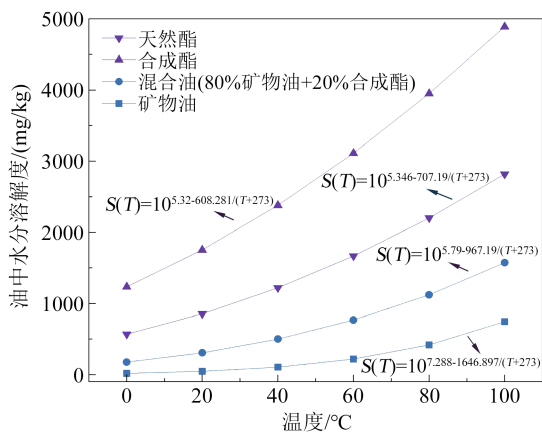


图1 典型绝缘油的水分溶解度曲线

Fig.1 Moisture solubility curves of typical insulating oils

1.3 不同温度下绝缘纸的饱和含水量模型

本文中,绝缘纸饱和含水量定义为在特定温度下,当空气环境相对湿度为100%时,绝缘纸所能吸收的最大水分含量。变压器中的绝缘纸长期浸渍在绝缘油中,绝缘油分子填充绝缘纸中的微小空隙,从而提升油-纸绝缘系统的绝缘性能。研究表明,无论绝缘纸是否经过浸渍处理,其气体空间中的水蒸气压都是温度的函数,这意味着油浸绝缘纸和未浸渍绝缘纸遵循着相同的水分平衡规律^[22],但是因为油的黏度大且与水的相容性很差,所以未浸渍绝缘纸达到水分平衡状态所需的时间较短。基于这一原理,通过结合未浸渍绝缘纸的饱和含水量和浸油率,即可计算出油浸绝缘纸的饱和含水量。

本文测量了变压器常用的几种未浸渍绝缘纸

的饱和含水量(牛皮纸、热改性纸和芳纶纸)。首先,将绝缘纸置于 90°C 的干燥箱中真空干燥48 h,随后取出绝缘纸并称重,记为 m_0 。需要注意的是,尽管进行了充分干燥,绝缘纸仍无法完全去除水分,通过卡尔费休滴定法测得其内部保留了约1%的水分含量,因此,在后续计算中,将干燥的绝缘纸质量修正为 $0.99m_0$,以便更准确地反映其真实质量。其次,将干燥后的绝缘纸放入恒温恒湿箱中进行吸湿处理,恒温恒湿箱的温度分别设为20、40、60、 80°C ,相对湿度设为100%。在吸湿过程中,通过不断对绝缘纸进行称重来监测水分含量的动态变化,当纸的水分含量在5 min内变化程度小于0.01%时即认为绝缘纸在该温度和湿度条件下达到水分饱和和状态。此时,将绝缘纸取出并称重,记录其吸湿后的质量为 m 。最后,利用式(6)计算出不同条件下未浸渍绝缘纸的饱和含水量(M'),结果如图2所示。

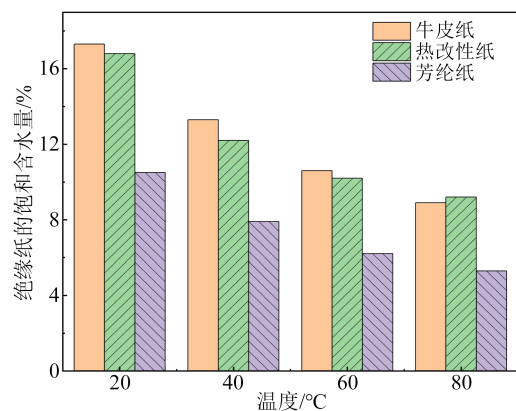


图2 不同温度下未浸渍绝缘纸的饱和含水量

Fig.2 Saturated moisture content of insulating papers without impregnating under different temperatures

$$M' = \frac{m - 0.99m_0}{0.99m_0} \quad (6)$$

从图2可以看出,未浸渍绝缘纸的饱和含水量与温度呈负相关,随着温度升高,未浸渍绝缘纸的饱和含水量逐渐降低。其中牛皮纸与热改性纸的饱和含水量相近,而芳纶纸的饱和含水量远低于上述两种绝缘纸。对不同温度条件下的纸中饱和含水量进行曲线拟合,结果如图3所示,拟合优度均高于99%,具有很好的拟合效果。

从图3可以看出,芳纶纸与牛皮纸的饱和含水量有明显差别,相同温度下芳纶纸的饱和含水量约为牛皮纸的60%,这是两种绝缘纸的结构差异所

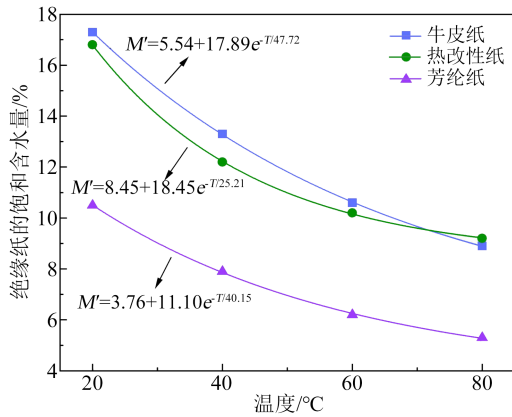


图3 未浸渍绝缘纸的饱和含水量随温度的变化曲线

Fig.3 The change curves of saturated moisture content for non impregnated insulating papers with temperature

致。牛皮纸采用硫酸盐针叶木浆为原料,其主要成分为纤维素^[23],纤维素由葡萄糖单体聚合而成,化学式为 $[C_6H_{10}O_5]_n$,结构如图4(a)所示,每个环上有3个羟基,因此牛皮纸具有较高的亲水性。芳纶纸是间位芳香族聚酰胺高分子聚合物,由间苯二酸与间苯二胺共聚而成,结构如图4(b)^[24]所示,其分子链上没有羟基,因此芳纶纸亲水性弱于传统牛皮纸,进而导致两者饱和含水量有所差异。

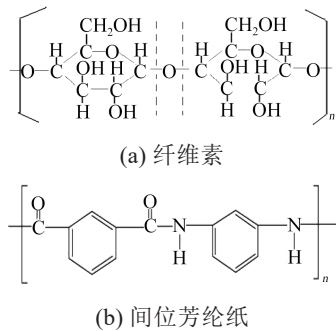


图4 绝缘纸的化学结构式

Fig.4 Chemical structures of insulating paper

为了进一步获得油浸绝缘纸的饱和含水量,本文测量了绝缘纸的浸油率。首先,分别将绝缘油和绝缘纸在 90°C 下真空干燥48 h,以消除水分对测量结果准确性的影响;干燥完成后立即取出绝缘纸进行称重,记录其质量为 m_p ;然后将绝缘纸在 60°C 下真空浸油24 h;浸油完成后,采用吸油纸吸干表面的油,再次对绝缘纸进行称重,并记录其质量为 m_{op} 。基于上述测量结果,采用式(7)计算不同油-纸绝缘系统中绝缘纸的浸油率(n),结果如图5所示。令未浸渍绝缘纸的饱和含水量除以 $(1+n)$,即可获得油浸绝缘纸的饱和含水量(M_{ps}),计算公式如式(8)所

示,部分计算结果如表3所示。

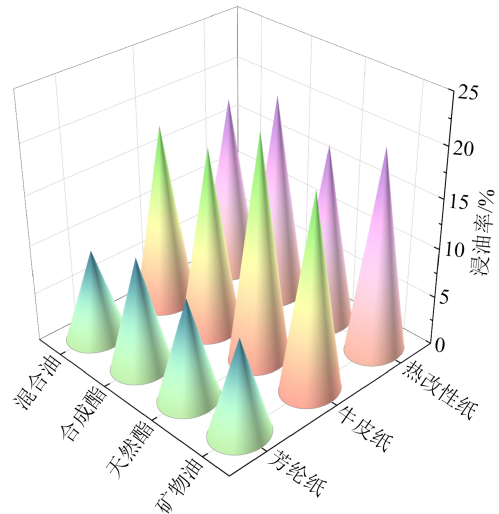


图5 不同油-纸绝缘系统的浸油率

Fig.5 The oil immersion rate of different oil-paper insulation systems

$$n = \frac{m_{op} - m_p}{m_p} \times 100\% \quad (7)$$

$$M_{ps} = \frac{M'}{1 + n} \quad (8)$$

表3 不同油-纸绝缘系统中油浸绝缘纸的饱和含水量公式

Table 3 Formula of saturated moisture content for oil-immersed insulating paper in different oil-paper insulation systems

油-纸绝缘系统	油浸绝缘纸的饱和含水量公式
牛皮纸-矿物油绝缘系统	$M_{ps} = 4.63 + 14.94e^{-\frac{T}{47.72}}$
牛皮纸-大豆油绝缘系统	$M_{ps} = 4.52 + 14.6e^{-\frac{T}{47.72}}$
牛皮纸-合成酯绝缘系统	$M_{ps} = 4.67 + 15.08e^{-\frac{T}{47.72}}$
热改性纸-大豆油绝缘系统	$M_{ps} = 7.15 + 15.62e^{-\frac{T}{25.21}}$
芳纶纸-合成酯绝缘系统	$M_{ps} = 3.37 + 9.97e^{-\frac{T}{40.15}}$
芳纶纸-混合油绝缘系统	$M_{ps} = 3.44 + 10.17e^{-\frac{T}{40.15}}$

1.4 水分平衡曲线模型的构建

根据1.1节所述,油和纸与空气达到水分平衡时,油和纸的相对含水量(由绝对含水量除以饱和含水量得到)与空气的相对湿度完全一致,因此绝缘油和绝缘纸的相对含水量也相同,如式(9)所示。基于这一理论依据,结合前文绝缘油和油浸绝缘纸的饱和含水量公式,即可构建出适用于不同油-纸绝缘系统的水分平衡曲线模型,其中图1中的绝缘

油水分溶解度等同于绝缘油饱和含水量。部分计算结果如表4所示。

表4 不同油-纸绝缘系统的水分平衡曲线

Table 4 Moisture equilibrium curves of different oil-paper insulation systems

油-纸绝缘系统	水分平衡曲线
牛皮纸-矿物油绝缘系统	$M_p = \frac{4.63 + 14.94e^{\frac{T}{47.72}}}{10^{7.288 \cdot \frac{1646.879}{T+273}}} \cdot M_{Os}$
牛皮纸-大豆油绝缘系统	$M_p = \frac{4.52 + 14.6e^{\frac{T}{47.72}}}{10^{5.346 \cdot \frac{707.19}{T+273}}} \cdot M_{Os}$
牛皮纸-合成酯绝缘系统	$M_p = \frac{4.67 + 15.08e^{\frac{T}{47.72}}}{10^{5.32 \cdot \frac{608.281}{T+273}}} \cdot M_{Os}$
热改性纸-大豆油绝缘系统	$M_p = \frac{7.15 + 15.62e^{\frac{T}{25.21}}}{10^{5.346 \cdot \frac{707.19}{T+273}}} \cdot M_{Os}$
芳纶纸-合成酯绝缘系统	$M_p = \frac{3.37 + 9.97e^{\frac{T}{40.15}}}{10^{5.32 \cdot \frac{608.281}{T+273}}} \cdot M_{Os}$
芳纶纸-混合油绝缘系统	$M_p = \frac{3.44 + 10.17e^{\frac{T}{40.15}}}{10^{5.79 \cdot \frac{967.19}{T+273}}} \cdot M_{Os}$

$$\frac{M_p}{M_{ps}} = \frac{M_{Os}}{M_{os}} \quad (9)$$

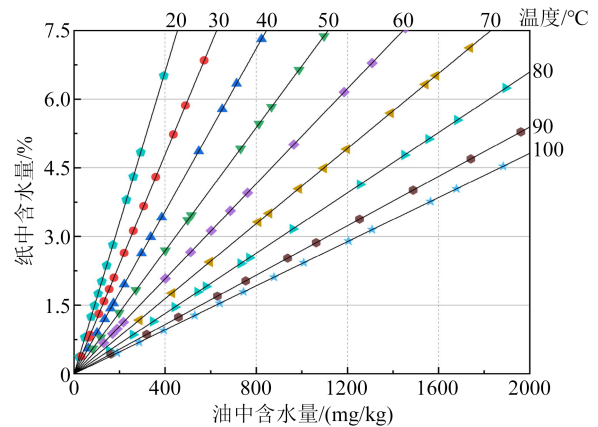
式(9)中： M_{Os} 为绝缘油的绝对含水量； M_{os} 为绝缘油的饱和含水量， $M_{os}=S(T)$ ； M_p 为绝缘纸的绝对含水量； M_{ps} 为油浸绝缘纸的饱和含水量。

相较于传统模型，如J FABRE等^[10]、T OOMMEN等^[11]、LI J等^[13]以及ABB和MIT等单位^[25-26]构建的水分平衡曲线模型，都是由实验直接获得。但是随着变压器的发展，油和纸组合的复合绝缘系统种类太多，全部开展实验存在工作量大、测试不准确等问题。本模型可以预测不同油-纸绝缘系统的水分平衡曲线，该方法所需测试时间短，可以避免油-纸中水分不易平衡且时间过长的问题。同时，该模型简单，能够迅速获得任意两种油、纸组合后的水分平衡曲线，易于向变压器生产厂家和运维人员推广。

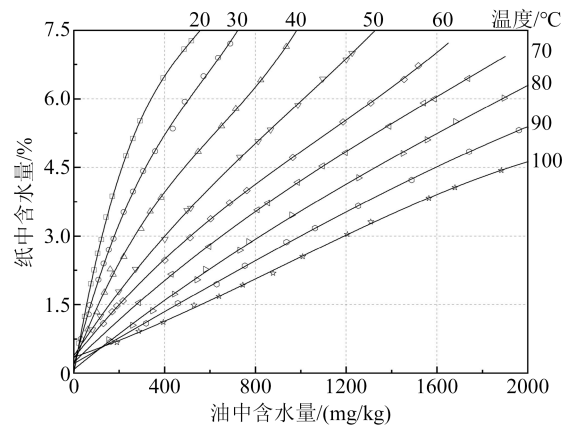
2 水分平衡曲线理论模型的验证

为验证水分平衡曲线理论模型的准确性，采用数理统计的方法将模型预测值与实验值进行对比分析。目前，已有学者通过实验方法绘制了部分油-纸绝缘系统的水分平衡曲线。本文采用文献

[13]中的矿物油-牛皮纸绝缘系统和天然酯-牛皮纸绝缘系统与文献[27]中的合成酯-芳纶纸绝缘系统的实测数据，开展验证分析。以天然酯-牛皮纸绝缘系统为例，其不同温度下的水分平衡曲线模型预测值和实验值对比结果如图6所示。从图6可以看出，预测得到的水分平衡曲线与实测曲线具有较好的相似性，整体规律一致。



(a) 本文模型预测值



(b) 文献[13]实验值

图6 天然酯-牛皮纸绝缘系统的水分平衡曲线模型预测值和实验值

Fig.6 Predicted values of moisture equilibrium curve models and experimental values for natural ester-kraft paper insulation systems

相对误差是反映测量结果偏离真实值大小的统计量，在科学和工程领域尤为重要，计算公式为式(10)。本文计算不同水分平衡曲线模型预测值与实验值之间的相对误差，进而判断模型预测的准确程度。

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{X} \times 100\% \quad (10)$$

式(10)中： ε 为相对误差； Δ 为模型预测值与实验值

的差值; X 为实验值。

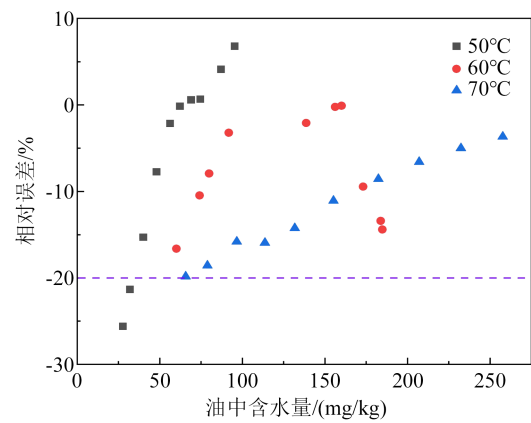
根据文献[13,27]的测量结果,在变压器典型运行温度范围内取样30个点,记录其温度、油中水分含量和纸中水分含量。同时,根据表4中的公式,计算出特定温度下不同油中水分含量所对应的纸中水分含量预测值,进而得到不同油-纸绝缘系统中纸中水分含量预测值与实验值之间的相对误差,结果如图7所示。

图7结果表明,在变压器典型运行温度下,纸中水分含量的模型预测值与实验值的相对误差总体小于20%,只有低水分条件下存在少量异常点,但相对误差仍小于30%。具体而言,矿物油-牛皮纸绝缘系统、天然酯-牛皮纸绝缘系统和合成酯-芳纶纸绝缘系统共有28个取样点的相对误差在20%以内,占总取样点的93.3%。牛皮纸体系和芳纶纸体系预测结果均存在一定偏差,牛皮纸体系误差规律主要表现为由负转正,这可能是因为绝缘纸在干燥浸油实验过程中,存在一定程度的老化,绝缘纸的聚合度会略微下降,附着在绝缘纸孔隙中的亲水性杂质提供了更多与水分子结合的位点,导致绝缘纸吸水性增加^[28]。但是随着系统中的水分增多,因浸油增加的结合位点有限,存在饱和效应,所以误差值由负转正。芳纶纸体系与牛皮纸体系误差变化规律略有不同,可能是芳纶纸聚合度略微下降及芳纶纤维结构导致浸油率低等多方面原因。

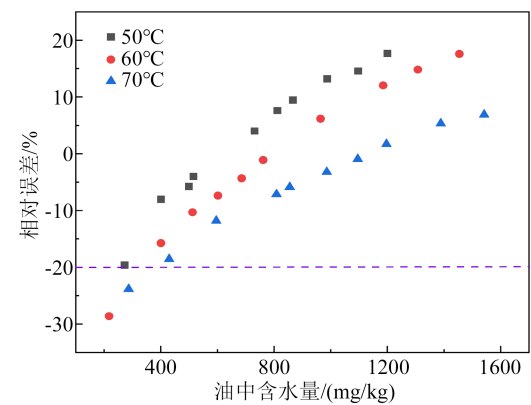
需要注意的是,油-纸绝缘系统中水分含量较低时,在实际测试过程中因制样、水分挥发、测试设备精确度等因素影响,测量的相对误差通常较大,尤其是低水分含量下相对误差将更大。例如,设油中水分含量为10 mg/kg,其测试结果在8~12 mg/kg波动较为常见。因此,本文提出的预测模型在 $\pm 20\%$ 偏差范围内,能够较为准确地预测绝缘纸的水分含量,准确率高于90%。该水分预测模型仅需要测试油-纸的饱和含水量等基础数据,即可快速获得不同油-纸绝缘系统的水分平衡曲线,可为不同油-纸绝缘系统的变压器设计制造和运行维护提供参考。

3 结论

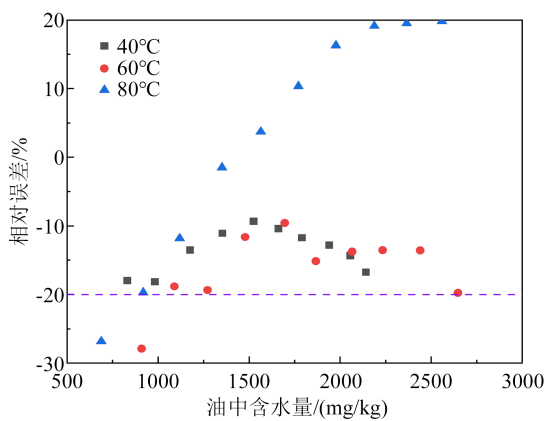
(1)本文基于扩散平衡基础理论,构建了新型油-纸绝缘系统水分平衡曲线的理论模型,仅需要测试不同温度下绝缘油、绝缘纸的饱和含水量等基础数据,即可快速获得不同油-纸绝缘系统的水分



(a) 矿物油-牛皮纸绝缘系统



(b) 天然酯-牛皮纸绝缘系统



(c) 合成酯-芳纶纸绝缘系统

图7 不同油-纸绝缘系统中水分平衡曲线模型预测值与实验值的相对误差

Fig.7 Relative error between the predicted values of moisture equilibrium curve model and experimental values in different oil-paper insulation systems

平衡曲线,可为不同油-纸绝缘系统变压器的制造设计和运维提供理论参考。

(2)在变压器典型运行温度下,对比不同油-纸绝缘系统水分平衡模型的预测值和实验值,模型的相对误差仅在低水分含量条件下较大,且总体小于

20%, 说明水分平衡曲线理论模型具有较好的准确性。

参考文献 References

- [1] GENG C H, LIU J F, ZHANG H, et al. Diffusion mechanism of furfural in transformer oil-paper insulation under moisture effect[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2022,29(2):485-492.
- [2] 刘东升,刘新颜,史哲文,等.天然酯变压器与矿物油变压器温升特性差异分析[J]. *变压器*,2023,60(9):19-23.
LIU Dongsheng, LIU Xinyan, SHI Zhewen, et al. Difference analysis on temperature rise characteristics between natural ester insulating oil transformer and mineral insulating oil transformer[J]. *Transformer*,2023,60(9):19-23.
- [3] JIA J, TAO F B, ZHANG G J, et al. Validity evaluation of transformer DGA online monitoring data in grid edge systems[J]. *IEEE Access*,2020,8:60759-60768.
- [4] 宋浩永,陈于晴,黄青丹,等.植物绝缘油纸匝间绝缘的电气性能研究[J]. *绝缘材料*,2024,57(5):110-115.
SONG Haoyong, CHEN Yuqing, HUANG Qingdan, et al. Study on electrical performance of vegetable insulating oil-paper interturn insulation[J]. *Insulating Materials*,2024,57(5):110-115.
- [5] FOFANA I, WASSERBERG V, BORSI H, et al. Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers. II. Investigations of mixed liquid impregnated paper insulation[J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*,2022,18(4):5-16.
- [6] 苗光尧,周玉霞,李叶飞.微水加速变压器油纸绝缘热解的微观机制研究[J]. *绝缘材料*,2022,55(9):57-62.
MIAO Guangyao, ZHOU Yuxia, LI Yefei. Research on microcosmic mechanism of transformer oil-paper insulation pyrolysis accelerated by micro-water[J]. *Insulating Materials*, 2022, 55(9): 57-62.
- [7] VAHIDI F, TENBOHLEN S, ROESNER M, et al. The influence of the moisture during the electrical conductivity measurement on impregnated high density pressboard[C]//The 19th International Symposium on High Voltage Engineering. Pilsen, Czech Republic: IEEE,2015,23-28.
- [8] SHARIN A G, NORAZHAR A B, CHAIRUL I S, et al. Effects of moisture content and temperature on the dielectric strength of transformer insulating oil[J]. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*,2019,63(1):107-116.
- [9] International Electrotechnical Commission. Insulating liquids-oil-impregnated paper and pressboard-determination of water by automatic coulometric karl fischer titration: IEC 60814-1997[S]. Geneva,Switzerland: IEC,1997.
- [10] FABRE J, PICHON A. Deteriorating processes and products of paper in oil. application to transformers[J]. *CIGRE*, 1960, 137(18):12-137.
- [11] OOMMEN T. Moisture equilibrium in paper-oil insulation systems[C]//1983 EIC 6th Electrical/Electrical Insulation Conference. Chicago, USA: IEEE,1983:162-166.
- [12] DU Y Q, ZAHN M, LESIEUTRE B C, et al. Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems[J]. *Feature Article*,1999,15(1):11-20.
- [13] LI J, ZHANG Z T, GRZYBOWSKI S, et al. A new mathematical model of moisture equilibrium in mineral and vegetable oil-paper insulation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2012,19(5):1615-1622.
- [14] 彭倩,李先浪,姚晓,等.典型油纸绝缘微水扩散特性仿真分析及试验研究[J]. *高压电器*,2014,50(1):31-36.
PENG Qian, LI Xianlang, YAO Xiao, et al. Simulation and experimental research of typical moisture diffusion in oil-paper insulation[J]. *High Voltage Apparatus*,2014,50(1):31-36.
- [15] FOSS S D. Power transformer drying model[R]. New York, USA: General Electric Company,1987:1-4.
- [16] MYERS A L, PRAUSNITZ J M, Thermodynamics of mixed gas adsorption[J]. *AIChE Journal*,1965,11.1:121-127.
- [17] MURRELL J N, JENKINS A D. Properties of liquids and solutions[R]. New York, USA: Wiley,1982.
- [18] EWART D N. Laboratory and factory measurements of moisture equilibrium in power transformer insulation[R]. *GE TIS Report*, 1955-07-14.
- [19] CHENG C H, FU M L, WU K, et al. Aging effect on interface charges between oil and oil immersed paper[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2021,28(5):1579-1587.
- [20] DU Y, MAMISHEV A V, LESIEUTRE B C, et al. Moisture solubility for differently conditioned transformer oils[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2001,8.5:805-811.
- [21] ARAKELIAN V, FOFANA I. Water in oil-filled, high-voltage equipment, part I: states, solubility, and equilibrium in insulating materials[J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2007, 23(4): 15-27.
- [22] PIPER J. Moisture equilibrium between gas space and fibrous materials in enclosed electric equipment[J]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*,1946,65(12):791-797.
- [23] EMSLEY A M, STEVENS G C. Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers[J]. *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*,1994,141(5):324-334.
- [24] ZHANG H, DU X, LIU J, et al. A novel and effective approach to enhance the interfacial interactions of meta-aramid fibers[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2023, 120: 244-253.
- [25] SHKOLNIK A. Determination of water content in transformer insulation[C]//Proceedings of 14th International Conference on

- Dielectric Liquids. Graz, Austria: IEEE,2002:337-340.
- [26] PAHLAVANPOUR, MARTINS M, EKLUND. Study of moisture equilibrium in oil-paper system with temperature variation [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Nagoya, Japan: IEEE,2003,3:1124-1129.
- [27] TENBOHLEN S, JOVALEKIC M, BATES L, et al. A methodology for determining water saturation limits and moisture equilibrium diagrams of alternative insulation systems[C]//2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Trondheim, Norway: IEEE,2011:1-5.
- [28] 周利军,李先浪,段宗超,等. 纤维素老化对油纸绝缘水分扩散特性的影响机制[J]. 中国电机工程学报,2014,34(21):3541-3547.
- ZHOU Lijun, LI Xianlang, DUAN Zongchao, et al. Influence of cellulose aging on characteristics of moisture diffusion in oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(21):3541-3547.
-
- 收稿日期:2024-07-05;修回日期:2024-09-09。
- 作者简介:
- 王书辉(2000-),男(汉族),河北邢台人,硕士生,主要从事绝缘油绝缘状态感知的研究;
- 通信作者:冯大伟(1992-),男(汉族),四川南充人,副教授,博士,主要从事电气设备绝缘状况的在线检测、绝缘状况故障诊断、绝缘油性能等方面的研究工作。