

一种油浸式电力变压器纸绝缘老化评估新特征量

郑含博^{1,2}, 张懿议¹, 刘捷丰^{1,3}, 房加珂¹

(1. 广西大学 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室, 广西 南宁 530004;

2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052;

3. 国网河北省电力公司石家庄供电分公司, 河北 石家庄 050000)

摘要:针对油中糠醛含量随变压器运行时间变化的分散性较大,难以准确评估油浸式变压器纸绝缘老化状态的不足,对甲醇、乙醇等低分子醇作为变压器纸绝缘老化评估新特征量进行了理论分析与实验研究。对绝缘纸的老化机理以及化学键断裂进行分析,从理论上探究甲醇、乙醇等低分子醇的产生原理及主要生成途径。采用气相色谱-质谱联用法对现场2台老旧变压器绝缘油样品中的甲醇、乙醇及糠醛含量进行了测定。实验结果表明,2组样品中均未检测到糠醛,但却检测到数量可观的乙醇。进一步地,对现场2台刚投运变压器的检测结果对比分析,分析结果揭示了乙醇可以作为有效表征变压器绝缘纸老化的新特征量,且比糠醛特征量相比更为有效。

关键词:油浸式变压器;纸绝缘;老化评估;乙醇;低分子醇

中图分类号:TM 41

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.023

0 引言

在电网中,油浸式变压器因其具有较高的绝缘强度、较长的使用寿命,被广泛应用于高压、超特高压输变电系统中^[1-2]。油-纸绝缘作为电力变压器内绝缘的主要绝缘形式,在变压器长期运行过程中会受到电场、温度、氧气、水分、机械应力等众多因素的影响,且各因素之间会产生协同效应,共同加速油-纸绝缘的老化,从而导致变压器的绝缘与机械性能逐步衰退,成为引起变压器发生故障的主要原因之一^[3-5]。绝缘纸作为变压器油-纸绝缘系统中的固体绝缘介质,相比于绝缘油而言,其老化过程不可逆且老化后难以更换,因此一般认为绝缘纸是决定油浸式变压器绝缘寿命的关键因素^[1,3],严重的绝缘纸老化甚至会导致变压器发生重大的绝缘事故。

绝缘纸在老化过程中会由于纤维素的断链引起聚合度 DP (Degree of Polymerization) 下降,导致绝缘纸机械性能降低,严重时发生脆化,因此 DP 被认为能直接反映绝缘纸的老化状态。但 DP 的测量目前仍需要变压器停电进行,而且必须对变压器采取吊芯取样操作,实现比较困难。因此工程上运用 DP 测量进行变压器内绝缘纸老化程度的评估难以令人满意。此外,部分学者采用油中溶解气体分析 DGA

(Dissolved Gas Analysis)^[6-9]作为老化评估特征量对变压器的绝缘老化状态和故障类型进行表征,取得了丰硕的成果,但油中特征气体尤其是低分子烃类主要来自于绝缘油的裂解,与绝缘纸的老化程度关系不大。文献[10-12]提出采用油中糠醛含量表征变压器绝缘纸的老化状态,具有一定的应用价值,然而大量变压器实测经验表明,由于易受各种运行条件的影响,油中糠醛含量随设备运行时间变化的分散性很大^[13-14],即使采用了诸多修正方法,其反映绝缘纸老化程度的准确性远不如实验室条件下的效果理想,故一定程度上限制了该方法的有效应用^[15-17],因此亟需寻找有效的新特征量以表征绝缘纸的老化程度。

依赖于气相色谱和质谱检测技术的发展,近年来 Jalbert 等^[18-19]在实验室条件下分离并鉴定了绝缘纸老化的 30 余种产物,并在产物中发现了甲醇,这一发现为绝缘纸老化评估新特征量的研究提供了新思路。但是,甲醇属于易挥发气体,且该发现是在实验室条件下进行的,在工程实际中是否适用、是否有其他醇类物质能够更高效地表征绝缘纸老化状态尚存在疑问。因此,为了进一步探究甲醇以及一些其他低分子醇(如乙醇等)作为变压器绝缘纸老化评估新特征量的准确性与可靠性,本文对变压器绝缘纸老化新特征量进行了研究:首先分析了纤维素的氧化分解机理以及化学键断裂顺序,从理论上研究了甲醇、乙醇等低分子醇的产生原理以及生成途径;进而设计了变压器绝缘纸老化过程中油中低分子醇产物的测量系统,采用气相色谱-质谱联用技术,对4台现场变压器绝缘油样品(1—4号)进行了油中糠醛、甲醇、乙醇含量的检测与鉴定,探究低分子醇作为变压器绝缘纸老化新特征量的适用性,并

收稿日期:2017-09-26;修回日期:2018-06-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51867003);广西自然科学基金资助项目(2015GXNSFBA139235);广西科技厅资助项目(AE020069);广西教育厅资助项目(T3020097903)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51867003),Guangxi Natural Science Foundation(2015GXNSFBA139235),Guangxi Science and Technology Department(AE020069) and Guangxi Department of Education Department(T3020097903)

结合实例进行了验证;最后给出了结论以及今后研究中需要重点关注的问题。

1 低分子醇产生机理

1.1 纤维二糖降解裂键机理

油浸式变压器绝缘纸的主要成分为纤维素,占绝缘纸板成分的 80% 以上。除此之外,还有约 12% 的半纤维素以及 8% 左右的木质素。其中,纤维素的基本组成单位是由糖苷键连接的两分子 β -D-吡喃型葡萄糖组成的纤维二糖,其分子模型如图 1 所示。

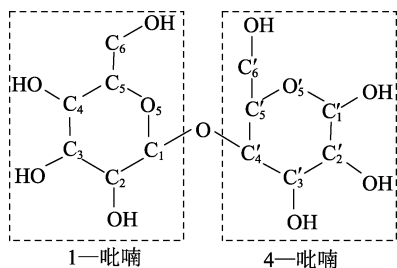


图 1 纤维二糖分子模型

Fig.1 Molecular model of cellulose

每条纤维素分子长链都是由许多吡喃葡萄糖单元连接而成的,绝缘纸老化的微观过程就是纤维素大分子链断裂的过程,文献[20]使用 ReaxFF 反应力场对纤维素的高温热降解过程进行反应分子动力学仿真,从原子水平探究纤维二糖的降解过程。研究发现,纤维素的纤维二糖在初始裂解阶段的初始断裂位置主要集中在糖苷键的 O 原子、 C_5-O_5' (C_5-O_5)、 C_1-O_5' (C_1-O_5) 处,还有部分在 C_1-C_2 (或 $C_1'-C_2'$) 以及 C_2-C_3 ($C_2'-C_3'$) 处。除此之外,在裂解过程中,纤维二糖上的羟基和氢原子也会出现有限断裂的情况。

1.2 低分子醇可能的生成途径

本节根据 1.1 节中纤维二糖初始键断裂位置统计情况,结合 ReaxFF 反应力场仿真模拟结果进一步推理重要低分子醇的生成途径。

(1) 甲醇的反应生成途径。

a. 若纤维二糖的 C_5-C_6 (或 $C_5'-C_6'$) 键断裂,则 C_6 (或 C_6') 和它所连接的羟基可以形成甲醇。

b. 若 C_1-O_5 (或 $C_1'-O_5'$) 断裂,则 C_1-O ($C_1'-O$) 键会生成 C_1-OH ($C_1'-OH$),若 C_1-C_2 (或 $C_1'-C_2'$) 也断裂,则 C_1 原子和它所连接的羟基也会形成甲醇。

c. 若 C_1-C_2 ($C_1'-C_2'$) 和 C_2-C_3 ($C_2'-C_3'$) 键同时断裂,则 C_2 原子和它所连接的羟基会形成甲醇。

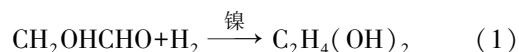
(2) 乙醇(C_2H_5OH)的反应生成途径。

a. 若纤维二糖的 C_2 (C_2') 上游离的羟基先裂解, C_1-O_5 (或 $C_1'-O_5'$) 键与 C_2-C_3 ($C_2'-C_3'$) 键断裂,则 C_1-C_2 以及 C_1 上新生成的羟基会形成乙醇。

(3) 乙二醇($C_2H_4(OH)_2$)的反应生成途径。

a. 若 C_1-O_5 (或 $C_1'-O_5'$) 断裂,则 C_1-O ($C_1'-O$) 键会生成 C_1-OH ($C_1'-OH$),当 C_2-C_3 ($C_2'-C_3'$) 处也裂解,则 C_1-C_2 ($C_1'-C_2'$) 以及它们连接的羟基可能会形成乙二醇。

b. 文献[20]指出,纤维二糖裂解的主要产物中还含有乙醇醛(CH_2OHCHO);而变压器内部使用的一些不锈钢材料中还含有镍分子这一储氢反应的良好催化剂,加上绝缘油的裂解能够提供氢气(H_2)。因此,乙醇醛在镍分子的催化作用下会发生反应生成乙二醇,化学方程式如下:



其中,甲醇的相对分子质量和沸点均最低,在实际实验测试时易挥发,对现场检测的仪器、环境条件要求较高,而相对而言,乙醇和乙二醇的检测稳定性较好,有望作为油浸式电力变压器纸绝缘老化的化学检测新特征量。考虑到现有实验条件限制,本文未对乙二醇的检测方法进行研究。

2 实验研究及结果

本节设计了变压器纸绝缘老化过程中油中低分子醇产物的测量系统,采用气相色谱-质谱联用法对油中乙醇、甲醇、糠醛的含量进行了检测与鉴定。

2.1 仪器参数

本文实验检测样本是 2 台分别实际运行近 26 a (1992 年 4 月投运) 和 31 a (1987 年 7 月投运) 的 220 kV 电压等级变压器的 1 号和 2 号绝缘油样品。检测方法采用气相色谱-质谱联用法,柱子型号为 DN-1MS 30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m。数据处理方法是先搜库、再对比标品、最后进行加标搜库。实验优化所得色谱条件为:柱箱温度 45 $^{\circ}$ C,气化室温度 250 $^{\circ}$ C,载气流速 1.26 mL/min,吹扫流量 3 mL/min。测定糠醛和甲醇、乙醇时优化所得质谱条件分别如表 1 和 2 所示。

表 1 测定糠醛时优化所得质谱条件

Table 1 Mass spectrometry conditions for furfural

质谱条件	参数值	质谱条件	参数值
离子源温度	200 $^{\circ}$ C	间隔	0.3 s
接口温度	250 $^{\circ}$ C	扫描速度	625 amu/s
开始时间	3 min	开始质荷比	20
结束时间	9 min	结束质荷比	200

注:amu 为原子质量单位。

表 2 测定甲醇和乙醇时优化所得质谱条件

Table 2 Mass spectrometry conditions for CH_3OH and C_2H_5OH

质谱条件	参数值	质谱条件	参数值
离子源温度	200 $^{\circ}$ C	间隔	0.3 s
接口温度	250 $^{\circ}$ C	扫描速度	625 amu/s
开始时间	1.01 min	开始质荷比	20
结束时间	4.60 min	结束质荷比	200

2.2 样品处理

a. 糠醛标准溶液处理。

取 10 μL 糠醛标品,加 990 μL 的乙腈得糠醛标准溶液稀释 100 倍;分别用于 1 号处理后的样品和 2 号处理后的样品加标和稀释过膜进样测定。

b. 甲醇标准溶液。

取 15 μL 的甲醇标品,加 1 485 μL 的二甲基亚砜(DMSO),震荡混匀,得甲醇标准溶液稀释 100 倍;分别用于 1 号 DMSO 处理后的样品和 2 号 DMSO 处理后的样品进行加标和稀释过膜进样测定。

c. 乙醇标准溶液。

取 100 μL 的乙醇标品,加 900 μL 的 DMSO,震荡混匀,得到乙醇标准溶液 1 号即 10 % 的乙醇标准溶液;并对 1 号标准溶液进行逐级稀释得到 1%、0.1%、0.05%、0.025%、0.005% 和 0.001% 的乙醇标准溶液,其中对 0.001%、0.005%、0.025%、0.05% 和 0.1% 乙醇标准溶液过膜进样测定得标准曲线,0.1% 乙醇标准溶液还用于 1 号 DMSO 处理后的样品和 2 号 DMSO 处理后的样品加标。

d. 乙腈处理的样品溶液。

提前将盛有绝缘油的离心管放入冰中,并将 2 支盛有 4 mL 乙腈的离心管放入冰中,在冰上将 1 号、2 号绝缘油样品分别取 4 mL 放入盛有乙腈的离心管中,间隔震荡 6 次,间隔期离心管插入冰中,震荡结束后,取上清液于离心管中以 10 000 r/min 的转速离心 5 min,取上清液分别用于糠醛加标和直接过膜进样。

e. DMSO 处理的样品溶液

提前将盛有绝缘油的离心管放入冰中,并将 2 支盛有 4 mL DMSO 的离心管放入冰中,在冰上将 1 号、2 号绝缘油样品分别取 4 mL 放入盛有 DMSO 的离心管中,间隔震荡 6 次,间隔期涡旋混匀,震荡结束后,取上清液于离心管中以 10 000 r/min 的转速离心 5 min,取上清液分别用于甲醇、乙醇的加标和直接过膜进样。

2.3 研究方法及其结果

本文的实验流程如图 2 所示,当检测某一种成分时,分别对其标品、1 号绝缘油样品、2 号绝缘油样品、1 号绝缘油样品加标品、2 号绝缘油样品加标品进行该成分的搜库,并对比各个结果的色谱图来综

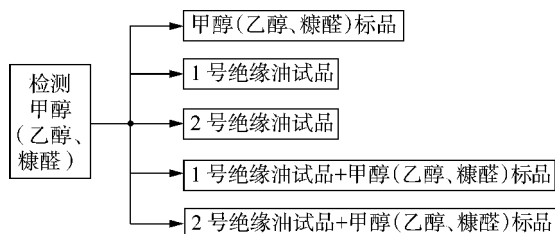


图 2 实验流程图

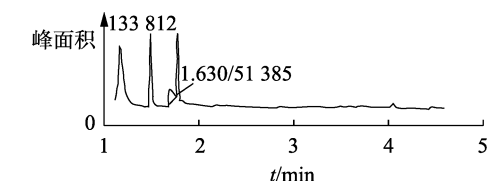
Fig.2 Flowchart of experiment

合判断该成分存在与否。

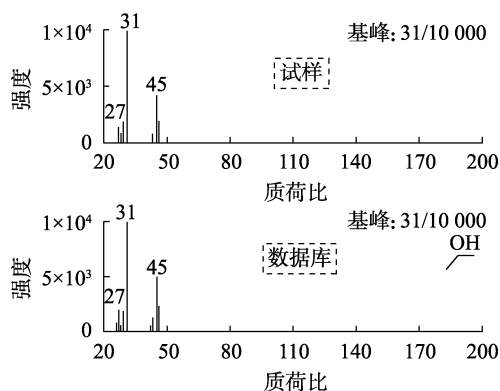
对绝缘油中的乙醇进行检测,分别对乙醇标品(0.001%)、1 号绝缘油样品(DMSO 萃取)、2 号绝缘油样品(DMSO 萃取)、1 号绝缘油样品加乙醇标品(DMSO 萃取)、2 号绝缘油样品加乙醇标品(DMSO 萃取)的 TIC 谱图进行乙醇成分的搜库,结果分别如图 3—7 所示。由图 3(b)可知,对乙醇标品进行搜库,检测出乙醇的成分。由图 4(b)可知,对 1 号绝缘油样品(DMSO 萃取)进行搜库,检测出乙醇的成分。由图 5(b)可知,对 2 号绝缘油样品(DMSO 萃取)进行搜库,检测出乙醇的成分。由图 6(b)可知,对 DMSO 萃取后的 1 号绝缘油样品加乙醇标品进行搜库,检测出乙醇的成分;对比图 4(a)与 6(a)的色谱图可知,对 1 号绝缘油样品加乙醇标品后,乙醇峰显著增加,并且与原来的保留时间基本一致,也没有新峰出现,因此可以确定原 1 号绝缘油样品中含有乙醇。同样地,可以确定原 2 号绝缘油样品中含有乙醇。对 1、2 号绝缘油样品中的乙醇含量进行测量,结果如表 4 和表 5 所示。

采用相同的方法对糠醛和甲醇进行搜库,均未检测到 2 种物质的成分,通过分析它们的色谱图,并与乙醇作对比,结果如表 6 所示。

分析甲醇和糠醛的检测结果显示,在起始条件下绝缘油样品中未检测出甲醇和糠醛,但标品与加标品的样品都有明显的糠醛和甲醇色谱峰和匹配的质谱图,证明绝缘油样品中确实未检测出这 2 种成分。可能的原因是这 2 台变压器的日常维护操作或者产物本身的性质致使其含量很低不易被有效检出。当电网中变压器运行超过 20 a 后,由于绝缘油



(a) 乙醇标品色谱图(TIC)



(b) 乙醇标品目标组分图

图 3 乙醇标品(0.001%)的检测结果

Fig.3 Detecting results of ethylalcohol standard sample(0.001%)

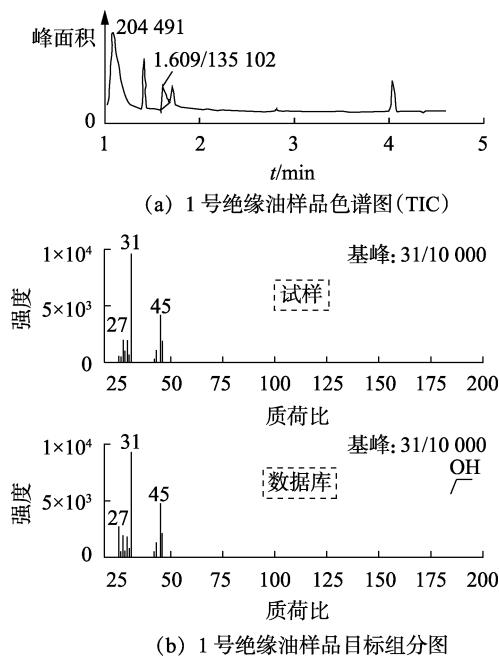


图4 1号绝缘油样品(DMSO萃取)检测结果
Fig.4 Detecting results of insulating oil sample No.1 (DMSO extraction)

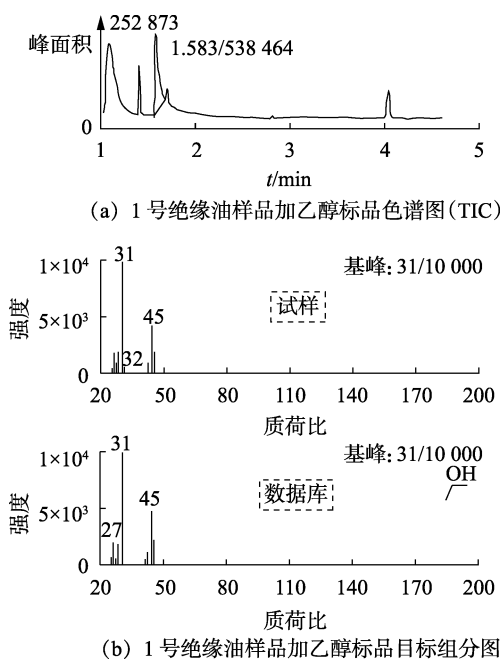


图6 DMSO萃取后1号绝缘油样品加乙醇
标品的检测结果
Fig.6 Detecting results of insulating oil sample No.1 with C_2H_5OH after DMSO extraction

表4 1号绝缘油样品中的乙醇含量
Table 4 Concentration of ethylalcohol in insulating oil sample No.1

出峰时间/min	峰面积	平均面积	乙醇含量/%
1.609	135 102		
1.602	160 306	149 146	0.006 212 5
1.601	152 030		

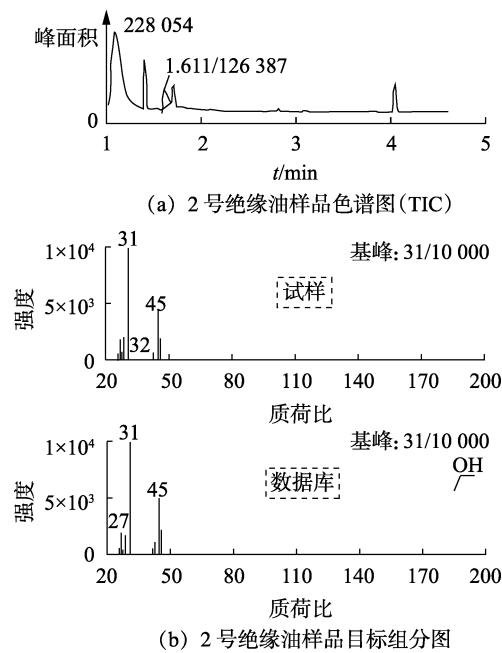


图5 2号绝缘油样品(DMSO萃取)检测结果
Fig.5 Detecting results of insulating oil sample No.2 (DMSO extraction)

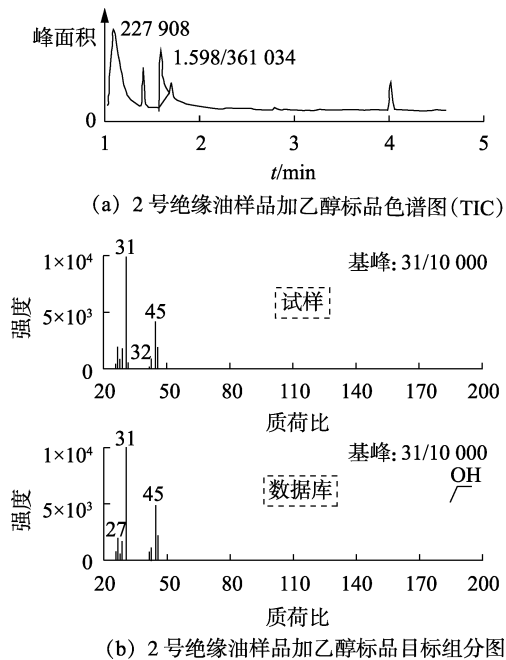


图7 DMSO萃取后2号绝缘油样品加乙醇
标品的检测结果
Fig.7 Detecting results of insulating oil sample No.2 with ethylalcohol standard sample after DMSO extraction

表5 2号绝缘油样品中乙醇含量
Table 5 Concentration of ethylalcohol in insulating oil sample No.2

出峰时间/min	峰面积	平均面积	乙醇含量/%
1.611	126 387		
1.607	147 480	147 823.3	0.006 174 0
1.602	169 603		

表 6 1 号、2 号绝缘油样品的糠醛、甲醇、乙醇的检测结果

Table 6 Detecting results of furfural, formaldehyde and ethylalcohol for insulating oil sample No.1 and No.2

成分	标品	是否含有对应成分			
		1 号绝缘油样品	2 号绝缘油样品	1 号绝缘油样品加标品	2 号绝缘油样品加标品
糠醛	是	否	否	是	是
甲醇	是	否	否	是	是
乙醇	是	是	是	是	是

注:标品是用纯乙醇稀释后制作的标品,用于进一步对比分析。

品质的逐步劣化,进行检修试验时可能会对老旧变压器进行滤油处理,会对大分子的糠醛含量产生较大的影响,而对低分子醇物质的影响则较小。另外,文献[21]还指出变压器的热虹吸过滤器也会对糠醛含量产生影响(吸附剂中的硅胶和活性氧化铝会对糠醛产生吸附作用从而降低油中糠醛含量)。而甲醇未被检测到的原因可能是由于其沸点较低,极易挥发,因此对实验检测的仪器、环境条件要求较高,不利于被检测。

进一步采用相同的检测方法对 2 台实际运行分别近 4 a(2014 年 4 月投运)和 6 a(2012 年 5 月投运)的 220 kV 变压器绝缘油样品(编号分别为 3、4)进行研究,实验结果如表 7 所示。根据表 7 结果可知,新投运的 2 台变压器由于运行和绝缘状态良好,均未检测到油中的老化特征产物。

表 7 3 号、4 号绝缘油样品的糠醛、甲醇、乙醇的检测结果

Table 7 Detecting results of furfural, formaldehyde and ethylalcohol for insulating oil sample No.3 and No.4

成分	标品	是否含有对应成分			
		3 号绝缘油样品	4 号绝缘油样品	3 号绝缘油样品加标品	4 号绝缘油样品加标品
糠醛	是	否	否	是	是
甲醇	是	否	否	是	是
乙醇	是	否	否	是	是

关于对油中溶解老化特征产物的进一步检测分析,还需要后续开展实验条件优化等一些深入的研究。但本文分别通过对 2 组新投运和实际运行已超过 25 a 变压器的油中老化产物的研究,初步证实了低分子醇如乙醇可作为一种油浸式电力变压器绝缘纸老化评估的新特征量。

3 结论

针对现有变压器绝缘老化特征量在表征纸绝缘老化状态的不足,本文对低分子醇作为变压器绝缘老化新特征量的适用性进行了理论分析与实验验证。主要工作和结论如下。

a. 通过分析绝缘纸纤维素的老化分解机理以及化学键断裂情况,从理论上探究了甲醇、乙醇等一些低分子醇的产生原理及生成途径。

b. 采用气相色谱-质谱联用法对 2 台老旧变

压器绝缘油样品进行了糠醛、甲醇以及乙醇含量的测定,实验结果表明,2 台老旧变压器中均未检测到糠醛与甲醇时,但是检测到了浓度可观的乙醇含量。

c. 理论分析和实验研究初步证实了低分子醇如乙醇可作为一种油浸式电力变压器绝缘纸老化评估的新特征量。但关于乙醇浓度与纸绝缘老化程度(如 DP)之间的表征关系以及其他低分子醇作为绝缘纸老化特征量的可能性和稳定性,本课题组后续将开展进一步的理论分析和实验研究。

参考文献:

- [1] 廖瑞金,杨丽君,郑含博,等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报,2012,27(5):1-12.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. A review of thermal aging of oil and paper insulation for power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5):1-12.
- [2] EKANAYAKE C, GUBANSKI S M, GRACZKOWSKI A, et al. Frequency response of oil impregnated pressboard and paper samples for estimating moisture in transformer insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3):1309-1317.
- [3] PREVOST T A, OOMMEN T V. Cellulose insulation in oil-filled power transformers: part I - history and development[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2006, 22(1):28-35.
- [4] XIA G, WU G, GAO B, et al. A new method for evaluating moisture content and aging degree of transformer oil-paper insulation based on frequency domain spectroscopy[J]. Energies, 2017, 10(8):1195.
- [5] LEIBFRIED T, JAYA M, MAJER N. Postmortem investigation of power transformers—profile of degree of polymerization and correlation with furan concentration in the oil[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2):886-893.
- [6] 田质广,张慧芬. 基于遗传聚类算法的油中溶解气体分析电力变压器故障诊断[J]. 电力自动化设备,2008,28(2):15-18.
TIAN Zhiguang, ZHANG Huifen. Dissolved gas analysis based on GA and FCM for power transformer fault diagnosis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(2):15-18.
- [7] 林湘宁,黄京,熊卫红,等. 变压器油中溶解气体浓度的区间预测[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):73-77.
LIN Xiangning, HUANG Jing, XIONG Weihong, et al. Interval prediction of dissolved-gas concentration in transformer oil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4):73-77.
- [8] 宋斌,刘志雄,李恩文,等. DGA 中三比值缺码研究初探[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):60-65.
SONG Bin, LIU Zhixiong, LI Enwen, et al. Preliminary study of undefined three-ratio code in DGA[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12):60-65.
- [9] 郑君亮,江修波,蔡金铤. 变压器油纸绝缘等效电路参数辨识及绝缘状态对参数的影响分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(8):168-172.
ZHENG Junliang, JIANG Xiubo, CAI Jinding. Parameter identification for equivalent circuit of transformer oil-paper insulation and effect of insulation condition on parameters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8):168-172.
- [10] BURTON P J, GRAHAM J, HALL A C, et al. Recent developments by CIGRE to improve the prediction and monitoring of transformer performance[C]//CIGRE Conference. Paris, France; CIGRE, 1984:

- 1-10.
- [11] LIN Y, YANG L, LIAO R, et al. Effect of oil replacement on furfural analysis and aging assessment of power transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2611-2619.
- [12] ABU-SIADA A, LAI S P, ISLAM S M, et al. A novel fuzzy-logic approach for furan estimation in transformer oil [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 27(3): 469-474.
- [13] 廖瑞金, 刘刚, 李爱华, 等. 不同油纸复合绝缘老化时生成 CO、CO₂ 的规律 [J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 755-760.
LIAO Ruijin, LIU Gang, LI Aihua, et al. Regularities of content of CO and CO₂ in different oil-paper insulation compositions under accelerated thermal aging test [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 755-760.
- [14] 廖瑞金, 冯运, 杨丽君, 等. 油纸绝缘老化特征产物生成速率研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 142-147.
LIAO Ruijin, FENG Yun, YANG Lijun, et al. Study on generation rate of characteristic products of oil-paper insulation aging [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 142-147.
- [15] KAN H, MIYAMOTO T, MAKINO Y, et al. Absorption of CO₂ and CO gases and furfural in insulating oil into paper insulation in oil-immersed transformers [C] // Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 1994: 41-44.
- [16] KACHLER A J, HOHLEIN I. Aging of cellulose at transformer service temperatures. part 1: influence of type of oil and air on the degree of polymerization of pressboard, dissolved gases, and furanic compounds in oil [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(2): 15-21.
- [17] 廖瑞金, 周欣, 杨丽君, 等. 变压器油中水分对糠醛扩散及分布影响的分子动力学研究 [J]. 高电压技术, 2011, 37(6): 1321-1328.
LIAO Ruijin, ZHOU Xin, YANG Lijun, et al. Impacts of water within transformer oil on the diffusion and distribution characteristics of furfural by molecular dynamics [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1321-1328.
- [18] GILBERT R, JALBERT J, T  TREAUULT P, et al. Kinetics of the production of chain-end groups and methanol from the depolymerization of cellulose during the ageing of paper/oil systems. part 1: standard wood Kraft insulation [J]. Cellulose, 2009, 16(2): 327-338.
- [19] GILBERT R, JALBERT J, DUCHESNE S, et al. Kinetics of the production of chain-end groups and methanol from the depolymerization of cellulose during the ageing of paper/oil systems. part 2: thermally-upgraded insulating papers [J]. Cellulose, 2010, 17(2): 253-269.
- [20] 闫江燕, 王学磊, 李庆民, 等. 绝缘纸高温裂解的分子动力学模拟研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5941-5949.
YAN Jiangyan, WANG Xuelei, LI Qingmin, et al. Molecular dynamics simulation on the pyrolysis of insulating paper [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5941-5949.
- [21] 李国兴, 姜子秋, 姚滨芳, 等. 热虹吸器对变压器油中糠醛测定的影响 [J]. 高电压技术, 2001, 27(1): 59-61.
LI Guoxing, JIANG Ziqiu, YAO Binfang, et al. Study of the effect of the thermosiphon bypass's runing on the furfural content in the transformer oil [J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(1): 59-61.

作者简介:



郑含博

郑含博 (1984—), 男, 河南南阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事电力变压器绝缘状态评估和智能诊断技术研究;

张懿议 (1986—), 男, 广西崇左人, 副教授, 博士后, 通信作者, 主要研究方向为电气设备绝缘在线监测与故障诊断 (E-mail: yiyizhang@gxu.edu.cn);

刘捷丰 (1985—), 男, 河北衡水人, 工程师, 博士, 主要研究方向为大型油浸式变压器绝缘在线监测与故障诊断;

房加珂 (1994—), 男, 安徽淮北人, 硕士研究生, 主要研究方向为大型油浸式变压器绝缘在线监测与故障诊断 (E-mail: 2581046845@qq.com)。

Novel characteristic products of paper insulation aging assessment for oil-immersed power transformer

ZHENG Hanbo^{1,2}, ZHANG Yiyi¹, LIU Jiefeng^{1,3}, FANG Jiakel¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;

3. Hebei Electric Power Dispatching and Control Center, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: The furfural content in oil may dispersedly change along with the operating time of transformer, which makes it difficult to evaluate the paper insulation aging status of oil-immersed transformers. To overcome this shortage, the methanol, ethanol and other low molecular alcohols are theoretically analyzed and experimentally verified as new characteristic products of paper insulation aging evaluation. The generation principles and ways of low molecular alcohols such as methanol and ethanol are theoretically explored by analyzing the aging mechanism of insulating paper and the order of chemical bond breaking. The content of furfural, methanol and ethanol in two groups of insulating oil samples obtained from two old transformers are measured by gas chromatography-mass spectrometry. The experimental results show that no furfural but a considerable amount of ethanol is detected in the two groups of samples. Moreover, the detecting results of the two transformers newly put into operation are compared, the results show that compared with furfural, ethanol can be used as a more effective characteristic product to present the aging of transformer insulation paper.

Key words: oil-immersed transformers; paper insulation; aging assessment; ethanol; low molecular alcohols