

变压器用酯类绝缘液浸渍纸系统模拟低温热故障下的 DGA 分析

马耀翔¹, 王 远¹, 潘可欣¹, 宋浩永², 王 炜², 徐 阳¹

(1. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510000)

摘 要: 变压器用环境友好绝缘液的应用近年得到了快速发展, 天然酯、合成酯和改性酯等绝缘液成为变压器新型绝缘材料研究的热点。随着其在 110 kV 及以上变压器中的推广应用, 矿物油填充变压器的溶解气体分析(DGA)故障诊断方法对酯类绝缘液填充变压器不再适用, 亟需针对酯类绝缘液提出新的故障分析与诊断的方法。本文将设计的考虑铜油温差的热故障模拟系统用于低温热故障试验, 以大豆基天然酯、菜籽基天然酯、山茶籽基天然酯、合成酯和棕榈基改性酯 5 种绝缘液为研究对象, 对比分析了其在 200℃ 和 300℃ 低温热故障时纯绝缘液和绝缘液浸渍纤维素纸绝缘系统下的油中溶解气体实验结果, 并讨论了 IEC 三比值法和 Duval 五边形法两种判据方法的适用性。结果表明: IEC 三比值法仍适用于天然酯、合成酯的 200℃ 和 300℃ 低温热故障判定; Duval 五边形法能够用于天然酯的低温热故障判定, 经修正调整可对合成酯进行判定, 但是改性酯的 DGA 判定结果与矿物油、天然酯判据规律不一致, 基于矿物油的 Duval 五边形法不适用于棕榈基改性酯的低温热故障判定。

关键词: 变压器; 酯类绝缘液; 低温热故障; 溶解气体分析; 故障判定

中图分类号: TM214 **DOI:** 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.03.013

DGA analysis on ester insulating liquid impregnated paper system for transformer under simulated low temperature thermal fault

MA Yaoxiang¹, WANG Yuan¹, PAN Kexin¹, SONG Haoyong², WANG Wei², XU Yang¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University,

Xi'an 710049, China; 2. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd.,

Guangzhou 510000, China)

Abstract: The environment-friendly insulating fluid for transformer has developed rapidly in recent years, insulating liquids such as natural ester, synthetic ester, and modified ester have become the research focus of new insulating material for transformer. With their applications in 110 kV and above transformers, the dissolved gas analysis (DGA) fault diagnosis method of mineral oil filled transformer is no longer suitable for the ester insulating liquid filled transformer. In this paper, a thermal fault simulation system with temperature difference between copper and liquid was designed to simulate the low temperature thermal fault. The soybean, rapeseed, camellia based natural ester, synthetic ester, and palm based modified ester insulating liquids were used as research object, the experimental results of dissolved gas in pure liquid and liquid-paper insulating system under 200℃ and 300℃ low temperature thermal fault were analyzed, and the applicability of the IEC ratio method and Duval pentagon method were discussed. The results show that the IEC ratio method is still applicable to 200℃ and 300℃ low temperature thermal fault diagnosis of natural esters and synthetic ester. The Duval pentagon method can be used to recognize the low temperature thermal fault of natural esters and synthetic ester after adjustment. However, the DGA results of modified ester are inconsistent to those of mineral oil and natural esters, and the Duval pentagon method based on mineral oil is not suitable for the low temperature thermal fault diagnosis of palm based modified ester.

Key words: transformer; ester insulating liquid; low temperature thermal fault; dissolved gas analysis; fault diagnosis

0 引言

随着国内外对于变压器绝缘液防火安全和环

境友好特性的关注, 燃点为 165℃ 左右且生物降解率低于 30% 的矿物油难以满足防火与环保的需求^[1-2], 于是合成酯、天然酯等高燃点且可生物降解的替代绝缘液体得到快速发展。

基金项目: 南方电网公司科技项目(GZHKJXM20170063)

按照 IEC 标准的定义,天然酯结构须为甘油三酸酯,如图 1 所示,其燃点超过 300℃,28 天的自然降解率达到 98%,被广泛应用于电力变压器中^[3-4]。目前国内挂网投运的最高电压等级天然酯变压器为南方电网的 110 kV/50 MVA 变压器,其填充的绝缘液为菜籽基天然酯^[5];国际上最高电压等级的天然酯变压器为 2014 年西门子公司研制的 420 kV/300 MVA 变压器,并在德国挂网运行^[5];2017 年意大利 TAMINI 公司生产了两台 420 kV/375 MVA 变压器,填充的绝缘液均为大豆基天然酯^[6];2021 年印度也挂网投运了 420 kV 天然酯电抗器。合成酯的结构为无卤素季戊四醇酯,其已使用的最高电压等级为 400 kV^[7],具有良好的防火安全性与环保性,常与热改性纸(TUK)或芳纶纸(Nomex)配合用于对绝缘系统有更高耐热等级要求的应用场景。棕榈脂肪酸酯(palm fatty acid ester, PFAE)由棕榈油与醇进行酯交换反应得到,在 IEC 63012-2019 中定义为改性酯^[8],其既具有合成酯和天然酯的环保特性,又具有低黏度以及良好的氧化安定性^[9],但燃点与闪点不高。日本明电舍生产的 PFAE 配电变压器最高电压等级为 77 kV/30 MVA^[10]。

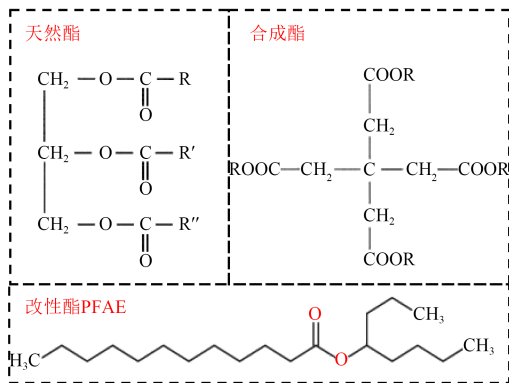


图 1 酯类绝缘液化学结构

Fig.1 Chemical structure of ester insulating liquids

依据 IEC 60599-2015 标准^[11],变压器热故障可分为低温热故障($T < 300^\circ\text{C}$)、中温热故障($300^\circ\text{C} < T < 700^\circ\text{C}$)和高温热故障($T > 700^\circ\text{C}$),其中低温过热故障主要是由过载导致的大电流通过线圈造成的。油中溶解气体分析(dissolved gas analysis, DGA)作为一种通过检测油中溶解气体来反映变压器内部故障的技术手段,被广泛应用于矿物油大型电力变压器。目前对于矿物油的 DGA 故障判定方法主要来源于 IEEE C57.104 中的状态法、Rogers 比例法、关键气体法^[12]以及 IEC 60599-2015 中给出的 Duval 三角形法、三比值法等。但是由于酯类绝缘液化学组分与传统矿物油具有较大差异,甚至不同种子基的天然酯产气规律也有所差异,因此基于矿物油的

DGA 判据已不适用。由于目前全球范围内酯类绝缘液变压器运行后的故障数据尚有不足,而运行单位又亟需有效的分析判断方法来指导电力变压器的运行维护,实验室研究模拟故障下的油中溶解气体成为必要补充,并且有助于了解其产气机理。国内外已有学者在实验室基础上对天然酯和合成酯热故障下的产气规律进行研究, M JOVALEKIC 等^[13]与 WANG Z D 等^[14]对大豆基天然酯 FR3 进行了 300~600℃ 的热故障模拟,结果表明 FR3 在 300℃ 和 400℃ 下的主要特征气体为 C_2H_6 、CO 和 CO_2 ; D HANSON 等^[15]对大豆基、菜籽基、高油酸葵花籽基天然酯绝缘液进行了热故障模拟,发现三者都产出大量的 CO 和 CO_2 ,大豆基和菜籽基天然酯中有大量 C_2H_6 产生,而高油酸葵花籽基天然酯中的 H_2 和 CH_4 百分含量更高;袁帅等^[16]和蔡胜伟等^[17]对大豆基天然酯进行热故障模拟,发现天然酯绝缘液在热故障下会产生大量的 CO 和 CO_2 ,低温热故障下大豆基天然酯中产生的主要特征气体为 CO_2 和 C_2H_6 。对于合成酯, WANG X F 等^[18]研究发现中、低温热故障下合成酯产生的主要烃类气体为 C_2H_6 ,同时也生成了较多的 CH_4 和 C_2H_4 ; P PRZYBYLEK 等^[19]研究认为 C_3H_8 与 C_2H_6 是合成酯中温热故障下的主要特征气体。目前基于改性酯热故障下的产气数据很少,同时国内外实验室已有的低温热故障模拟装置存在的弊端是加热方式大多用烘箱加热密封罐中的绝缘材料,没有准确模拟变压器的绝缘结构,不能反映实际变压器绝缘系统在发生热故障时存在的不同温度梯度。

本文参考 IEC 62332-1-2011 标准^[20]设计了考虑铜油温差的热故障模拟系统,实验装置包含变压器主绝缘材料,模拟变压器绕组绝缘结构,并将该系统应用于温度为 300℃ 的模拟热故障实验。以大豆基天然酯、菜籽基天然酯、山茶籽基天然酯、合成酯和棕榈基改性酯绝缘液为研究对象,对比其在变压器典型 200℃ 和 300℃ 低温热故障下的产气特征,分析纯绝缘液和酯类绝缘液浸渍纤维素纸的油中溶解气体实验结果的差异。对比不同种类酯类绝缘液的产气特征,讨论 IEC 三比值法和 Duval 五边形法的适用性。最后以大豆基天然酯为例,研究热故障模拟装置使用材料种类及比例不同时产气特征的变化规律。

1 低温热故障模拟实验

1.1 试样的基本理化性能对比

对以下 5 种绝缘液进行低温热故障的模拟与对比分析:嘉吉公司的大豆基天然酯 FR3、卓原新材的

菜籽基天然酯 RAPO、重庆大学研发的山茶籽基天然酯 RDB、Midel 公司的合成酯 Midel 7131、日本 AE 帕瓦株式会社和狮王公司生产的棕榈基改性酯 PFAE。化学分子结构以及脂肪酸类型与含量不同是导致绝缘液理化性能不同的原因,综合厂家说明书、文献及测试报告^[21-23],表 1 列出了 5 种酯类绝缘液的基本理化性能,其中 3 种天然酯绝缘液的开口闪点均超过 300℃。由于天然酯和合成酯的相对分子量远大于改性酯,它们拥有更高的黏度。天然酯的倾点较改性酯和合成酯都高,因此一般通过添加降凝剂的方法来改善天然酯的低温性能^[24]。实验中使用的绝缘纸为皱纹纸 35Hc,其断裂伸长率为 50%。

表 1 酯类绝缘液的基本理化性能

Tab.1 Basic physical and chemical properties of ester insulating liquids

检测项目	天然酯			改性酯	合成酯
	大豆基	菜籽基	山茶籽		
密度(20℃)/(g/cm ³)	0.92	0.92	0.91	0.86	0.97
倾点/℃	-21	-21	-19	-33	-56
闪点/℃(开口)	330	322	312	176	275
运动黏度(40℃)/(mm ² /s)	33.5	35.8	39.9	5.1	28.0
总酸值/(mgKOH/g)	0.026	0.019	0.040	0.010	0.028
击穿电压(2.5 mm)/kV	73	78	69	81	78
相对介电常数(25℃)	3.2	3.1	2.8	2.9	3.2
tanδ(90℃)/%	0.009	0.008	0.004	0.013	0.015

1.2 低温热故障模拟装置

1.2.1 考虑铜油温差加热装置

本文参考 IEC 62332-1 标准设计了考虑铜油温差的热故障模拟系统,如图 2 所示。考虑铜油温差的热故障实验腔体采用不锈钢材料,在罐体尾部设置有取油/注油阀门,罐体顶部有抽真空/注氮气阀门,同时接有气压表以监测罐体内部气压,同时顶部设置有泄压阀,当罐体内部气压超过设定值 0.5 MPa 后,泄压阀将自动打开,起安全保护作用。

考虑铜油温差的热故障模拟系统由两套独立作用的加热系统组成,如图 3 所示。高温处加热部分采用紫铜导体模拟变压器绕组,在绝缘液浸渍纤维素纸的绝缘体系下,通过电流互感器使 M 型紫铜导体内部流过大电流从而对绕包在表面的绝缘纸及纸板进行加热,另外将 K 型热电偶测温探头埋入紫铜导体中部来监测模拟热故障时的热点温度。加热管负责绝缘液的加热,并与低温处固体绝缘相互配合形成低温处加热系统。油温控制系统通过 K 型热电偶实时监测热点温度和油温,并将热信号转

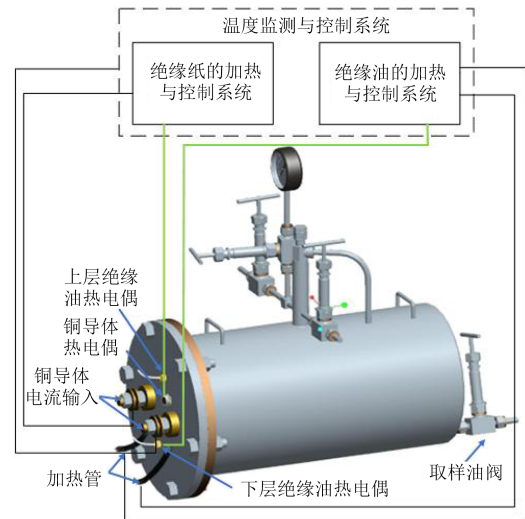


图 2 考虑铜油温差的热故障模拟系统

Fig.2 The thermal fault simulation system considering temperature difference between copper and liquid

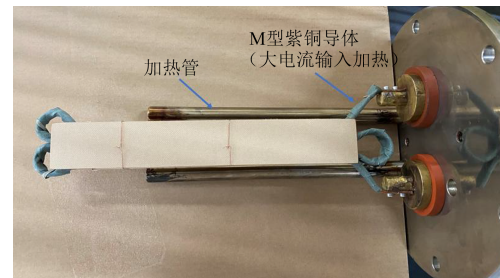


图 3 加热系统与高温处固体绝缘

Fig.3 Heating system and high-temperature solid insulation

化为电信号传送给 PID 控制器,进而输出控制继电器通断的电信号,影响加热回路。整个考虑铜油温差的热故障模拟系统通过加热单元和控制单元相互配合,能够模拟真实变压器内部绕组与其他部件的温差,更加接近变压器绕组结构局部低温热故障,使实验结果更具有说服力和准确性。

1.2.2 实验材料

根据所处的温度环境和功能,固体绝缘分为高温区和低温区。高温处固体绝缘包括绕包在铜导体上的绝缘纸及纸板,在铜导体上绕包纤维素纸模拟变压器绕组的真实状态,绝缘纸板同时起保温的作用,如图 3 所示。低温处固体绝缘可模拟实际变压器固体绝缘中的垫块、木条以及边角处的保护环,同时与高温处绝缘配合形成油流通道。另外在实验腔体底部放置硅钢片来等效变压器的铁心材料,金属铜、铁在热解过程中均有催化作用。

IEC 62332-1 标准给出了考虑铜油温差的热故障模拟系统内部各个材料的用量比例。结合实验腔体的容积、绝缘液的热膨胀系数等参数,本文所采用的实验材料用量如表 2 所示,其中整个热故障

模拟系统使用的绝缘液体积为 8 L。

表2 实验材料的用量或比例

Tab.2 Test material quantities or ratios

材料	用量或比例
高温处固体绝缘/cm ³	16
绝缘纸	363
绝缘纸板	912
低温处固体绝缘/cm ³	8 000
绝缘液体积/cm ³	170
铁心表面积/cm ²	2.41
低温处固体绝缘/高温处固体绝缘	0.114
低温处固体绝缘/绝缘液体	0.048
高温处固体绝缘/绝缘液体	5.36
低温处固体绝缘/铁心表面积	

2 结果与讨论

2.1 模拟热故障下油中溶解气体测定

对 5 种酯类绝缘液进行脱气除水预处理后进行 200℃ 和 300℃ 的热故障模拟, 之后采用中分 2000B 气相色谱仪测试低温热故障下 H₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂、CO 和 CO₂ 的绝对含量, 仪器最低的检出限为 0.05 μL/L。表 3 列出了 5 种绝缘液中 CO、CO₂ 和 C₂H₆ 的绝对含量。图 4 为 3 种天然酯特征气体 H₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄ 和 C₂H₂ 的百分含量。由图 4 可知, 在低温热故障模拟下, 由于故障能量不足以使绝缘液分解产生 C≡C, 均未产生 C₂H₂ 气体。对于 3 种天然酯绝缘液, 由于其化学结构均为甘油三酸酯, 其产气特征基本相似。C₂H₆ 均是除 CO 和 CO₂ 外的主要特征气体产物, C₂H₆ 的百分含量随温度的升高而降低, H₂、CH₄、C₂H₄ 的百分含量随温度的升高而上升, 且绝缘液浸渍纤维素纸体系下均生成了更多的 CH₄, 可能的原因是在绝缘液热解生成少量 CH₄ 的基础上, 绝缘纸也会热降解生成 CH₄, 该实验结论与文献[25]的结果基本一致。

200℃ 时 3 种天然酯在纯绝缘液和绝缘液浸渍纤维素纸体系下的产气规律基本一致, 但是在 300℃ 下 3 种不同天然酯产生的特征气体百分含量有差异, 如表 4 所示。大豆基天然酯浸渍纤维素纸体系下 C₂H₆ 的百分含量为 37.86%, 远小于纯绝缘液体系的 62.11%, 绝缘液浸渍纤维素纸体系下 CH₄、C₂H₄ 的占比更高。菜籽基天然酯绝缘液浸渍纤维素纸体系和纯绝缘液体系下 C₂H₆ 的百分含量均约为 50%。山茶籽基天然酯在绝缘液浸渍纤维素纸体系下 C₂H₆ 的百分含量较纯绝缘液体系有所增加, C₂H₄ 含量降低。因此对于不同种类天然酯, 需要不同边界条件的热故障判定方法。

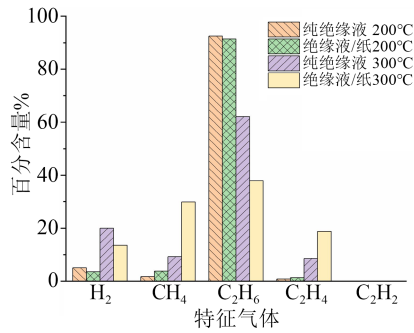
表3 CO、CO₂和C₂H₆的绝对含量

Tab.3 The content of CO, CO₂, and C₂H₆

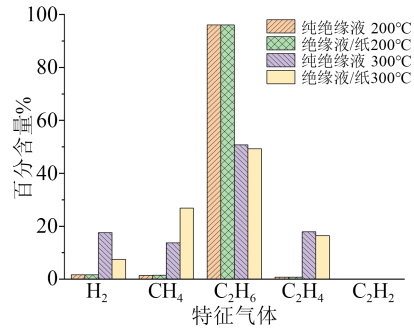
绝缘油		温度/℃	CO	CO ₂	C ₂ H ₆
大豆基	纯绝缘液	200	120.55	739.54	599.90
		300	1 410.47	3 109.09	995.98
天然酯	绝缘液/纸	200	1 583.60	69 068.92	1 221.39
		300	22 825.46	375 494.34	517.78
菜籽基	纯绝缘液	200	180.79	2 335.63	2 093.81
		300	20 409.64	29 466.51	5 263.53
天然酯	绝缘液/纸	200	1 246.03	68 702.88	2 274.35
		300	19 368.58	359 874.71	646.88
山茶籽基	纯绝缘液	200	574.67	3 624.40	1 575.06
		300	38 236.83	121 369.61	7 151.54
天然酯	绝缘液/纸	200	1 498.01	66 986.08	1 648.00
		300	35 777.17	560 381.21	1 901.68
改性酯	纯绝缘液	200	348.14	1 836.35	66.61
		300	3 922.46	35 942.90	772.02
合成酯	绝缘液/纸	200	1 745.73	111 336.78	28.02
		300	25 834.42	542 969.97	781.56
天然酯	纯绝缘液	200	220.86	1 914.96	15.39
		300	9 284.44	15 037.00	3 093.16
合成酯	绝缘液/纸	200	2 714.91	66 191.35	31.39
		300	41 752.80	617 273.30	453.71

合成酯特征气体的百分含量如图 5 所示。由图 5 可知, 合成酯在纯绝缘液体系和绝缘液浸渍纤维素纸体系下的产气规律有较大差异。在纯绝缘液低温热故障下, H₂、CH₄ 的百分含量随着温度的升高而降低, C₂H₆ 的百分含量随着温度的升高而上升; 但是绝缘液浸渍纤维素纸体系下的低温热故障产气规律恰恰相反。改性酯特征气体的百分含量如图 6 所示。由图 6 可知, 对于改性酯, 可以认为 CH₄ 和 C₂H₆ 是低温热故障下的主要特征气体, CH₄ 百分含量随温度的升高而降低, C₂H₆ 的百分含量随温度的升高而上升, 绝缘液浸渍纤维素纸绝缘体系下含有更多的 H₂ 与更少的 C₂H₆。图 7 为 3 种酯类在纯绝缘液体系下的产气特性。由图 7 可知, 在低温热故障区域的相同工况下, 合成酯与改性酯均比天然酯生成了更多的 CH₄ 和更少的 C₂H₆, 且与天然酯纯绝缘液情况下 C₂H₆ 百分含量随温度升高大幅降低相比, 合成酯与改性酯纯绝缘液体系下 C₂H₆ 的百分含量随温度升高而有所上升。因此, 基于三者的产气特征与规律, 合成酯、改性酯的 DGA 判据无法与天然酯共用, 需要提出新的故障判定方法。

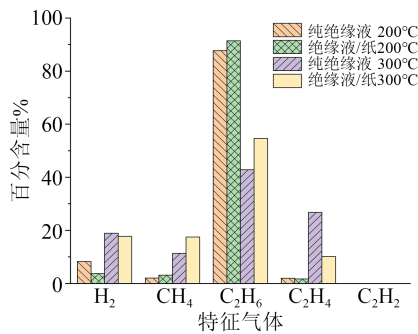
综上所述, 在纯绝缘液低温热故障模拟下, 3 种天然酯的主要特征气体均是 C₂H₆, 且 C₂H₆ 的百分含



(a)大豆基天然酯绝缘液



(b)菜籽基天然酯绝缘液



(c)山茶籽基天然酯绝缘液

图4 天然酯油中溶解气体相对含量

Fig.4 The relative content of key gases in natural ester

表4 300°C下特征气体相对百分含量

Tab.4 The relative percentage content of key gases at 300°C

特征气体	大豆基天然酯		菜籽基天然酯		山茶籽基天然酯	
	纯绝缘液	绝缘液/纸	纯绝缘液	绝缘液/纸	纯绝缘液	绝缘液/纸
H ₂ /%	20.03	13.54	17.60	7.48	18.48	17.73
CH ₄ /%	9.27	29.86	13.74	26.83	11.43	17.47
C ₂ H ₆ /%	62.11	37.86	50.73	49.22	43.10	54.68
C ₂ H ₄ /%	8.58	18.75	17.93	16.46	26.98	10.12
C ₂ H ₂ /%	0	0	0	0	0	0

量随温度的升高而降低，H₂、CH₄、C₂H₄的百分含量随温度的升高而上升，其中涉及到的主要化学反应为式(1)。



反应式(1)向右进行为吸热熵增的过程^[26]，随温

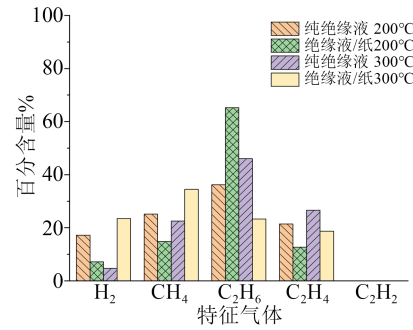


图5 合成酯油中溶解气体相对含量

Fig.5 The relative content of key gases in synthetic ester

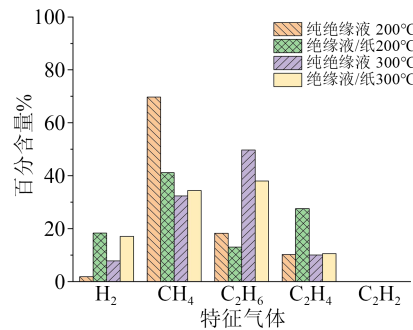


图6 改性酯油中溶解气体相对含量

Fig.6 The relative content of key gases in modified ester

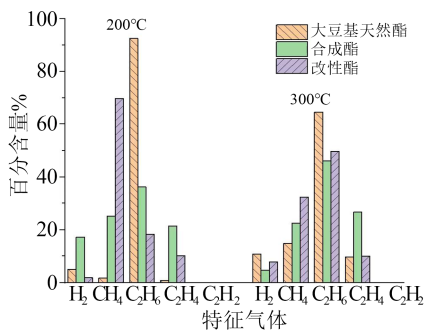


图7 3种酯类在纯绝缘液体系下的产气特性

Fig.7 Gas production characteristics of three esters in pure insulating liquid system

度的升高，化学反应的吉布斯自由能变 ΔG 下降，即C₂H₆随温度升高更有效地转化为C₂H₄+H₂，但是不同种子基天然酯中甘油三酸酯种类和含量的不同导致故障特征气体的比例有一定差异。此外，由于合成酯和改性酯中不含碳碳双键，与天然酯相比，不存在C=C双键 β 位置的C-C键容易断裂^[27]，因此它们生成C₂H₆的百分含量比天然酯更少，但生成CH₄的百分含量更多。

2.2 考虑铜油温差热故障模型的产气特征

图8收集了IEEE C57.155及两种外部加热法针对大豆基天然酯FR3在绝缘液浸渍纤维素纸体系下的低温热故障模拟结果。其中IEEE C57.155的附录E记录了EPRI实验室设计的一种模拟变压器

的小型测试装置,包括不锈钢容器、缠绕热改进纸的铜导体及铁心,使绝缘液在热点区域循环实现热故障模拟。两种外部加热法分别采用管式炉和不锈钢加热圈通过热传递对盛装绝缘液的容器进行加热,从而使绝缘液局部升温^[28-29]。由图8可知,与考虑铜油温差热故障模型得到的实验结果相比,4种方法在绝缘液浸渍纤维素纸体系下的200℃热故障产气特征基本一致。在300℃绝缘液浸渍纤维素纸体系下的热故障,考虑铜油温差模型模拟得到的产气特征与IEEE C57.155标准给出的产气特征相同,C₂H₆百分含量为40%左右,远小于两种外部加热法得到的90%的C₂H₆产量。同时,外部加热法生成更少的CH₄、C₂H₄、H₂。这不仅需考虑CIGRE报告中提到的实验模拟装置的不同对产气影响是不可忽视的^[30],还可能是因为考虑铜油温差模型及IEEE C57.155标准提到的实验装置的设计与实际的变压器相结合,装置内部包含了典型变压器的内部材料(如铜导体、绝缘纸、硅钢片等)且材料按典型比例设计;而外部加热法只是将绝缘液与纤维素绝缘纸按质量比为15:1混合后进行实验。说明进行300℃低温热故障模拟时,使用材料的种类及比例不同,绝缘液产气特征也不尽相同。结合较高温度下铜对绝缘液的热分解反应有一定的催化作用,但不影响各种特征气体的相对含量这一结论^[31],可以推测固液绝缘的比例是影响大豆基天然酯产气特征的主要因素,固体绝缘比例越大,导致油中溶解气体C₂H₆的百分含量明显减少,这可能与固体绝缘对特征气体或特征官能团的吸附作用有关。

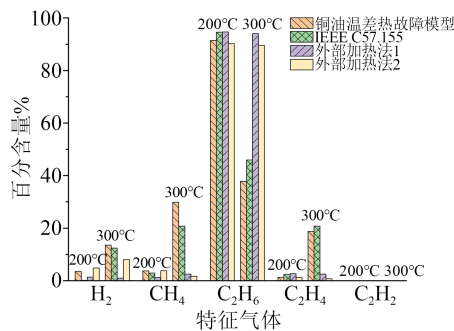


图8 不同方法下大豆基天然酯的产气特征对比

Fig.8 Comparison of gas production characteristics in soybean based natural ester under different methods

2.3 天然酯绝缘液的故障判定

目前,IEEE C57.155与CIGRE Technical Brochure 443已对酯类绝缘液的DGA技术提出了相应的导则,针对天然酯、合成酯的故障判定方法十分有限,主要为Duval三角形和五边形两种判定方法,

但是Duval三角形法只选用了CH₄、C₂H₄和C₂H₂3种特征气体进行判据。由上文产气特征可知,酯类绝缘液低温热故障下的主要特征气体都包含有C₂H₆,所以Duval三角形法并不适用于低温热故障的判据。本文将5种酯类绝缘液热故障下的DGA测试值经各自的奥斯特瓦尔德系数校正后与IEEE C57.155中的典型值进行比较,带入IEC三比值法和Duval五边形法,评估上述方法对这5种酯类绝缘液低温热故障下故障判定的适用性。

2.3.1 IEC三比值法

IEC 60599-2015中给出的三比值法是从矿物油中溶解气体中选取5种组成3个比值,即C₂H₂/C₂H₄、CH₄/H₂和C₂H₄/C₂H₆,然后通过3种气体比例的大小关系进行分类,判断绝缘液的故障类型。

若将该方法直接用于酯类绝缘液,将5种气体的DGA测试值进行计算并对照IEC三比值法的判据表,则纯绝缘液下的故障判定结果如表5所示,绝缘液浸渍纤维素纸体系下的故障判定结果如表6所示。

表5 纯绝缘液体系下的DGA判定结果

Tab.5 DGA results under pure insulating liquid system

类型	温度	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	故障
大豆基天然酯	200℃	0	0.34	0.01	T1
	300℃	0	0.46	0.14	T1
菜籽基天然酯	200℃	0	0.85	0.01	T1
	300℃	0	0.78	0.35	T1
山茶籽天然酯	200℃	0	0.30	0.013	T1
	300℃	0	0.62	0.63	T1
合成酯	200℃	0	1.46	0.59	T1
	300℃	0	4.76	0.58	T1
改性酯	200℃	0	38.54	0.56	T1
	300℃	0	4.12	0.20	T1

表6 绝缘液浸渍纤维素纸体系下的DGA判定结果

Tab.6 DGA results under oil-paper system

类型	温度	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	类型
大豆基天然酯	200℃	0	1.08	0.014	T1
	300℃	0	2.21	0.50	T1
菜籽基天然酯	200℃	0	0.90	0.01	T1
	300℃	0	3.59	0.33	T1
山茶籽天然酯	200℃	0	0.89	0.02	T1
	300℃	0	0.99	0.19	T1
合成酯	200℃	0	1.78	0.15	T1
	300℃	0	1.52	0.63	T1
改性酯	200℃	0	2.21	1.82	T2
	300℃	0	1.90	0.24	T1

由表 5~6 可知,除了在绝缘液浸渍纤维素纸体系下,改性酯在 200℃ 下的热故障被判定为 T2(中温热故障)外,其余绝缘液故障类型均准确判定为 T1 低温热故障。说明针对矿物油编制的 IEC 三比值法对天然酯、合成酯的低温热故障判定仍然基本适用,这是因为裂解生成 C₂H₄ 需要的能量密度大于 C₂H₆,所以低温情况下提供的能量不足以使 C₂H₄/C₂H₆ 的比值大于 1。另外随着温度的升高,天然酯 C₂H₄/C₂H₆ 的比值呈上升趋势,说明只要能找到 T1 和 T2 故障判定的中间值,对整个温度梯度下的 IEC 三比值法进行修正是有可能的。

2.3.2 Duval 五边形法

在酯类绝缘液开推广应用后, Duval 为了修正他本人提出的三角形法的不足,尝试提出了使用 5 种典型故障气体 H₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄ 和 C₂H₂ 对故障类型进行判定的 Duval 五边形法^[32],与 IEC 三比值法使用的 5 种气体相同。Duval 通过对 300 多组现场以及实验室模拟数据进行统计,提出了适用于矿物油、大豆基和菜籽基天然酯、合成酯的 Duval 五边形^[33]。山茶籽基天然酯的脂肪酸类型与菜籽基天然酯更相似,均是单不饱和脂肪酸含量较多,所以选用菜籽基天然酯的 Duval 五边形对山茶籽基天然酯 DGA 结果进行近似分析。A RAJAB 等对不饱和程度不同的单酯结构绝缘液进行研究,得出饱和程度较高的单酯结构绝缘油的产气趋势与矿物油较为类似^[34],因此选用矿物油的 Duval 五边形对棕榈基改性酯 DGA 结果进行分析。

5 种酯类绝缘液的 Duval 五边形判据如图 9 所示。由图 9(a)~(b)可知,天然酯绝缘液的 DGA 结果全部落在了 T1(低温热故障)区域,说明 Duval 五边形法对于天然酯低温热故障判定具有良好的适应性。此外,3 种天然酯的 DGA 结果随着温度的升高会向 T1 与 T2 的边界移动,与 IEC 三比值法中 C₂H₄ 与 C₂H₆ 的比值上升结果一致。由图 9(c)可知,合成酯在 200℃ 绝缘液浸渍纤维素纸条件下的故障判定类型为 S(杂散气体),其中 IEC 中解释 S 表示杂散产气,指不存在故障的正常使用及过载条件下的产气现象。虽然如此,合成酯低温热故障的 Duval 五边形判定结果基本在在 T1 内部与附近,更多的 DGA 故障数据将对五边形边界进行修正,从而达到更高的故障判定准确率。由图 9(d)可知,棕榈基改性酯在 200℃ 绝缘液浸渍纤维素纸绝缘条件下的故障判定为 T2(中温热故障),与 IEC 三比值法的判定一致,但均不符合实验温度是低温区间的事实。而且在低温热故障区间,随着温度的升高,DGA 判定改性酯的结果会向着 S 和 T1 的边界移动,与其他种

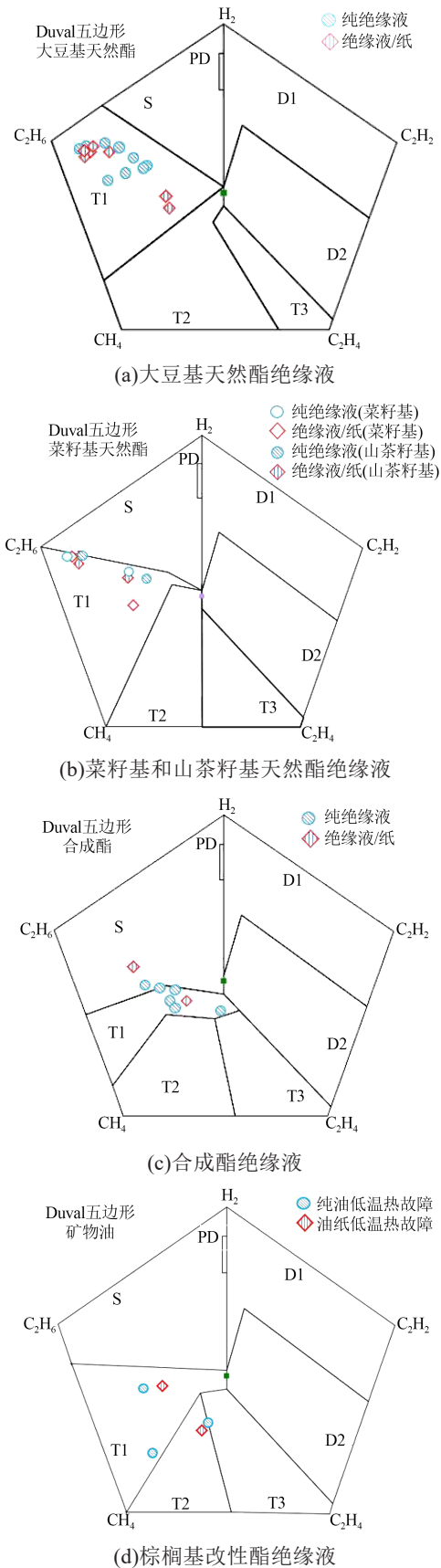


图 9 绝缘液的 Duval 五边形判定

Fig.9 Duval pentagon diagnose of insulating oils

类绝缘液判据现象相反,说明基于矿物油的 Duval 五边形不适用于棕榈基改性酯的故障判定,需要对

五边形的区域范围进行重新调整。CIGRE 工作组 D1.32 也提到,目前非矿物油 DGA 故障诊断方法的部分边界值是根据矿物油与非矿物油的产气规律外推得到,尤其涉及变压器真实故障时比实验室模拟更加复杂,所以未来需要充裕的 DGA 数据库对诊断方法进行调整。

3 结论

本文设计了考虑铜油温差的热故障模拟系统,并将系统应用于 300℃ 的 DGA 模拟低温热故障实验,更准确地模拟了变压器发生故障时的温度梯度。对大豆基、菜籽基、山茶籽基 3 种天然酯绝缘液、合成酯绝缘液和棕榈基改性酯绝缘液进行了纯绝缘液和绝缘液浸渍纤维素纸情况下的低温热故障模拟实验,并将产气规律的变化与故障判据相联系,得到以下结论:

(1)IEC 三比值法与 Duval 五边形法对不同种类天然酯 200~300℃ 的低温热故障判定均具有适用性。由于 3 种天然酯绝缘液的结构均为甘油三酸酯,低温热故障下产气规律基本相似,特征气体的百分含量由于脂肪酸构成不同存在差异,因此对于不同种类天然酯的热故障判定,IEC 三比值法和 Duval 五边形法需要不同边界条件的判定方法,关键点在于找到 T1 和 T2 与 T2 和 T3 边界故障判定处 C_2H_4/C_2H_6 的比值。

(2)针对矿物油编制的 IEC 三比值法对合成酯的低温热故障判定仍然具有适用性,但与矿物油的 IEC 三比值法中 CH_4/H_2 的比值大小对 T1 的判定结果不重要相比, CH_4/H_2 的比值对合成酯 S 和 T1 及 T1 和 T2 的分界均有重要的意义。合成酯的 Duval 五边形中,不同等级热故障边界位置需要更多热故障的 DGA 数据进行修正调整。

(3) CH_4 和 C_2H_6 是棕榈基改性酯在低温热故障下的主要特征气体产物,在 Duval 五边形中改性酯的 DGA 判定结果会随着温度的升高向着 S 和 T1 的边界移动,与矿物油和天然酯判据规律不一致,说明基于矿物油的 IEC 三比值法和 Duval 五边形法不适用于棕榈基改性酯的低温热故障判定。

参考文献:

- [1] FOFANA I. 50 years in the development of insulating liquids[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2013,29(5):13-25.
- [2] OOMMENT V. Vegetable oils for liquid-filled transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2002,18(1):6-11.
- [3] RAFIQ M, LV Y Z, ZHOU Y, et al. Use of vegetable oils as transformer oils - a review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews,2015,52(12):308-324.
- [4] PERRIER C, BEROUAL A. Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: Mineral, ester, and silicone oils[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2009,25(6):6-13.
- [5] 蔡胜伟,李华强,黄芝强,等.天然酯绝缘液变压器技术发展及应用概况[J].绝缘材料,2019,52(11):9-16.
- [6] VAGNER V, ALAN S, CERA Z L, et al. Increased loadability of transformers using natural ester and cellulosic materials as high temperature insulation systems[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2018,34(5):8-17.
- [7] JARMAN P, HAMPTON K, LASHBROOKE M, et al. Reliable, optimised power transformers with heat recovery for urban areas [J]. Transformers Magazine,2017,4(2):84-90.
- [8] International Electrotechnical Commission. Insulating liquids - Unused modified or blended esters for electrotechnical applications: IEC 63012-2019[S]. Geneva: IEC,2019.
- [9] TAKA AKI K, HIROYUKI I, YOSHIYUKI H, et al. Analyses of electro-chemical characteristics of palm fatty acid esters as insulating oil[C]/IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Chasseneuil, France:IEEE,2008:1-4.
- [10] WAKIMOTO K. Features of eco-friendly transformers using palm fatty acid ester (PFAE), a new vegetable-based insulation oil[J]. Meiden Review,2015,163(1):39-45.
- [11] International Electrotechnical Commission. Mineral oil-impregnated electrical equipment in service - Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis: IEC 60599-2015[S]. Geneva: IEC,2015.
- [12] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated. IEEE guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers: IEEE C57.104-2019[S]. New York: IEEE, 2019.
- [13] JOVALEKIC M, VUKOVIC D, TENBOHLEN S. Dissolved gas analysis of alternative dielectric fluids under thermal and electrical stress[C]/IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Trondheim, Norway:IEEE,2011.
- [14] WANG Z D, YI X, HUANG J P, et al. Fault gas generation in natural-ester fluid under localized thermal faults[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2012,28(6):45-56.
- [15] HANSON D, LI K, PLASCENCIA J, et al. Understanding dissolved gas analysis of ester liquids: An updated review of gas generated in ester liquid by stray gassing, thermal decomposition and electrical discharge[C]/IEEE Electrical Insulation Conference. Montreal, Canada:IEEE,2016:138-144.
- [16] 袁帅,胡远翔,余辉,等.植物绝缘液热故障的模拟与产气规律研究[J].绝缘材料,2015,48(5):50-56.
- [17] 蔡胜伟,胡远翔,陈江波,等.天然酯绝缘液加速热老化时油中溶解气体研究[J].绝缘材料,2015,48(4):30-34.
- [18] WANG X F, WANG Z D, LIU Q, et al. Dissolved gas analysis of thermal faults in transformer liquids simulated using immersed heating method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(5):1749-1757.
- [19] PRZYBYLEK P, GIELNIAK J. Analysis of gas generated in mineral oil, synthetic ester, and natural ester as a consequence of thermal faults[J]. IEEE Access,2019,7:65040-65051.
- [20] International Electrotechnical Commission. Electrical insulation

- systems (EIS) - Thermal evaluation of combined liquid and solid components - Part1: General Requirements: IEC 62332-1-2011[S]. Geneva: IEC,2011.
- [21] Working Group A2.35 CIGRE. CIGRE technical brochure 436: Experiences in service with new insulating liquids[R]. Paris: CIGRE,2010.
- [22] TOKUNAGA J, NIKAIIDO M, KOIDE H, et al. Palm fatty acid ester as biodegradable dielectric fluid in transformers: A review [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2019,35(2):34-46.
- [23] BHATTACHARYA S, DALAI S. Suitability of alternate fluids as transformer insulation-a comprehensive review[C]//2020 International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering. Kolkata, India:IEEE,2020.
- [24] AMANULLAH M, ISLAM S M, CHAMI S, et al. Analyses of physical characteristics of vegetable oils as an alternative source to mineral oil-based dielectric fluid[C]//IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Coimbra, Portugal:IEEE,2005.
- [25] 王树荣,刘倩,骆仲洪,等. 基于热重红外联用分析的纤维素热裂解机理研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2006,40(7):1154-1158.
- [26] MEIRA M, VERUCCHI C, ÁLVAREZ R, et al. Dissolved gas analysis in mineral oil and natural ester liquids from thermal faults[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2021,28(4):1317-1325.
- [27] IDEM R O, KATIKANENI S, BAKHSHI N N. Thermal cracking of canola oil: Reaction products in the presence and absence of steam[J]. Energy & Fuels,1996,10(6):1150-1162.
- [28] 相晨萌. 山茶籽绝缘油中溶解气体分析与判断方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2017.
- [29] 袁帅,王立,李璐,等. 植物绝缘油-纸体系的热故障模拟特性研究[J]. 可再生能源,2017,35(6):811-817.
- [30] Working Group D1.32 CIGRE. CIGRE Technical brochure 443: DGA in non-mineral oils and load tap changers and improved DGA diagnosis criteria[R]. Paris: CIGRE,2010:1-33.
- [31] 张召涛. 植物绝缘油中特征气体及油纸吸湿特性与纳米粒子分散稳定性研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [32] DUVAL M, LAMARRE L. The Duval pentagon-a new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2014, 30(6):9-12.
- [33] DUVAL M, LAMARRE L. The new Duval pentagons available for DGA diagnosis in transformers filled with mineral and ester oils[C]//IEEE Electrical Insulation Conference. Baltimore, USA: IEEE,2017:279-281.
- [34] RAJAB A, ANDRE H, PAWAWOI A. Gas production and fault interpretation of monoesters under low thermal stresses[C]//2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems. Denpasar, Indonesia:IEEE, 2020.

收稿日期:2021-12-14 修回日期:2022-01-25

作者简介:马耀翔(1997-),男(汉族),山西朔州人,硕士生,主要从事电力变压器代替绝缘液的相关研究;通信作者:徐阳(1969-),男(汉族),陕西西安人,教授,博导,主要从事电气绝缘测试技术、电力变压器代替绝缘液、电力电缆、旋转电机绝缘评估等方面的研究工作。